

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

O problema multiobjetivo de despacho econômico/ambiental e uma comparação entre os métodos de restrições canalizadas progressivas e de reescalamiento não-linear com o NSGA-II

Elis Gonçalves¹

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Unesp, Bauru, SP

Antonio Roberto Balbo, Edméa Cássia Baptista²

Departamento de Matemática, Unesp, Bauru, SP

Diego Nunes da Silva³

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, EESC-USP, São Carlos, SP

Leonardo Nepomuceno⁴

Departamento de Engenharia Elétrica, Unesp, Bauru, SP

Resumo. Este trabalho propõe um método determinístico de otimização que envolve um método de reescalamiento não-linear, técnicas de correção de inércia, métodos de suavização de funções e de restrições canalizadas progressivas para resolução do Problema Multiobjetivo de Despacho Econômico e Ambiental com Pontos de carregamento de Válvula (PMDEA-PV). O PMDEA-PV é formulado como um problema multiobjetivo, não-linear, não-convexo e não-diferenciável e devido a essas dificuldades, normalmente, é resolvido utilizando de abordagens heurísticas. A técnica de suavização é utilizada neste trabalho para lidar com a não-diferenciabilidade, enquanto a estratégia de correção de inércia para gerar apenas direções de descida para o método de reescalamiento não-linear; o método de restrições canalizadas progressivas trata a natureza multiobjetivo do problema e por fim, o método de reescalamiento não-linear é usado para resolver os subproblemas gerados a partir da estratégia anterior. O método proposto é aplicado em dois sistemas teste, de 3 e 10 geradores e os resultados são comparados com os obtidos pelo método heurístico de otimização: Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II), mostrando sua eficiência.

Palavras-chave. Reescalamiento não-linear, Suavização Hiperbólica, Restrições Canalizadas Progressivas, Problema multiobjetivo, Despacho Econômico, Despacho Ambiental.

1 Introdução

O PMDEA-PV tem por objetivo minimizar o custo dos combustíveis e a emissão de poluentes na geração termoelétrica de energia, enquanto satisfaz as restrições operacionais

¹elisgon01@hotmail.com

²arbalbo@fc.unesp.br, baptista@fc.unesp.br

³diegons@usp.br

⁴leo@feb.unesp.br

do sistema. Devido aos pontos de carregamento de válvula, o problema é caracterizado pela não-convexidade e não-diferenciabilidade e requer o uso de um método de suavização para aproximar a função custo por uma que seja diferenciável e tornar possível o uso de um método determinístico de otimização.

O método da Suavização Hiperbólica [2] consiste em obter uma função aproximada da função custo do PMDEA-PV. Em seguida, uma estratégia de resolução de problemas multiobjetivo deve ser aplicada, a fim de gerar um conjunto de subproblemas mono-objetivos e permitir o uso do método determinístico de otimização. Duas estratégias são geralmente utilizadas na literatura, a da soma ponderada e a ε -restrito [8]. Por se tratar de um problema não-convexo, para o PMDEA-PV ambas as estratégias apresentam dificuldades na obtenção do conjunto de Pareto. Assim, é proposta neste trabalho uma técnica específica para este tipo de problema, o método de Restrições Canalizadas Progressivas (RCP). Por se tratar de um problema multiobjetivo, a solução ideal que minimiza ambas as funções é chamada de solução utópica e, com isso, a solução do problema consiste em determinar um conjunto de soluções eficientes (curva de Pareto-ótima), ou seja, cada subproblema gerado remete a uma solução.

Diversos autores têm proposto métodos de resolução para o PMDEA-PV, em sua maioria baseados em heurísticas devido a não-convexidade do problema. Neste trabalho, é proposto um método determinístico de otimização que envolve o reescalamamento não-linear [5] a partir da função barreira logarítmica modificada [9], com estratégia de correção de inércia e procedimentos previsor e corretor [7], semelhante a [12]. Os resultados obtidos são comparados aos de um método heurístico, o NSGA-II [3], que é desenvolvido de modo semelhante ao de um Algoritmo Genético para solucionar problemas de otimização multiobjetivo, diferenciando-se desse no processo de seleção, que utiliza um critério de classificação das soluções por nível de dominância e garante uma boa diversidade de soluções na curva Pareto-ótima.

2 Problema Multiobjetivo de Despacho Econômico e Ambiental

O objetivo do PMDEA-PV é minimizar duas funções objetivos conflitantes, a de despacho econômico e a de despacho ambiental, enquanto o balanço de potência do sistema é satisfeito juntamente com as restrições de capacidade de geração. O PMDEA-PV [1] é formulado por (1):

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar} \quad \{C(p), E(p)\} \\ & \text{Sujeito a:} \quad \sum_{i=1}^n p_i = P_d \\ & \quad \quad \quad P_i^{min} \leq p_i \leq P_i^{max}; \forall i = 1, \dots, n. \end{aligned} \tag{1}$$

em que p é o vetor de saída de potência ativa para todas as unidades térmicas [MW]; $C(p)$ é o custo de combustível para todas as unidades térmicas [\$]; $E(p)$ é o total de emissão de poluentes dado em [kg/h] ou [ton/h]; n é o número de unidades térmicas do

sistema; p_i é a potência ativa da unidade geradora i [MW]; P_d é o consumo de potência ativa [MW]; P_i^{\min} e P_i^{\max} são limites superiores e inferiores, respectivamente, de potência ativa da unidade geradora i , [MW].

As funções de despacho econômico e ambiental (2) e (3) são descritas em [11] e [4], respectivamente:

$$C(p) = \sum_{i=1}^n C_i(p_i) = \sum_{i=1}^n a_i p_i^2 + b_i p_i + c_i + \sum_{i=1}^n |e_i \text{sen}(f_i(P_i^{\min} - p_i))|, \quad (2)$$

$$E(p) = \sum_{i=1}^n E(p_i) = \sum_{i=1}^n \alpha_i p_i^2 + \beta_i p_i + \gamma_i, \quad (3)$$

em que a_i, b_i, c_i, e_i e f_i são os coeficientes da função custo para cada unidade i ; α_i, β_i e γ_i são os coeficientes da função emissão para cada unidade i .

3 Metodologia

Neste trabalho o método RCP foi utilizado para transformar o problema multiobjetivo em um conjunto de subproblemas mono-objetivos, em seguida, o método da Suavização Hiperbólica foi empregado a fim de eliminar o termo modular da função custo. Por fim, um método determinístico de reescalamiento não-linear baseado na função barreira logarítmica modificada, com estratégia de correção de inércia e procedimento previsor-corretor pôde ser utilizado para otimizar o PMDEA-PV. O método NSGA-II também foi utilizado para comparação dos resultados. Os métodos são descritos a seguir.

3.1 Método de Restrições Canalizadas Progressivas

O método RCP é uma variação do método ε -restrito [8], no sentido de que um dos objetivos é otimizado, enquanto os outros são incorporados ao conjunto de restrições do problema mono-objetivo. A diferença entre as estratégias se dá pela inclusão de limites superiores e inferiores para todas as funções objetivo que tenham sido incorporadas ao conjunto de restrições do problema mono-objetivo. Tais limites são estabelecidos tomando duas soluções eficientes pré-definidas. Na seção de resultados é possível observar que esta estratégia possibilitou a determinação de novas soluções eficientes e uma melhor distribuição dos pontos na curva de Pareto.

Considerando o modelo (4), neste trabalho foi introduzido um delimitador a restrição ambiental incorporada ao conjunto de restrições do problema de despacho econômico. Além de limitada superiormente para níveis máximos permissíveis de emissão, a função passou a ser limitada em relação a níveis mínimos. A inserção de um limite inferior é considerada para auxiliar na obtenção dos pontos da curva de soluções eficientes do problema. O limite inferior inserido à restrição de emissão é importante em termos práticos, uma

vez que métodos clássicos como a soma ponderada e o ε -restrito não foram eficazes para resolução do PMDEA-PV. O modelo de otimização para o método RCP do PMDEA-PV é apresentado em (4):

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } C_p \\ &\text{Sujeito a: } \sum_{i=1}^n p_i = P_d \\ &E_p(\beta)^{\min} \leq E_p \leq E_p(\beta)^{\max} \\ &P_i^{\min} \leq p_i \leq P_i^{\max}; \forall i = 1, \dots, n. \end{aligned} \tag{4}$$

em que E_p^{\min} e E_p^{\max} são, respectivamente, os limitantes de níveis mínimos e máximos permissíveis de emissão, utilizados para auxiliar na determinação de soluções eficientes do problema, e $\beta = 0, 1, \dots, N$. A resolução do modelo 4 ocorre para valores de β de modo que quando $\beta = 0$, o valor de $E_p^{\min}(0)$ está associado a solução obtida após a resolução do problema mono-objetivo de despacho ambiental e o valor de $E_p^{\max}(0)$ está associado a solução obtida após a resolução do problema mono-objetivo de despacho econômico. Para $\beta = 0, 1, \dots, N$ são determinadas, desde que exista(m), solução(ões) eficientes para o PMDEA-PV no valor de β considerado. Assim, o método de otimização proposto é utilizado para determinar as $N + 1$ soluções de forma que a curva de Pareto-ótima tenha a melhor distribuição possível dos pontos obtidos. É importante destacar que nem sempre é possível determinar soluções eficientes para algum determinado valor de β entre duas soluções eficientes já obtidas, como é possível observar no caso de 3 geradores a ser visto na seção de resultados.

O método RCP foi 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 anteriormente, 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 Suavização hiperbólica

Devido aos termos modulares senoidais que a função custo apresenta, o PMDEA-PV é não-diferenciável e não-convexo, sendo inviável que métodos determinísticos clássicos de otimização sejam diretamente aplicados à sua resolução. Contudo, é possível que através de uma estratégia de suavização, a função objetivo seja suavizada de tal forma que a função aproximada seja diferenciável em todos os pontos do seu domínio. Neste trabalho a Suavização Hiperbólica [2] é empregada com o objetivo de obter uma função custo aproximada e diferenciável. De acordo com [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 do PMDEA-PV e a resolução do problema suavizado é efetuada a partir da solução

de subproblemas continuamente diferenciáveis.

3.3 Reescalamento não-linear

Após a transformação do problema multiobjetivo em um conjunto de problemas mono-objetivos e a suavização da função custo, o método do Reescalamento não-linear (RN) foi aplicado à resolução do PMDEA-PV. O RN permite chegar até a solução de cada sub-problema a partir de soluções iniciais inviáveis, substituindo as restrições de desigualdade do problema original por restrições de desigualdade equivalentes, através de uma função de redimensionamento [5], que apresenta propriedades suaves locais bem definidas. Outra característica importante do método é que ele tem menor probabilidade de apresentar problemas de mal condicionamento da matriz Hessiana. Neste trabalho a função de redimensionamento utilizada é a função barreira logarítmica modificada [9].

A função barreira modificada proposta em [9] utilizada no método citado é $\psi(t) = \ln(t + 1)$, $t \in (-1, \infty)$, com $t = \mu^{-1}h_j(x)$ e $\mu > 0$ o parâmetro de barreira modificada, e utilizado para a relaxação da restrição de desigualdade: $h_j(x) \leq -\mu$. Essa relaxação permite ao método operar com pontos pertencentes à fronteira da região viável, bem como com pontos interiores à uma região relaxada exterior à região viável. 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. Tal sistema é linearizado, originando os procedimentos previsor e corretor. 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 para poder explorar a alternância da escolha da direção do passo previsor e corretor.

3.4 NSGA-II

O NSGA-II é um algoritmo genético utilizado para resolução de problemas multiobjetivo. O processo de seleção dos melhores indivíduos da população é baseado no conceito de dominância e preservação da diversidade da curva de soluções eficientes. O conceito de dominância consiste em classificar os indivíduos em fronteiras de acordo com a aptidão de cada um, no sentido dos melhores para os piores e em seguida eliminar os que estão muito próximos, a fim de que a curva de Pareto tenha pontos bem espalhados por toda a fronteira de soluções eficientes, evitando que soluções fiquem concentradas em uma única região. Após a classificação dos indivíduos, realiza-se o torneio e o cruzamento, voltando

ao processo de classificação até que a curva de Pareto-ótima seja obtida.

4 Aplicação e resultados

A composição de métodos proposta neste trabalho envolvendo o método de RCP, a suavização hiperbólica e o método RN foi implementada em linguagem Matlab 2011a, com base na estrutura do algoritmo apresentado em [12] e, em seguida, aplicada à resolução de dois problemas testes do PMDEA-PV, com 3 e 10 geradores. O NSGA-II, proposto em [3], também foi implementado em linguagem Matlab 2011a. Os dados utilizados foram extraídos de [10], [6] e [1].

Para o caso de 3 geradores, o tempo computacional necessário pela metodologia proposta para obter a curva Pareto-ótima foi de 12, 3686 segundos, enquanto no NSGA-II foi de 388, 6894 segundos, com uma população inicial igual a 500 e um total de 50 gerações. Para o caso de 10 geradores, foram necessários 2, 6777 segundos para obter a curva Pareto-ótima através da metodologia proposta e de 333, 8201 segundos através do NSGA-II, com uma população inicial de 300 e 100 gerações.

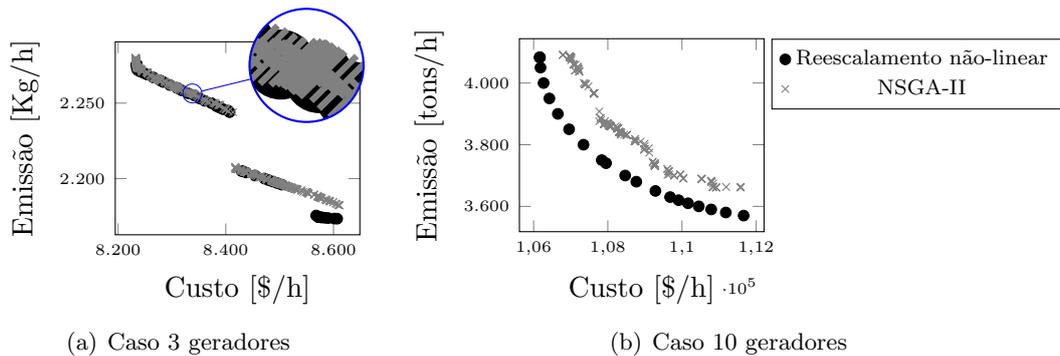


Figura 1: Soluções eficientes obtidas com o método de reescalamento não-linear e o NSGA-II

Como pode ser observado na Figura 1, o método proposto neste trabalho obtém, de fato, a curva de soluções eficientes do PMDEA-PV, iguais ou inferiormente melhores que o NSGA-II, que preenche com uma grande quantidade de pontos esta curva mas também obtém muitas soluções inviáveis (infactíveis) ao problema.

5 Conclusões

Um método determinístico de otimização é proposto neste trabalho envolvendo o método de reescalamento não-linear baseado na função barreira logarítmica modificada, com procedimento previsor-corretor e estratégia de correção de inércia; o método da suavização hiperbólica e o método de restrições canalizadas progressivas para resolução do PMDEA-PV. O método foi aplicado para resolução de dois problemas, de 3 e 10 geradores, e uma curva de Pareto-ótima obtida para cada caso. Comparando as curvas obtidas pelo

método proposto com as obtidas através do método heurístico de otimização NSGA-II, verifica-se a eficiência do proposto neste trabalho para resolução do PMDEA-PV.

Agradecimentos

À CAPES e à Fapesp (Processo 2014/20853-0) pelo apoio financeiro.

Referências

- [1] M. BASU, *Economic environmental dispatch using multi-objective differential evolution*, Applied Soft Computing, 11 (2011), pp. 2845 – 2853.
- [2] X. CHEN, *Smoothing methods for nonsmooth, nonconvex minimization*, Mathematical Programming, 134 (2012), pp. 71–99.
- [3] K. DEB, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, John-Wiley, (2004).
- [4] M. R. GENT AND J. W. LAMONT, *Minimum-emission dispatch*, Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-90 (1971), pp. 2650–2660.
- [5] I. GRIVA, *Numerical experiments with an interior-exterior point method for nonlinear programming*, Computational Optimization and Applications, 29 (2004), pp. 173–195.
- [6] K. MANIKANDAN AND K. SENTHIL, *Economic thermal power dispatch with emission constraint and valve point effect loading using improved tabu search algorithm*, International Journal of Computer Applications, 3 (2010).
- [7] S. MEHROTRA, *On the implementation of a primal-dual interior point method*, SIAM Journal on Optimization, 2 (1992), pp. 575–601.
- [8] K. MIETTINEN, *Nonlinear Multiobjective Optimization*, Kluwer, Boston, 1999.
- [9] R. A. POLYAK, *Modified barrier functions*, Mathematical Programming, 54 (1992).
- [10] M. M. A. SAMED, *Um algoritmo genético híbrido co-evolutivo para resolver problemas de despacho*, PhD thesis, Departamento de Engenharia Química - Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PN, 2004.
- [11] G. B. SHEBLE AND D. C. WALTERS, *Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading*, IEEE Transactions on Power Systems, 8 (1993), pp. 1325–1332.
- [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*, master's thesis, Faculdade de Engenharia de Bauru – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2014.