



## **Algoritmo de Polinização de Flores Aplicado ao Problema do Despacho Econômico com Múltiplos Combustíveis e Efeito do Ponto de Válvula.**

**Rafael O. G. Souza**

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Rua José Lourenço Kelmer, S/n – Martelos, Juiz de Fora – MG – Faculdade de Engenharia  
rafael.ochsendorf@engenharia.ufjf.br

**Ezequiel S. Oliveira**

Faculdade Doctum de Juiz de Fora  
Estrada Dom Orione, S/n – Dom Bosco, Juiz de Fora – MG  
eso\_ezequiel@hotmail.com

**Ivo C. Silva Junior**

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Rua José Lourenço Kelmer, S/n – Martelos, Juiz de Fora – MG – Faculdade de Engenharia  
ivo.junior@ufjf.edu.br

### **RESUMO**

Devido à grande importância do despacho econômico na operação e planejamento de sistemas elétricos de potência, buscaram-se novas abordagens para minimizar os custos de geração de energia elétrica. Para otimização do custo total de operação é necessário que a geração de cada unidade termoeletrica seja avaliada. Quando uma unidade termoeletrica é modelada de maneira real, com diversos tipos de combustíveis e considerando os efeitos de ponto de válvula, métodos tradicionais de otimização se mostram ineficientes devido à natureza da função de custo. Este trabalho apresenta um estudo da aplicação de um método metaheurístico baseado na polinização das flores para buscar soluções satisfatórias para o problema do despacho econômico. Os resultados obtidos são comparados com resultados divulgados na literatura a fim de avaliar a eficiência do método aqui proposto.

**PALAVRAS CHAVE. Despacho Econômico, FPA, Múltiplos Combustíveis.**

**Tópicos: Engenharia, Meta-heurística, Energia**

### **ABSTRACT**

Due to the high importance of economic dispatch in planning and operating electric power systems, new methods have been researched to minimize the costs of power generation. To calculate these costs, the power generation of each thermal unit must be evaluated. When a thermal unit is modelled considering real world constraints, such as multiple fuels and valve point effect, traditional optimization methods are inefficient due to the nature of the cost function. This paper shows a study of a meta-heuristic method, based in flower pollination to search for satisfactory results for economic dispatch. The results obtained are compared with results from other authors, with the purpose of evaluating how efficient the technique presented here is.

**KEYWORDS. Economic Dispatch. FPA. Multiple Fuels**

**Paper topics: Engineering, Meta-heuristic, Energy**



## 1. Introdução

O sistema elétrico busca atender a carga com o menor custo possível. O problema do Despacho Econômico (DE) busca determinar qual deve ser a potência gerada por cada usina termoeletrica para atingir este objetivo.

O DE é um problema de programação não-linear, onde a função que relaciona o custo pela geração com a potência gerada por uma usina é geralmente aproximada por uma função quadrática [Oliveira et al. 2015]. Tradicionalmente, o problema do despacho econômico pode ser resolvido utilizando diversas técnicas de otimização, tratando a função do custo de geração através de uma função convexa, o que simplifica bastante o problema [Oliveira et al. 2015], [Wood e Wollenberg 1996].

Em casos reais, onde deve ser considerado que uma termoeletrica pode funcionar com múltiplos combustíveis e o efeito do ponto de válvula, a função que relaciona o custo de geração com a potência gerada, não é uma função convexa, impossibilitando as aplicação de técnicas clássicas de resolução. O fato da função ser não convexa aumenta significativamente o grau de complexidade do problema e a aplicação de métodos metaheurísticos em busca de uma solução adequada se torna uma alternativa interessante e atraente. Diversos métodos metaheurísticos já foram aplicados ao problema de despacho econômico, tal como Algoritmo Genético [Chiang 2005], Evolução Diferencial [Sayah e Hamouda 2012], *Q-Learning* [Abouheaf et al. 2014], Enxames de Partícula [Gaing 2003], ou até mesmo técnicas híbridas e/ou modificadas.

Métodos de otimização bioinspirados possuem bons desempenhos e parecem ser cada vez mais promissores. Desta forma, estes métodos estão se tornando cada vez mais populares, sendo aplicados em diversas áreas da engenharia com o intuito de encontrar resultados em problemas que os métodos tradicionais apresentam dificuldades.

Neste contexto, um método metaheurístico foi proposto por Xin-She Yang [Yang, 2012] e vem sendo aplicado para resolver problemas nas mais diversas áreas de conhecimento.

Este artigo apresenta a análise de resultados obtidos através da aplicação do algoritmo baseado em polinização das flores para a resolução do despacho econômico, visando comparar a qualidade das soluções obtidas com os resultados apresentados na literatura especializada.

## 2. Formulação do Despacho Econômico

O problema do despacho econômico consiste em um problema de otimização que tem como objetivo a minimização do custo total do combustível de cada unidade termoeletrica, sujeito às restrições de operação e de atendimento a demanda.

Sendo assim, o problema consiste em minimizar uma função objetivo ( $F_T$ ), que corresponde ao custo total de geração de todas as termoeletricas disponíveis. Além disso, deve ser considerado um conjunto de restrições, determinados pela potência mínima e máxima que pode ser gerado por cada termoeletrica, e o balanço de potência do sistema, ou seja, a geração deve atender a carga. Portanto, o modelo matemático do sistema fica da seguinte forma:

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

Sujeito as seguintes restrições:

$$\sum_{i=1}^N (P_i) = P_D \quad (2)$$



$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max} \quad (3)$$

Onde:

- $F_T$  : Função de custo total da operação do sistema;
- $F_i$  : Função de custo da termoeletrica  $i$ ;
- $P_i$  : Potência ativa gerada pela termoeletrica  $i$ ;
- $P_D$  : Potência ativa demandada pelo sistema;
- $P_i^{min}$  : Potência mínima gerada pela termoeletrica  $i$ ;
- $P_i^{max}$  : Potência máxima gerada pela termoeletrica  $i$ ;
- $N$  : Número total de termoeletricas do sistema;

A seguir, serão descritas a modelagem clássica, que trata a função de custo como uma função quadrática e como os efeitos do ponto de válvula e a opção de múltiplos combustíveis afeta esta função.

### A. Formulação Tradicional

A aproximação da função de custo por uma simples função quadrática, é a abordagem clássica, onde segue a seguinte característica:

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

Onde  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$  são coeficientes de custos referentes ao gerador  $i$ .

As restrições deste problema são representadas pelas equações (2) e (3). A equação (2) garante o balanço de potência do sistema, onde a potência gerada deve ser igual a potência consumida. Neste caso, não estão sendo consideradas as perdas do sistema. A equação (3), por sua vez, é referente aos limites de geração de cada gerador.

### B. Restrições Reais do problema

Na prática, existem ainda restrições devido ao ponto de válvula e devido ao fato de que alguns geradores podem operar com múltiplos combustíveis. A seguir, serão descritos como estes dois fatores afetam a modelagem do problema:

*1) Ponto de Válvula:* O efeito do ponto de válvula acontece quando a válvula é aberta para tentar controlar a temperatura interna da caldeira ou turbina [Oliveira 2015]. Isto impacta no consumo de combustível do sistema, pois há um decréscimo na temperatura, e conseqüentemente é necessário algum tempo (e combustível) para que o equipamento volte a trabalhar em sua temperatura ideal. Este efeito cria *ripples* na função de custo, que passa a ter a seguinte característica:

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + \alpha_i |e_i \sin(f_i(P_i^{min} - P_i))| \quad (5)$$

Onde:

$e_i$  e  $f_i$ : São os coeficientes que representam o efeito do ponto de válvula da termoeletrica  $i$ ;

$\alpha_i$  : É um número binário que possibilita a ativação ou não do efeito do ponto de válvula para a termoeletrica  $i$ ;



II) *Múltiplos Combustíveis*: O tipo de combustível utilizado por uma termoeletrica afeta diretamente no custo de operação de uma termoeletrica. Sendo assim, os coeficientes  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$ , presentes tanto na equação (4) quanto na equação (5) são afetados pelo tipo de combustível utilizado. Desta maneira, o problema do despacho econômico é encontrar qual o ponto de operação e qual combustível cada usina termoeletrica deve utilizar para minimizar o custo de geração do sistema como um todo. Portanto, quando considerado a opção de múltiplos combustíveis, cada gerador, passa ter a seguinte função de custo:

$$F_i(P_i) = \begin{cases} a_{i1} + b_{i1}P_i + c_{i1}P_i^2 + \alpha_i |e_{i1} \sin(f_{i1}(P_i^{min} - P_i))| & (I) \\ a_{i2} + b_{i2}P_i + c_{i2}P_i^2 + \alpha_i |e_{i2} \sin(f_{i2}(P_{i1} - P_i))| & (II) \\ \vdots \\ a_{inc} + b_{inc}P_i + c_{inc}P_i^2 + \alpha_i |e_{inc} \sin(f_{inc}(P_{i(nc-1)} - P_i))| & (III) \end{cases} \quad (6)$$

Onde a equação (I) é referente ao custo utilizando o combustível I, a equação II é referente ao custo utilizando o combustível II, e a equação III generaliza esta função para  $nc$  tipos de combustíveis, onde  $nc$  é o número de combustíveis que o gerador  $i$  pode operar.

### 3. Flower Pollination Algorithm

O método utilizado para busca da solução ótima neste trabalho é baseado no algoritmo FPA (*Flower Pollination Algorithm*) ou algoritmo de polinização de flores. Este algoritmo parte da observação da evolução das flores, que já estão presentes no planeta há pelo menos 125 milhões de anos. [Yang et al. 2013]. O algoritmo FPA faz as seguintes considerações:

1. Polinizações bióticas (feitas por animais, como insetos e aves) e polinização cruzada (que possuem grande variedade genética) são consideradas como o processo global de polinização. Os polinizadores se movem de uma maneira que obedecem aos voos de Levy.
2. Para polinização local, são utilizados autopolinização e polinizações abióticas.
3. Polinizadores bióticos podem buscar constantemente as mesmas espécies de flores, o que é equivalente a probabilidade de reprodução quando existem flores diferentes, porém da mesma espécie na natureza.
4. A variação na busca de soluções através de polinizações locais ou globais podem ser definidas a partir do parâmetro  $p \in [0, 1]$ . Para este trabalho, foi encontrado melhores resultados usando o valor de  $p = 0,6$ .

As quatro regras acima, criada por Yang em [Yang et al. 2013], definem o mecanismo de busca de solução ótima através do FPA. Transformando as quatro regras acima em equações, temos:

Para polinizações bióticas ou cruzadas:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + L(x_i^t - g^*) \quad (7)$$

Onde:

- $x_i^t$  : É o vetor de soluções na iteração  $t$ .
- $g^*$  : É a Melhor solução encontrada até então.
- $L$  : É o Vetor de passo que obedece aos voos de Levy.



E para polinizações abióticas, tem-se:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \epsilon(x_j^t - x_k^t) \quad (8)$$

Onde:

$x_j^t, x_k^t$  : São polens de flores diferentes da mesma espécie.

$\epsilon$  : Um número aleatório entre 0 e 1 que representa uma busca local aleatória por uma nova flor.

Sendo assim, de acordo com [Yang et al. 2013], o seguinte pseudocódigo representa o processo de busca realizado através de FPA:

*Definir a função objetivo, minimizar ou maximizar  $f(x), x = (x_1, x_1, \dots, x_d)$*   
*Inicializar a população de  $n$  flores com soluções aleatórias*  
*Procurar a melhor solução  $g$  \* dentro da população inicial*  
*Definir o parâmetro de probabilidade de mudança de flor,  $p$ .*  
*Definir o critério de parada, como por exemplo, o número de iterações  $t$*   
*Agora, faça:*  
**Enquanto** ( $t < \text{Número máximo de Geração}$ )  
    **Para**  $i = 1$  até  $n$   
        *Sortear um número randômico, rand*  
        **Se**  $\text{rand} < p$   
            *Criar um vetor de passo obedecendo ao voo de Levy  $L$*   
            *Executar a polinização global através da equação (7)*  
        **Caso contrário**  
            *Pegar um número aleatório  $\epsilon$  entre 0 e 1.*  
            *Fazer a polinização local através da equação (8)*  
        **Fim do Se**  
        *Avaliar as novas soluções.*  
        *Se as soluções forem melhor, atualizar a população com a nova solução.*  
    **Fim do Para**  
**Fim do Enquanto**  
*Mostrar a melhor solução de saída encontrada*

#### 4. Resultados

Seguindo o pseudocódigo mostrado na seção anterior, o método foi aplicado para a resolução de um caso com múltiplos combustíveis e com efeito de ponto de válvula, através do software MATLAB®. Foram avaliados três cenários diferentes de carregamento, com o objetivo de avaliar o desempenho da ferramenta para resolver problemas desta natureza.

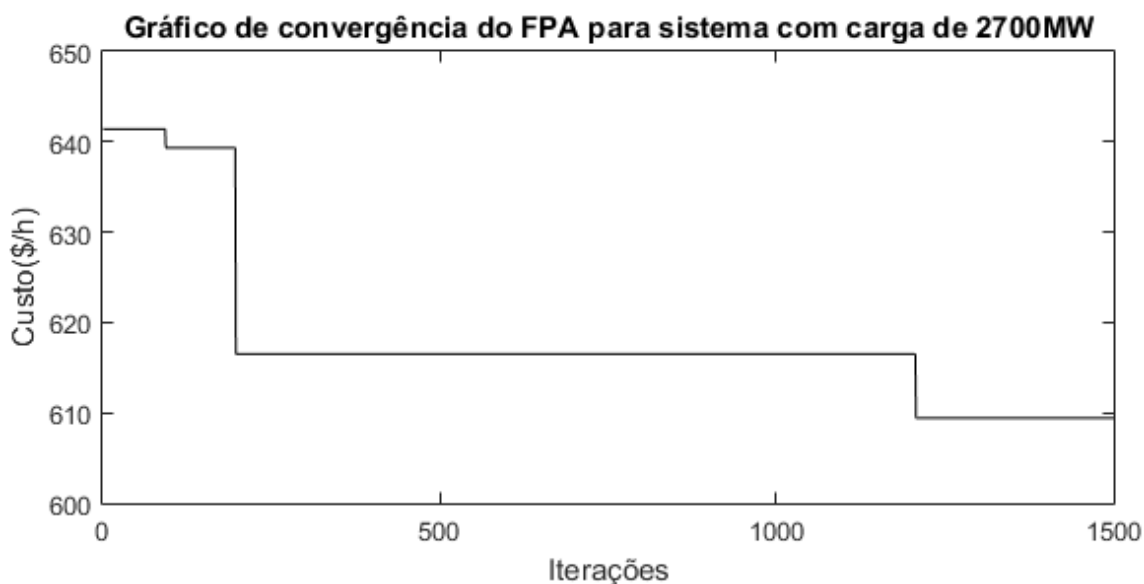
Inicialmente, para definir os parâmetros de entrada (a população de  $n$  flores e o parâmetro  $p$  que representa a probabilidade de mudança de flor), foram testadas diversas configurações, variando  $p$  de 0,1 a 0,9 para cada número de flores, que foi variado de  $n = 2$  até  $n = 25$ . Com isto, os melhores resultados foram encontrados para  $n = 20$  e  $p = 0,6$ . Estes testes foram realizados utilizando o sistema apresentando em [Abouheaf et al. 2014], que já foi abordado por diferentes métodos. O critério de parada foi o de 1500 iterações.



Uma vez que os parâmetros de entrada foram definidos, o método foi aplicado em um sistema composto por dez usinas termoeletricas, com múltiplos combustíveis, efeito de ponto de válvula, e uma carga, inicialmente, de 2700MW. O melhor resultado obtido é apresentado pela Tabela I, sendo o gráfico de convergência ilustrado através da Figura 1.

**Tabela I - Resultados Obtidos Via FPA para Sistema com Carga de 2700MW e Ponto de Válvula.**

Unidade Térmica	Tipo de Combustível	Geração (MW)	Custo de Geração (\$/h)
1	1	185,6290	28,1811
2	3	205,8662	35,0194
3	2	358,4885	88,2373
4	3	230,8607	43,4672
5	1	276,3482	71,2064
6	3	230,8607	43,4087
7	1	282,2848	69,7562
8	3	230,8607	43,3705
9	3	414,3451	111,7990
10	1	284,4559	74,8832
<b>TOTAL</b>		<b>2700</b>	<b>609,1843</b>



**Figura 1 - Evolução da Convergência do FPA.**

Com o resultado obtido, Tabela I, foi possível confrontar a solução encontrada com a literatura especializada, vide Tabela II



**Tabela II - Comparação dos Resultados Obtidos Via FPA Com Outros Métodos Para Sistema de 2700MW Com Ponto de Válvula.**

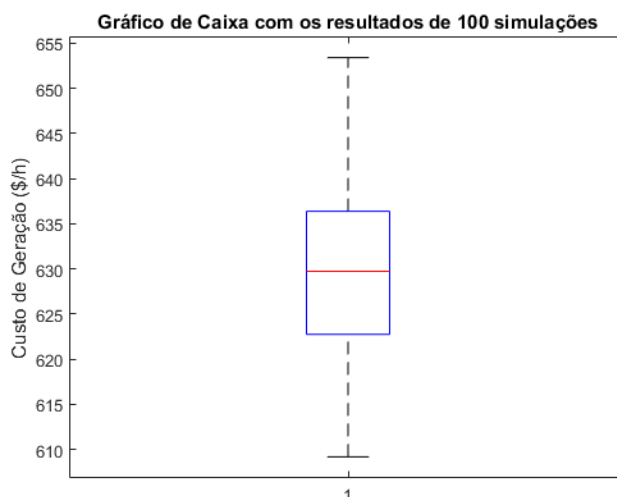
<b>Método</b>	<b>Custo Mínimo de Geração (\$/h)</b>
CGA-MU [Chiang 2005]	624,7193
IGA-MU [Chiang 2005]	624,5178
NPSO-LRS [Selvakumar e Thanushkodi 2007]	624,1273
APSO <sup>1</sup> [Selvakumar e Thanushkodi 2008]	624,0145
APSO <sup>2</sup> [Panigrahi et. al. 2008]	623,9099
CBPSO-RVM [Sriyanyong et al 2010]	623,9588
DE [Sayah e Hamouda 2012]	623,8900
EDE [ Sayah e Hamouda 2012]	623,8300
Q-Learning [Abouheaf et al. 2014]	624,3116
Trelea-PSO [Oliveira et al. 2015]	606,1120
<b>FPA</b>	<b>609,1843</b>

Como é mostrado na Tabela II, a técnica utilizada mostrou resultados competitivos. No entanto, é interessante analisar o desempenho do método como um todo, e não apenas a melhor solução encontrada. Sendo assim, o problema foi simulado 100 vezes, realizando 1500 iterações por simulação. Esta análise permite obter o valor médio, máximo e mínimo após um grande número de amostras, bem como analisar a distribuição de resultados como um todo. A Tabela III, a seguir, apresenta o valor máximo, mínimo e médio para o caso em estudo.

**Tabela III - Valor Máximo, Médio e Mínimo encontrado via FPA.**

Valor Máximo	653,4226
Valor Médio	629,5662
Valor Mínimo	609,1843

Como o método não garante a convergência sempre para um mesmo resultado e há uma grande variedade de resultados encontrados, torna-se interessante fazer uma análise mais detalhada do método. Para isso, a utilização de um diagrama de caixas se torna uma ferramenta robusta que permite localizar a variação do custo de geração mediante as 100 simulações realizadas, avaliando o desempenho da técnica utilizada. O tempo computacional médio para realizar todas as 100 simulações, com 1500 iterações cada (totalizando 150.000 iterações) foi de aproximadamente 2 horas. Os resultados encontrados são apresentados através da Figura 2.



**Figura 2 - Distribuição dos Resultados de 100 simulações visto através do gráfico de caixas.**

Diante do gráfico apresentando, Figura 2, é possível concluir que:

1. O quartil inferior representa onde os 25% dos resultados mais baixos se encontram e varia de 609,1843 até 622,7585.
2. O quartil superior representa onde os 25% dos resultados mais altos se encontram e varia de 636,391 até 653,4226.
3. O restante dos resultados (50%), portanto, abrange a faixa de valores entre 622,7585 até 636,391.
4. Após cem simulações, a mediana foi de 629,7428, a qual é um valor muito próximo da média encontrada anteriormente.

Visto que o algoritmo obteve resultados satisfatórios é interessante que o FPA seja aplicado a outros cenários de demanda. Desta forma, o método foi aplicado ao mesmo sistema, porém com carga de 2500MW e sem o ponto de válvula. Esta configuração vem sendo abordada por diversos autores, os quais utilizam outras técnicas de otimização. A comparação dos resultados é apresentada através da Tabela IV.

**Tabela IV - Comparação dos Resultados Obtidos Via FPA Com Outros Métodos Para Sistema de 2500MW Sem Ponto de Válvula.**

<b>Método</b>	<b>Custo Mínimo de Geração (\$/h)</b>
HNUM [Lin e Viviani 1984]	526,70
HNN [Park et al. 1993]	526,13
MPSO [Park et al. 2005]	526,239
DE [Noman e Iba 2008]	526,239
EALHN [Vo e Ongsakul 2012]	526,239
Trelea-PSO [Oliveira et al. 2015]	511,0440
<b>FPA</b>	<b>522,0068</b>

Diante da Tabela IV é possível verificar que o FPA foi capaz de encontrar uma solução de boa qualidade quando confrontado com os demais trabalhos existentes na literatura. Um outro





cenário em análise considera a carga do sistema como sendo de 2600MW e os resultados são apresentados na Tabela V.

**Tabela V - Comparação dos Resultados Obtidos Via FPA Com Outros Métodos Para Sistema de 2600MW Sem Ponto de Válvula.**

<b>Método</b>	<b>Custo Mínimo de Geração (\$/h)</b>
HNUM [Lin e Viviani 1984]	574,03
HNN [Park et al. 1993]	574,26
MPSO [Park et al. 2005]	574,381
DE [Noman e Iba 2008]	574,381
EALHN [Vo e Ongsakul 2012]	574,381
Trelea-PSO [Oliveira et al. 2015]	556,6593
<b>FPA</b>	<b>561,9712</b>

As configurações que originaram os melhores resultados para os cenários de 2500MW e 2600MW são apresentados na Tabela VI.

**Tabela VI - Resultados Obtidos Via FPA para Sistemas de 2500MW e 2600MW Sem Ponto de Válvula.**

<b>Unidade Térmica</b>	<b>Tipo de Combustível</b>		<b>Geração (MW)</b>		<b>Custo de Geração (\$/h)</b>	
	2500MW	2600MW	2500MW	2600MW	2500MW	2600MW
-						
1	2	2	218,0949	219,9845	42,9339	43,8965
2	3	3	184,2068	196,2621	26,9530	30,8913
3	2	2	353,9263	356,1525	85,7799	86,9747
4	3	3	225,5379	231,8897	41,3901	43,7836
5	1	1	217,8836	237,4385	45,4987	53,2824
6	3	3	225,5379	231,8897	41,3901	43,7836
7	1	1	227,6640	246,2935	46,1413	53,4473
8	3	3	225,5379	231,8897	41,3901	43,7836
9	3	3	393,9547	401,4975	102,0699	105,6054
10	1	1	227,6558	246,7023	48,4591	56,5227
<b>TOTAL</b>			<b>2500MW</b>	<b>2600MW</b>	<b>522,0068</b>	<b>561,9712</b>

Diante da Tabela VI é possível concluir que para os dois últimos cenários em análise, a configuração dos tipos de combustíveis a ser usado foi a mesma, independente da carga do sistema em análise. É interessante notar ainda, que este não é o caso quando comparamos este



resultado com o caso de 2700MW e com efeito de ponto de válvula, onde existe uma diferença no combustível utilizado pela primeira unidade termoeletrica.

## 5. Avaliação dos Resultados

O método aplicado resolveu o problema do Despacho Econômico de maneira eficiente. Apesar da técnica aplicada não garantir a solução ótima, como qualquer outra metaheurística, o quartil inferior referente ao sistema com carga de 2700MW, observado através do gráfico de caixas, já mostrou soluções com valores menores do que a todos os resultados comparados, com exceção da solução via Trelea-PSO.

Os resultados ficaram bem distribuídos na faixa de valores encontrados, e este comportamento se repetiu quando a carga do sistema foi variada para 2500MW e 2700MW, o que mostra que isto pode ser uma característica da técnica aplicada.

## 6. Conclusão

Este artigo abordou o problema referente ao despacho econômico de unidades termoeletricas de geração através de uma modelagem mais realista, isto é, considerando os efeitos do ponto de válvula e de múltiplos combustíveis. Sendo assim, como o problema se torna não-convexo, a aplicação de métodos metaheurísticos se torna uma possibilidade interessante para encontrar uma solução satisfatória para o problema em questão.

A resolução via FPA (*Flower Pollination Algorithm*) se mostrou eficaz na solução do problema em estudo. Quando comparada com outras metodologias difundidas na literatura, o FPA apresentou resultados de boa qualidade e competitivos, validando o potencial do método.

## 7. Agradecimentos

Os autores agradecem ao INERGE (Instituto Nacional de Energia Elétrica), ao GOHB (Grupo de Otimização Heurística e Bioinspirada), a Faculdade Doctum e a FCT (Fundação Centro Tecnológico de Juiz de Fora) pelo apoio prestado durante a realização do trabalho.

## Referências

Abouheaf, M., Haesaert, S., Lee, W. J., e Lewis, F. (2014). Approximate and reinforcement learning techniques to solve non-convex economic dispatch problems. In *Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD)*, pp. 1–8.

Bhattacharya, A. e Chattopadhyay, P. (2010). Hybrid differential evolution with biogeography-based optimization for solution of economic load dispatch. *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 4, pp. 1955–1964.

Chiang, C. L. (2005). Improved genetic algorithm for power economic dispatch of units with valve-point effects and multiple fuels. *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 4, pp. 1690–1699.

Gaing, Z.-L. (2003). Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints. *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 3, pp. 1187–1195.

Lin, C. e Viviani, G. (1984). Hierarchical economic dispatch for piece-wise quadratic cost functions. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, no. 6, pp. 1170–1175.



- Lu, H., Sriyanyong, Song, P.Y. H., e Dillon, T. (2010). Experimental study of a new hybrid {PSO} with mutation for economic dispatch with non-smooth cost function. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, no. 9, pp. 921 – 935.
- Noman, N. e Iba, H. (2008). Differential evolution for economic load dispatch problems. *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 8, pp. 1322–1331.
- Oliveira, E. S. (2015). Metaheurísticas aplicadas ao problema do despacho econômico de energia elétrica. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Oliveira, E. S., Silva Junior, I. C., Oliveira, L. W., Dias, B. H., Oliveira, E. J. (2015). Non-Convex Economic Dispatch using Trelea Particle Swarm Optimization. *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, pp. 1-6.
- Park, J., Kim, Y., Eom, I. e Lee, K. (1993). Economic load dispatch for piecewise quadratic cost function using hopfield neural network. *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 3, pp. 1030–1038.
- Panigrahi, B. Pandi, V. R. e Das, S. (2008). Adaptive particle swarm optimization approach for static and dynamic economic load dispatch. *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 6, pp. 1407 – 1415.
- Park, J. B., Lee, K. S., Shin, J. R. e Lee, K. Y. (2005). A particle swarm optimization for economic dispatch with nonsmooth cost functions. *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 1, pp. 34–42.
- Sayah S. e Hamouda, A. (2012). Nonsmooth economic power dispatch through an enhanced differential evolution approach. In *2012 International Conference Complex Systems (ICCS)*, pp. 1–6.
- Selvakumar, A. I. e Thanushkodi, K. (2007). A new particle swarm optimization solution to nonconvex economic dispatch problems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 1, pp. 42–51.
- Selvakumar, A. I. e Thanushkodi, K. (2008). Anti-predatory particle swarm optimization: Solution to nonconvex economic dispatch problems. *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 1, pp. 2 – 10.
- Vo, D. N. e Ongsakul, W. (2012). Economic dispatch with multiple fuel types by enhanced augmented lagrange hopfield network. *Applied Energy*, vol. 91, no. 1, pp. 281–289.
- Wood, A. J. e Wollenberg, B. F. (1996). *Power generation, operation, and control*. Editora John Wiley & Sons, Inc.
- Yang, X. S. (2012). Flower Pollination Algorithm for Global Optimization. In *International Conference on Unconventional Computing and Natural Computation*, pp 240 - 249.
- Yang, X. S., Karamanoglu, M., He, X. (2013). Multi-objective Flower Algorithm for Optimization. *Procedia Computational Science*, pp. 861-868.