

OTIMIZAÇÃO DE DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO BASEADO EM BIOGEOGRAFIA

Marsil de Athayde Costa e Silva, marsil@ymail.com¹
Viviana Cocco Mariani, viviana.mariani@pucpr.br²
Leandro dos Santos Coelho, leandro.coelho@pucpr.br³

¹ Graduação em Engenharia Mecatrônica

² Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUCPR / PPGEM

³ Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, PUCPR / PPGEPS

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Rua Imaculada Conceição, 1155, CEP 80215-901, Curitiba, Paraná, Brasil

***Resumo:** O objetivo do problema de despacho econômico da geração de energia elétrica usando unidades geradoras térmicas, em que as características são complexas e altamente não lineares, é escalar as saídas das unidades de geração comissionadas de forma a encontrar a demanda de carga requerida a um custo mínimo de operação e satisfazendo as restrições de igualdade e desigualdade impostas pelo problema de otimização a ser resolvido. Recentemente, como uma alternativa as abordagens matemáticas convencionais, os algoritmos evolutivos têm atraído atenção de muitos pesquisadores devido a sua habilidade em obter boas soluções em problemas de despacho econômico de energia elétrica. Neste artigo, uma abordagem de otimização baseada em biogeografia e técnica oposicional é validada. Biogeografia é o estudo da distribuição geográfica de organismos biológicos. A metodologia de otimização baseada em biogeografia é validada para um sistema teste com a presença de 40 geradores térmicos. Os resultados de simulação deste trabalho são comparados com os estudos relatados na literatura. Nota-se que para o caso estudado, os resultados obtidos neste trabalho com a abordagem de otimização baseada em biogeografia são comparativamente melhores que os resultados dos estudos recentes apresentados na literatura.*

***Palavras-chave:** despacho econômico de energia elétrica, algoritmo evolutivo, otimização, biogeografia.*

1. INTRODUÇÃO

Um dos problemas mais relevantes em sistemas elétricos de potência é o de Despacho Econômico de energia elétrica (DE). O problema de DE é encontrar uma combinação ótima das saídas das unidades de geração de energia que minimize o custo total da geração e atenda à demanda de energia, desde que satisfaçam as restrições da unidade e restrições de igualdade e desigualdade. Vários métodos matemáticos tem sido utilizados para resolver o problema de DE, tais como programação linear, método iterativo lambda, métodos baseados em gradiente e programação dinâmica (Lin e Chen, 2002; Granelli e Montagna, 2000). Porém quando o problema tem características altamente não-lineares esses métodos podem não fornecer uma boa solução. Alguns métodos de otimização inspirados no comportamento da natureza, tais como otimização por enxame de partículas (Jeyakumar, 2006), sistemas imunológicos artificiais (Gonçalves, 2010) e algoritmos genéticos (Chiang, 2005), tem mostrado alta capacidade de solucionar esse tipo de problema. Recentemente uma abordagem baseada em biogeografia tem mostrado bons resultados na resolução de problemas de otimização tais como o de DE (Bhattacharya, 2010).

A biogeografia estuda a origem, distribuição geográfica e a migração de seres vivos entre habitats de um ecossistema. As equações matemáticas que regem a distribuição de organismos foram descobertas e desenvolvidas durante a década de 1960, por, por exemplo, MacArthur e Wilson (1967). Inspirado por tal fundamentação, Simon (2008) propôs uma nova metaheurística baseada em biogeografia para a resolução de problemas de otimização.

A contribuição deste trabalho é descrever e avaliar esta metaheurística na resolução do problema de despacho econômico de energia elétrica. Uma abordagem baseada em oposição é aplicada a fim de melhorar o desempenho da procura (Rahnamayan, 2008). A abordagem baseada em oposição é utilizada para acelerar a convergência da otimização. Isto é feito comparando a aptidão de uma solução com a respectiva solução oposta e mantendo a melhor dentre as duas testadas.

Neste artigo a abordagem baseada em biogeografia combinada com oposição é aplicada na resolução de um problema de 40 geradores térmicos considerando os efeitos de ponto de válvula. Os resultados obtidos são comparados com outros presentes na literatura recente.

O restante do artigo é organizado da seguinte forma: na seção 2 é brevemente descrito o problema de despacho econômico. Os conceitos da otimização baseada em biogeografia e da abordagem baseada em oposição são apresentados nas seções 3 e 4 respectivamente. Os resultados de simulação são apresentados na seção 5 e na seção 6 é apresentada a conclusão do artigo.

2. DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA

O principal objetivo do problema de DE é minimizar o custo total de combustível em usinas termelétricas sujeitos às limitações de funcionamento de um sistema de potência. Portanto, pode ser formulado matematicamente com uma função objetivo e duas restrições. As restrições de igualdade e desigualdade são representadas pelas Eq. (1) e (2) dadas por:

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

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (2)$$

onde P_i é a potência do gerador i em MW; n é o número de geradores do sistema; P_D é a demanda total em MW; P_L representa as perdas na linha de transmissão e P_i^{\min} e P_i^{\max} são respectivamente a mínima e máxima potência do gerador i em MW. A Equação (1) representa as restrições de igualdade do balanço de potência, enquanto a Eq. (2) representa as restrições de desigualdade relativas aos limites da capacidade de geração de potência de cada unidade geradora. A função do custo total de combustível é formulada como um problema de otimização (minimização) expressa pela Eq. (3).

$$\min f = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (3)$$

onde F_i é a função custo de combustível para a unidade geradora i (em \$/h), que é definida pela equação,

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + |e_i \text{sen}(f_i(P_i^{\min} - P_i))| \quad \$/h \quad (4)$$

onde a_i , b_i , c_i , e_i e f_i são restrições das características do gerador. Neste caso, o custo total de combustível que deve ser minimizado é dado por

$$\min f = \sum_{i=1}^n \tilde{F}_i(P_i) \quad (5)$$

na qual \tilde{F}_i é a função custo para a unidade geradora i (em \$/h), que é definida pela equação (4). No exemplo abordado, neste artigo, são desconsideradas as perdas de transmissão P_L , portanto, neste caso $P_L = 0$.

3. OTIMIZAÇÃO BASEADA EM BIOGEOGRAFIA

A metaheurística baseada em biogeografia (em inglês *Biogeography-Based Optimization*, BBO) é um método que utiliza os modelos matemáticos e os conceitos da biogeografia. Esses modelos descrevem a migração de espécies entre habitats em um ecossistema e como espécies surgem ou desaparecem. Cada habitat ou ilha representa uma possível solução e tem um índice de adequação de habitat (HSI). Os aspectos relacionados com o HSI são, por exemplo, pluviosidade, a diversidade da fauna e da flora, a topografia e a temperatura local. Esses fatores são chamados de variáveis-índices de adequação (SIVs). Um bom habitat tem um HSI alto e um habitat pobre tem um baixo HSI. As espécies tendem a imigrar para os habitats com uma alta HSI, porque esses habitats são melhores para se viver. Da mesma forma, espécies tendem a emigrar dos habitats com baixos HSI. Assim, os habitats com alto HSI tendem a ter um grande número de espécies e uma alta taxa de emigração, porque estão quase saturados, enquanto habitats pobres têm um pequeno número de espécies e uma baixa taxa de imigração. Portanto, os habitats pobres podem aumentar seu

HSI, porque a adequação de um habitat é proporcional à sua diversidade biológica. No entanto, se o HSI de um habitat permanece baixo, espécies irão desaparecer ou tornar-se extintas. Por causa disso, habitats com baixo HSI são mais dinâmicos do que aqueles com alto HSI. A Figura (1) representa a emigração e imigração como uma função do número de espécies (Simon, 2008).

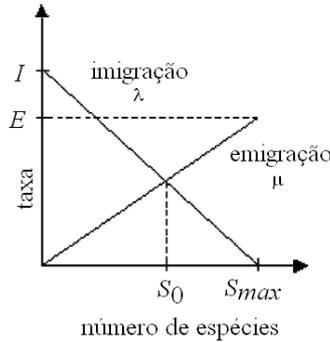


Figura 1. Modelo de espécies (MacArthur e Wilson, 1967).

Inspirado nesses conceitos a otimização baseada em biogeografia (BBO) foi proposta em Simon (2008). O algoritmo básico do BBO é descrito nas seguintes etapas:

(1) Iniciar os parâmetros que serão usados: S_{max} (número máximo de espécies), E (taxa de emigração), I (taxa de imigração) e m_{max} (máxima mutação).

(2) Calcular a probabilidade para cada valor do número de espécies como segue:

$$P_j = \frac{1}{S_{max}} \quad (6)$$

onde $j = 1, \dots, S_{max}$, e P é um vetor com a probabilidade de cada habitat.

(3) Gerar uma população inicial aleatoriamente com base nas Eq. (1) e (2).

(4) Iniciar o laço de repetição:

(4.i) Gerar as taxas de emigração e imigração:

$$\lambda_j = \frac{I(1-j)}{S_{max}} \quad (7)$$

$$\mu_j = \frac{E}{S_{max}} \quad (8)$$

onde λ_j e μ_j são as taxas de imigração e emigração para o habitat j .

(4.ii) Calcular a derivada da probabilidade:

$$\gamma = -(\lambda_s + \mu_s)P_s \quad (9)$$

$$\begin{cases} \bullet \\ P_s = \gamma + \mu_{s+1}P_{s+1} & s = 0 \\ \bullet \\ P_s = \gamma + \lambda_{s-1}P_{s-1} + \mu_{s+1}P_{s+1} & 1 \leq s < S_{max} \\ \bullet \\ P_s = \gamma + \lambda_{s-1}P_{s-1} & s = S_{max} \end{cases} \quad (10)$$

(4.iii) Atualizar a probabilidade:

$$P_j = P_j + \dot{P}_j dt \quad (11)$$

onde dt é o tempo derivativo.

(4.iv) Usar as taxas de emigração e imigração para modificar cada habitat e probabilisticamente mutacionar os indivíduos.

(4.v) Avaliar os habitats para ter certeza de que as restrições estão satisfeitas.

(4. vi) Calcular o custo de cada habitat e penalizar aqueles que não satisfazem as restrições. Retornar ao começo do laço de repetição até que um critério de parada seja satisfeito.

Deve-se mencionar, que recentemente, vários artigos têm sido publicados na literatura com melhoramentos no algoritmo de otimização baseado em biogeografia, tais como Kundra *et al.* (2009), Rarick *et al.* (2009) e Simon *et al.* (2009).

4. ABORDAGEM BASEADA EM OPOSIÇÃO

Em geral, métodos evolutivos de otimização começam com algumas soluções iniciais e tentam melhorar o desempenho na direção de algumas soluções. Obviamente o tempo da procura é relativo a distância da solução do método ao ótimo global. Pode-se aumentar a chance de se iniciar perto de uma boa solução se forem checadadas as soluções opostas àquelas criadas aleatoriamente (Rahnamayan, 2007).

O conceito de oposição pode ser definido como: dado um número $x \in [a, b]$ o número oposto \tilde{x} é definido por:

$$\tilde{x} = a + b - x \quad (12)$$

A partir disto um ponto $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$, para $x_i \in [a_i, b_i] \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$ tem seu oposto definido por:

$$\tilde{P}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n) \quad (13)$$

Este conceito tem sido aplicado em diversos métodos de otimização como evolução diferencial e otimização por colônia de formigas (Rahnamayan, 2008). Neste artigo o conceito de oposição é aplicado em duas fases do algoritmo: na geração das populações iniciais e na avaliação das soluções. A primeira etapa é descrita pelos dois passos a seguir:

- (1) Gerar um conjunto de soluções aleatórias e suas respectivas soluções opostas;
- (2) Selecionar, dentre todas as soluções criadas, apenas as melhores como população inicial.

A segunda etapa é descrita pelos seguintes passos:

- (1) Gerar a partir das soluções atuais um conjunto de soluções opostas;
- (2) Selecionar as melhores como população atual.

Esta abordagem híbrida com oposição é chamada de BBO-Oposicional.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Foram feitas 50 simulações, com auxílio do *software* MatLab®, para cada um dos métodos. Para medir a diversidade de cada população de soluções é utilizada a Eq. (14) dada por

$$d = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \sqrt{\sum_{j=1}^N (P_{ij} - \overline{P_j})^2} \quad (14)$$

onde d é a diversidade, p é a quantidade de habitats, N é a quantidade de geradores e $\overline{P_j}$ é a média dos geradores da posição j .

Os parâmetros do problema foram ajustados em $E = I = 1$ taxas de imigração e emigração máximas, máxima mutação $m_{\max} = 0,07$ e número de habitats $P = 50$. A demanda de potência do problema é $P_d = 10500$ MW. Os dados para o problema estão na Tabela 1 (Sinha, 2003). Na Tabela 2 são apresentados os resultados da otimização.

Tabela 1. Dados do problema com 40 geradores.

Gera- dor	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	A	B	C	E	F	Gera- dor	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	A	B	C	E	F
1	36	114	0,0069	6,73	94,71	100	0,084	21	254	550	0,003	6,63	785,96	300	0,035
2	36	114	0,0069	6,73	94,71	100	0,084	22	254	550	0,003	6,63	785,96	300	0,035
3	60	120	0,0203	7,07	309,54	100	0,084	23	254	550	0,0028	6,66	794,53	300	0,035
4	80	190	0,0094	8,18	369,03	150	0,063	24	254	550	0,0028	6,66	794,53	300	0,035
5	47	97	0,0114	5,35	148,89	120	0,077	25	254	550	0,0028	7,10	801,32	300	0,035
6	68	140	0,0114	8,05	222,33	100	0,084	26	254	550	0,0028	7,10	801,32	300	0,035
7	110	300	0,0036	8,03	287,71	200	0,042	27	10	150	0,5212	3,33	1055,10	120	0,077
8	135	300	0,0049	6,99	391,98	200	0,042	28	10	150	0,5212	3,33	1055,10	120	0,077
9	135	300	0,0057	6,60	455,76	200	0,042	29	10	150	0,5212	3,33	1055,10	120	0,077
10	130	300	0,0061	12,90	722,82	200	0,042	30	47	97	0,0114	5,35	148,89	120	0,077
11	94	375	0,0052	12,90	635,20	200	0,042	31	60	190	0,0016	6,43	222,92	150	0,063
12	94	375	0,0057	12,80	654,69	200	0,042	32	60	190	0,0016	6,43	222,92	150	0,063
13	125	500	0,0042	12,50	913,40	300	0,035	33	60	190	0,0016	6,43	222,92	150	0,063
14	125	500	0,0075	8,84	1760,40	300	0,035	34	90	200	0,0001	8,95	107,87	200	0,042
15	125	500	0,0071	9,15	1728,30	300	0,035	35	90	200	0,0001	8,62	116,58	200	0,042
16	125	500	0,0071	9,15	1728,30	300	0,035	36	90	200	0,0001	8,62	116,58	200	0,042
17	220	500	0,0031	7,97	647,85	300	0,035	37	25	110	0,0161	5,88	307,45	80	0,098
18	220	500	0,0031	7,95	649,69	300	0,035	38	25	110	0,0161	5,88	307,45	80	0,098
19	242	550	0,0031	7,97	647,83	300	0,035	39	25	110	0,0161	5,88	307,45	80	0,098
20	242	550	0,0031	7,97	647,81	300	0,035	40	242	550	0,0031	7,97	647,83	300	0,035

Tabela 2. Resultados de otimização das abordagens de BBO.

Método	Menor custo (US\$)	Custo Médio (US\$)	Máximo Custo (US\$)	Desvio Padrão (US\$)
BBO	122781,7985	123786,7787	125630,3086	612,4010
BBO-Oposicional	123535,0701	124395,6747	125001,3741	327,1826

É possível perceber que com a abordagem de oposição os resultados não superaram os do método original, porém a diversidade média das populações em todas as simulações foi superior, conforme mostrado na Figura 2.

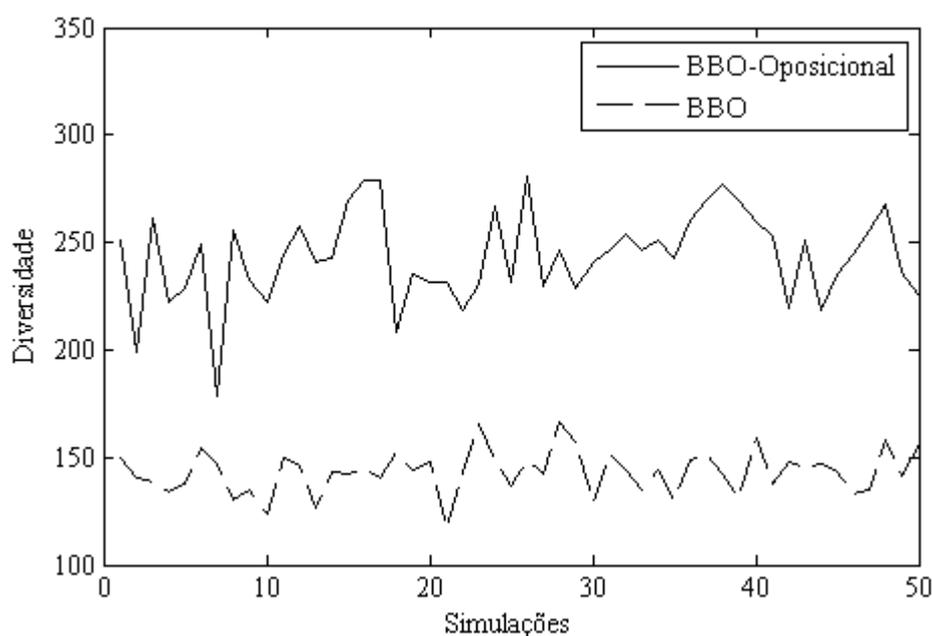


Figura 2. Diversidade média das simulações.

A Figura 3 mostra o desempenho da convergência das melhores simulações de ambos métodos.

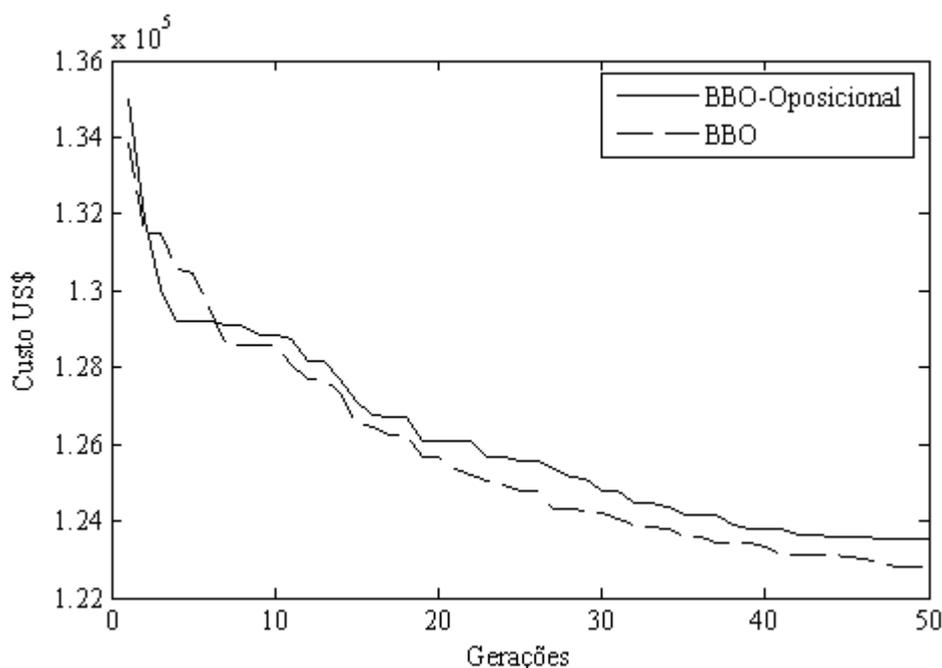


Figura 3. Convergência dos dois métodos de otimização avaliados.

6. CONCLUSÃO

As duas abordagens apresentadas mostraram-se eficientes em resolver o problema proposto, já que os melhores resultados encontrados são próximos aos presentes na literatura, como em Sinha (2003). O melhor resultado obtido foi de 122781,7985 US\$ para 50 iterações em cada simulação, enquanto em Sinha (2003), para o mesmo problema, foi de 122624,35 US\$ para 1000 iterações do algoritmo Programação Evolutiva Rápida Melhorada (em inglês *Improved Fast Evolutionary Programming*, IFEP). Isto mostra a eficiência dos métodos propostos em lidar com problemas de despacho econômico de energia elétrica. Futuramente estas abordagens serão utilizadas na resolução de problemas de despacho econômico com múltiplos objetivos.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (processos: 568221/2008-7, 474408/2008-6, 302786/2008-2-PQ e 303963/2009-3/PQ) e a Fundação Araucária (projeto: 15149/2009).

8. REFERÊNCIAS

- Bhattacharya, A. e Chattopadhyay, P.K., 2010, “Solving complex economic load dispatch problems using biogeography-based optimization”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No. 5, pp. 3605-3615.
- Chiang, C.L., 2005, “Improved Genetic Algorithm for Power Economic Dispatch of Units with Valve-Point Effects and Multiple Fuels”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 4, pp. 1690-1699.
- Gonçalves, R.A., 2010, “Algoritmos culturais para o problema de despacho de energia”, Tese de doutorado, CPGEI/UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.
- Granelli, G. P. e Montagna, M. 2000, “Security-constrained economic dispatch using dual quadratic programming”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 56, No. 1, pp. 71-80.
- Jeyakumar, D.N., Jayabarathi, T. e Raghunathan, T., 2006, “Particle swarm optimization for various types of economic dispatch problems”, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 28, No. 1, pp. 36-42.
- Kundra, H., Kaur, A. e Pancha, V., 2009, “An integrated approach to biogeography based optimization with case based reasoning for retrieving groundwater possibility”, *Proceedings of 8th Annual Asian Conference and Exhibition on Geospatial Information, Technology and Applications*, Singapore.
- Lin, W.M. e Chen, S.J. 2002, “Bid-based dynamic economic dispatch with an efficient interior point algorithm”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 24, No. 1, pp. 51-57.
- Rahnamayan, S., Tizhoosh, H.R. e Salama, M.M.A., 2008, “Opposition versus randomness in soft computing techniques”, *Applied Soft Computing*, Vol. 8, No. 2, pp. 906-918.

- Rarick, R., Simon, D., Villaseca, E. e Vyakaranam, B., 2009, "Biogeography-based optimization and the solution of the power flow problem", Proceedings of IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Antonio, TX, USA, pp. 1029-1034.
- Simon, D., 2008, "Biogeography-based optimization", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 12, No. 6, pp. 702-713.
- Simon, D., Ergezer, M. e Du, D., 2009, "Population distributions in biogeography-based optimization algorithms with elitism", Proceedings of IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Antonio, TX, USA, pp. 1017-1022.
- Sinha, N., Chakrabarti, R. e Chattopadhyay, P.K., 2003, "Evolutionary programming techniques for economic load dispatch", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 7, No. 1, pp. 83-94.

OPTIMIZATION OF ECONOMIC LOAD DISPATCH USING BIOGEOGRAPHY-BASED OPTIMIZATION ALGORITHM

Marsil de Athayde Costa e Silva, marsil@ymail.com¹
Viviana Cocco Mariani, viviana.mariani@pucpr.br²
Leandro dos Santos Coelho, leandro.coelho@pucpr.br³

¹ Undergraduate course in Mechatronics Engineering

² Mechanical Engineering Graduate Program, PUCPR / PPGEM

³ Industrial and Systems Engineering Graduate Program, PUCPR / PPGEPS

Pontifical Catholic University of Parana, Imaculada Conceição, 1155, Zip code 80215-901, Curitiba, Parana, Brazil

Abstract: *The objective of the economic load dispatch problem using thermal generation units, wherein the characteristics are complex and highly non-linear, is to scale the output of the generation units in order to find the load demand required at a minimum cost of operation while satisfying the equalities and the inequalities constraints imposed by the optimization problem to be solved. Recently, as an alternative for the conventional mathematical approaches, the evolutionary algorithms have attracted attention of researchers due the ability of obtain good solutions to the economic load dispatch problem. In this paper, an optimization approach based on biogeography and oppositional technique is validated. Biogeography is the study of the geographical distribution of the biological organisms. The optimization approach based on biogeography is validated for a test system with 40 thermal generators. The simulation results of this work are compared with the studies related in literature. Note that for the studied case, the results obtained in this work, with the approach based on biogeography, are comparatively better than the results presented in recent studies in literature.*

Keywords: *economic load dispatch, evolutionary algorithm, optimization, biogeography.*