

ABORDAGEM DE BIOGEOGRAFIA USANDO MÉTODO DE ARRANJOS ORTOGONAIS TAGUCHI APLICADA À OTIMIZAÇÃO DE DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA

Marsil A. C. Silva^a, Viviana C. Mariani^b, Leandro S. Coelho^c

^a *Graduação em Engenharia Mecatrônica (Controle e Automação), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Rua Imaculada Conceição 1155, 80215-901 Curitiba, PR, Brasil, marsil@ymail.com.*

^b *Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica (PPGEM), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Rua Imaculada Conceição 1155, 80215-901 Curitiba, PR, Brasil, viviana.mariani@pupr.br.*

^c *Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Rua Imaculada Conceição 1155, 80215-901 Curitiba, PR, Brasil, leandro.coelho@pupr.br.*

Keywords: Economic dispatch, Optimization methods, Biogeography based-optimization, Taguchi method.

Abstract. The objective of the economic dispatch problem (EDP) of electric power generation using thermal generation units, whose characteristics are complex and highly nonlinear, is to schedule the committed generating unit outputs so as to meet the required load demand at minimum operating cost while satisfying all unit and system equality and inequality constraints of economic dispatch optimization problem. Recently, as an alternative to the conventional mathematical approaches, evolutionary algorithms have been given much attention by many researchers due to their ability to find good solutions in EDPs. In this paper, a biogeography based-optimization approach is validated. Biogeography is the study of the geographical distribution of biological organisms. The biogeography based-optimization methodology combined with Taguchi array orthogonal method is validated for a test system consisting of 38 thermal generators. Simulation results are compared with those of other studies reported in the literature. Note that in studied case, the result reported here using biogeography based-optimization approach using Taguchi array orthogonal method is comparatively better than recent studies presented in the literature.

1 INTRODUÇÃO

O problema de despacho econômico da geração de energia elétrica é determinar uma combinação ótima das saídas das unidades de geração convenientes que minimize o custo da geração suprindo a demanda de carga consumidora e satisfazendo as restrições inerentes às unidades geradoras utilizadas e restrições de igualdade e desigualdade impostas pelo problema. Quando o problema de despacho econômico trata de um intervalo de tempo simples, ele é referido como um problema de despacho econômico estático, enquanto o problema de despacho econômico dinâmico considera um número finito de intervalos de despacho acoplados com a previsão de carga para providenciar uma trajetória de geração “ótima” seguindo uma demanda variável de carga (Chowdhury e Rahaman, 1990).

Muitos dos problemas de otimização em sistemas de potência, incluindo os de despacho econômico, possuem características complexas e não-lineares com a presença, muitas vezes, de restrições de igualdade e desigualdade. Desde que o problema de despacho econômico foi introduzido, diversos métodos têm sido utilizados para resolver este problema, tais como método iterativo lambda (λ), técnicas baseadas em gradiente, método dos pontos interiores, programação linear e programação dinâmica (Lin e Chen, 2002; Granelli e Montagna, 2000). Entretanto, muitas das abordagens convencionais usadas em problemas de despacho econômico podem não estarem aptas a providenciar uma solução ótima e, muitas vezes, a solução fica presa em armadilhas de mínimos locais.

A contribuição deste artigo é descrever e avaliar uma metodologia de otimização baseada em biogeografia para resolução do problema de despacho econômico de carga. Biogeografia é a ciência que estuda a origem, distribuição geográfica e adaptação de organismos biológicos. 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). Neste contexto, a biogeografia está relacionada a estudos em macro-escala espacial, no qual a dispersão, área de distribuição, especiação e extinção das espécies assumem um papel crucial.

Inspirado por tal fundamentação, Simon (2008) propôs uma metaheurística baseada em biogeografia para a resolução de problemas de otimização. Neste artigo, o algoritmo de otimização proposto por Simon (2008) baseado em biogeografia é validado em um estudo de caso de despacho econômico de energia elétrica abrangendo 38 unidades térmicas descrito em Sydulu (1999).

Este trabalho propõe a utilização de uma técnica de delineamento de experimentos denominada método de arranjos ortogonais Taguchi (Ross, 1989; Taguchi e Clausing, 1990; Taguchi et al., 2000), este é um método usual em engenharia de qualidade, com o propósito de gerar uma população inicial da otimização baseada em biogeografia.

Um projeto de experimentos baseado em método Taguchi consiste de uma sequência de experimentos em que são feitas alterações simultâneas em diversas variáveis segundo um arranjo ortogonal, possibilitando com relativamente poucos experimentos medir com precisão o efeito de várias variáveis. Este tipo de abordagem tem sido adotada no projeto de metaheurísticas de otimização, tais como algoritmos genéticos (Tsai et al., 2004; Lin e Hsieh, 2009), sistemas imunológicos artificiais (Yildiz, 2009) e enxame de partículas (Ko et al., 2007). Este método tem recentemente se mostrado eficiente na resolução de problemas tais como o de despacho econômico, em Subbaraj (2010), por exemplo, é utilizado junto com um algoritmo genético para resolver três problemas de despacho econômico.

Os resultados de otimização obtidos são analisados e comparados com outros apresentados na literatura recente, que ressaltam a eficiência da abordagem de otimização baseada em biogeografia avaliada neste artigo.

O restante do artigo está organizado da seguinte maneira. Uma breve fundamentação do problema de despacho econômico é apresentada na seção 2. Os conceitos básicos e o fluxo de dados do algoritmo de otimização baseado em biogeografia e a combinação com o método Taguchi são descritos nas seções 3 e 4. Nas seções 5 e 6 são apresentados, respectivamente, os resultados de simulação e a conclusão.

2 DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA

O tipo de problema de despacho econômico, abordado neste artigo, pode ser descrito matematicamente com uma função objetivo e duas restrições. As restrições representadas pelas equações (1) e (2) devem ser satisfeitas.

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

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

A equação (1) representa as restrições de igualdade do balanço de potência (isto é, balanço entre suprimento e demanda), enquanto a expressão (2) representa as restrições de desigualdade relativas aos limites da capacidade de geração de potência de cada unidade geradora, onde P_i é a saída para a unidade geradora i (em MW); n é o número de geradores presentes no sistema; P_D é a demanda de carga total (em MW); P_L são as perdas nas linhas de transmissão (em MW) e P_i^{\min} e P_i^{\max} são, respectivamente, as saídas de operação mínima e máxima da i -ésima unidade geradora (em MW). No exemplo abordado, neste artigo, são desconsideradas as perdas nas linhas transmissão P_L , portanto, neste caso $P_L = 0$. O custo total de combustível deve ser minimizado conforme representado pela equação (3), tal que

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

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

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

onde a_i , b_i e c_i são restrições das características do gerador.

3 OTIMIZAÇÃO BASEADA EM BIOGEOGRAFIA

Pode-se dizer que a biogeografia estuda os padrões de relações entre as áreas e os processos relacionados a esses padrões – evolução, vicariância, dispersão, ou ainda extinções e falhas na vicariância. Vicariância ou efeito vicariante é o mecanismo evolutivo no qual ocorre uma fragmentação de uma área biótica, separando populações de determinadas espécies.

O estudo das distribuições geográficas pode ser dividido em biogeografia histórica (deriva dos continentes) e biogeografia ecológica (vinculada às interações intra-específicas ou distribuição de espécies e habitats).

A biogeografia, apenas com os trabalhos de Wallace (1876) e Darwin (1859), adquiriu uma causalidade lógica e consistente, constituindo, por seu lado, uma das mais sólidas bases daquela teoria evolucionista.

Os modelos matemáticos da biogeografia descrevem como as espécies migram de um

habitat para outro, como novas espécies surgem e como espécies se extinguem. O termo “ilha” é usado no sentido descritivo e não literal, isto é, uma ilha é um habitat geograficamente isolado dos outros habitats, portanto empregou-se nesta publicação o termo mais genérico “habitat” (em vez de “ilha”). As áreas geográficas que são residências bem adequadas para as espécies são ditas por terem um alto índice de adequação de habitat (HSI) (Simon, 2008).

Os aspectos que se relacionam com o HSI incluem fatores como chuva, diversidade da vegetação, diversidade de aspectos topográficos, solo e temperatura. As variáveis que caracterizam a habitabilidade são chamadas variáveis índice de adequação (SIVs). SIVs podem ser consideradas como as variáveis independentes do habitat, e HSI a variável dependente.

Habitats com um alto HSI tendem a ter uma grande quantidade de espécies, enquanto aqueles com um baixo HSI tem uma quantidade pequena de espécies. Habitats com um alto HSI possuem muitas espécies que emigram para habitats próximos, simplesmente em virtude do grande número de espécies que eles acolhem. Habitats com um alto HSI possuem uma baixa taxa de imigração, pois já estão quase saturados de espécies. Portanto habitats com alto HSI são mais estáticos na sua distribuição de espécies do que habitats com baixo HSI. Da mesma forma, habitats com alto HSI têm uma grande taxa de emigração. O grande número de espécies nesses habitats tem muitas oportunidades para emigrar para habitats vizinhos.

Habitats com um baixo HSI têm uma alta taxa de imigração por causa da sua população escassa. Esta imigração de novas espécies para habitats com baixo HSI pode elevar o HSI do habitat, pois a adequação de um habitat é proporcional a sua diversidade biológica. Contudo se o HSI de um habitat permanece baixo, então as espécies que residem nesse habitat tenderão a se extinguir, o que, além disso, abre o caminho para imigrações adicionais. Por causa disso, os habitats com baixo HSI são mais dinâmicos do que os com alto HSI.

A figura 1 ilustra um modelo de abundância de espécies em um único habitat (MacArthur e Wilson, 1967). A taxa de imigração λ e emigração μ são funções do número de espécies no habitat. Considere a curva de imigração. A taxa máxima de imigração para o habitat é I , que ocorre quando há zero espécie no habitat. Quando o número de espécies aumenta, o habitat torna-se mais lotado, menos espécies são aptas a sobreviver imigrando para o habitat, então a taxa de imigração diminui. O maior número possível de espécies que o habitat suporta é S_{max} , neste ponto a taxa de imigração é zero (Simon, 2008).

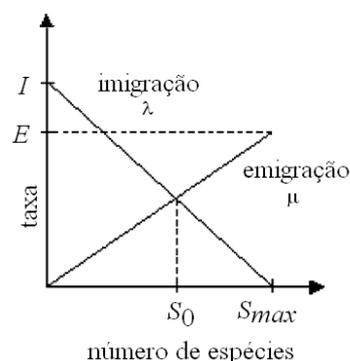


Figura 1: Modelo de espécies (MacArthur e Wilson, 1967).

Biogeografia é o modo natural de distribuir espécies, e é análogo às soluções de problemas comuns. Esta inspiração na biogeografia que levou ao desenvolvimento do algoritmo de otimização baseado em biogeografia (em inglês *Biogeography-based optimization* – BBO)

proposto em Simon (2008). As etapas do algoritmo clássico podem ser resumidas nas seguintes (Simon, 2008):

(i) Gerar a probabilidade para cada valor do número de espécies:

$$Pr_j = \frac{1}{S_{\max}} \quad (5)$$

onde $j = 1, \dots, S_{\max}$ e Pr_j é um vetor contendo as probabilidades e S_{\max} é o número máximo de espécies em cada habitat.

(ii) Gerar populações iniciais aleatoriamente, tal que:

$$P_i^j = P_i^{\min} + (P_i^{\max} - P_i^{\min}) \cdot r \quad (6)$$

onde P_i^j é o valor da potência no gerador i da população j , P_i^{\min} é o valor mínimo da potência do gerador i , P_i^{\max} é o valor máximo da potência do gerador i e r é um número gerado aleatoriamente com distribuição uniforme no intervalo $[0,1]$.

(iii) Avaliar o valor da função objetivo para cada população.

(iv) Início do laço de repetição do algoritmo:

Etapa 1: Gerar as taxas de imigração e emigração,

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

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

onde $j = 1, \dots, S_{\max}$, λ_j é a taxa de imigração para a quantidade de espécies j , μ_j é a taxa de emigração, I é a taxa máxima de imigração e E é a taxa máxima de emigração.

Etapa 2: Calcular a derivada da probabilidade:

$$\begin{cases} \dot{Pr}_S = -(\lambda_S + \mu_S)Pr_S + \mu_{S+1}Pr_{S+1} & S = 0 \\ \dot{Pr}_S = -(\lambda_S + \mu_S)Pr_S + \lambda_{S-1}Pr_{S-1} + \mu_{S+1}Pr_{S+1} & 1 \leq S \leq S_{\max} \\ \dot{Pr}_S = -(\lambda_S + \mu_S)Pr_S + \lambda_{S-1}Pr_{S-1} & S = S_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

Etapa 3: Calcular a nova probabilidade:

$$\begin{cases} Pr_j = Pr_j + \dot{Pr}_j \\ Pr_j = \frac{Pr_j}{\sum_{i=1}^{S_{\max}} Pr_i} \end{cases} \quad (10)$$

Etapa 4: Modificar algum habitat: Selecionar uma população aleatoriamente e então aplicar aleatoriamente o fator de mutação para cada espécie:

$$m_s = m_{\max} \left(1 - \frac{Pr_s}{Pr_{\max}} \right) \quad (11)$$

onde m_s é o fator de mutação para a população com S espécies, m_{\max} o fator de mutação máximo, Pr_s a probabilidade da população e Pr_{\max} a probabilidade máxima.

Etapa 5: Depois de realizada a mutação é necessário avaliar se cada população é válida (factível), se não existem potências além dos limites, superior e inferior, do gerador.

Etapa 6: Calcular então os custos de cada população e penalizar as populações no caso de a demanda de potência não ser atendida. Retornar para o início do laço de repetição (iv).

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 MÉTODO DE ARRANJOS ORTOGONAIS DE TAGUCHI

Quando se trata de otimizar os parâmetros de um problema com uma função objetivo, o método Taguchi pode ser aplicado, pois pode rapidamente encontrar uma solução adequada. Como o objetivo do problema de despacho econômico de energia elétrica é minimizar o custo da geração, este método torna-se apropriado para resolvê-lo. O método Taguchi envolve uma rotina de variar dois ou mais fatores (variáveis controladas) simultaneamente. Um subconjunto de todas as combinações possíveis é analisado a fim de encontrar a direção na qual a função objetivo decresce (Liu, 2005).

No problema de despacho econômico de energia elétrica as saídas dos geradores são os fatores do método. Inicialmente selecionam-se aleatoriamente três níveis, em ordem crescente, que podem ser assumidos pelos fatores. Estes níveis são posicionados em uma matriz ortogonal de forma em que as linhas representem cada nível de cada unidade geradora. Por exemplo, em uma estação de quatro unidades os níveis poderiam ser dispostos, conforme apresentado na tabela 1.

P_1	P_2	P_3	P_4
1	1	1	1
1	2	2	2
1	3	3	3
2	1	2	3
2	2	3	1
2	3	1	2
3	1	3	2
3	2	1	3
3	3	2	1

Tabela 1: Exemplo de matriz ortogonal.

Para cada linha (teste) i da tabela é medido o custo J_i da geração utilizando-se os respectivos níveis de cada unidade. Após completar todos os testes seguindo a ordem da tabela calcula-se a contribuição total de cada nível. Para o exemplo com quatro unidades, a contribuição do nível 3 seria:

$$\begin{aligned}
 V_3^{(1)} &= J_1 + J_6 + J_8 \\
 V_3^{(2)} &= J_2 + J_4 + J_9 \\
 V_3^{(3)} &= J_3 + J_5 + J_7
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

onde $V_k^{(j)}$ é a contribuição de nível j do gerador k . Com isso pode-se avaliar a tendência da função objetivo com relação a cada unidade e decidir aumentar ou diminuir a potência gerada individualmente. O algoritmo a seguir mostra os passos básicos do método Taguchi.

(i) Iniciar o método Taguchi usando a matriz ortogonal $L_M(q^n)$, onde M é a quantidade de testes, n é o número de fatores e q é o número de níveis.

(ii) Determinar o ponto de referência para criar os fatores de acordo com os limites de cada gerador:

$$P_{ref} = \frac{(P_{max} + P_{min})}{2} \tag{13}$$

(iii) Iniciar os testes de $i = 1, \dots, M$ usando a matriz ortogonal para gerar os fatores.

(vi) Enquanto algum critério de parada não for satisfeito avaliar a tendência da função objetivo de acordo com os fatores e retornar ao passo 3.

(v) Se algum critério de parada for satisfeito retornar os melhores fatores.

Neste trabalho a solução encontrada pelo método Taguchi é utilizada como população inicial da otimização baseada em biogeografia.

4.1 BBO Taguchi para problemas de despacho econômico

O método de arranjos ortogonais Taguchi é utilizado para gerar a população inicial utilizada pelo BBO, dessa forma obtém-se um ponto de partida vantajado para o algoritmo, já que o método Taguchi irá retornar as melhores soluções encontradas.

Os habitats do BBO são as soluções para o problema, no caso de despacho é uma combinação das saídas das unidades geradoras que satisfaça as restrições de igualdade e desigualdade do problema dadas pelas equações (1) e (2). A função de avaliação das soluções, que indica se uma solução é boa ou ruim, é o próprio custo de geração, equação (5). Sendo assim o problema consiste em encontrar uma combinação das saídas das unidades geradoras que minimize a função objetivo.

Como critério de parada é utilizada apenas a quantidade de iterações de cada procedimento. No caso do BBO é o número de gerações e no caso do Taguchi é o número de iterações realizadas. Note-se que o número de iterações do método Taguchi aumenta apenas o tempo de início do algoritmo, e não o tempo de cada geração, pois após a geração da população inicial não é mais utilizado.

5 RESULTADOS DE OTIMIZAÇÃO

O problema de despacho econômico estudado neste trabalho consiste de 38 unidades geradoras e está descrito em Sydulu (1999). Neste caso a demanda de potência a ser suprida pelas unidades geradoras é $P_D = 6000 MW$. Os dados do sistema são também apresentados na tabela 2. Os parâmetros de configuração usados no algoritmo de otimização baseado em biogeografia (BBO) foram: taxa máxima de emigração para o $E = 1$, taxa máxima de imigração para o habitat $I = 1$, população de 50 habitats, probabilidade de mutação

$m_{\max} = 0,07$. O número máximo de gerações escolhido foi de 50 para o BBO e 10 iterações para o método Taguchi.

Na tabela 3 são apresentados os resultados de simulação obtidos para o estudo de caso. Na tabelas 4 e 5 são apresentados os melhores resultados do BBO sem e com o uso do método Taguchi, respectivamente. Pelas tabelas 3 a 5, nota-se que o melhor resultado foi obtido pelo método BBO combinado com método Taguchi que obteve função custo de 9429145,663 \$/h e satisfazendo a restrição de igualdade de $P_D = 6000$ MW.

Gerador	a_i (\$/h)	b_i (\$/MWh)	c_i (\$/MWh ²)	P_i^{\min} (MW)	P_i^{\max} (MW)
1	64782	796,9	0,3133	220	550
2	64782	796,9	0,3133	220	550
3	64670	795,5	0,3127	200	500
4	64670	795,5	0,3127	200	500
5	64670	795,5	0,3127	200	500
6	64670	795,5	0,3127	200	500
7	64670	795,5	0,3127	200	500
8	64670	795,5	0,3127	200	500
9	172832	915,7	0,7075	114	500
10	172832	915,7	0,7075	114	500
11	176003	884,2	0,7515	114	500
12	173028	884,2	0,7083	114	500
13	91340	1250,1	0,4211	110	500
14	63440	1298,6	0,5145	90	365
15	65468	1298,6	0,5691	82	365
16	77282	1290,8	0,5691	120	325
17	190928	238,1	25,881	65	315
18	285372	1149,5	38,734	65	315
19	271676	1269,1	36,842	65	315
20	39197	696,1	0,4921	120	272
21	45576	660,2	0,5728	120	272
22	28770	803,2	0,3572	110	260
23	36902	818,2	0,9415	80	190
24	105510	33,5	52,123	10	150
25	22233	805,4	11,421	60	125
26	30953	707,1	20,275	55	110
27	17044	833,6	30,744	35	75
28	81079	2188,7	16,765	20	70
29	124767	1024,4	26,355	20	70
30	121915	837,1	30,575	20	70
31	120780	1305,2	25,098	20	70
32	104441	716,6	33,722	20	60
33	83224	1633,9	23,915	25	60
34	111281	969,6	32,562	18	60
35	64142	2625,8	18,362	8	60
36	103519	1633,9	23,915	25	60
37	13547	694,7	0,8482	20	38
38	13518	655,9	0,9693	20	38

Tabela 2: Dados do sistema com 38 geradores.

Técnica	Custo mínimo (\$/h)	Custo médio (\$/h)	Desvio padrão do custo (\$/h)	Custo máximo (\$/h)
BBO	9441803,173	9474371,688	18353,292	9523237,250
BBO Taguchi	9429145,663	9439714,905	76032,727	9457014,591

Tabela 3: Resultados de convergência do BBO para o caso com 38 unidades geradoras.

Potência	Geração (MW)	Potência	Geração (MW)
P_1	461,48429	P_{20}	256,04151
P_2	386,78892	P_{21}	261,99134
P_3	397,97991	P_{22}	240,36703
P_4	398,85359	P_{23}	150,56859
P_5	385,08506	P_{24}	11,717651
P_6	351,46397	P_{25}	96,304012
P_7	442,45105	P_{26}	92,786336
P_8	451,11059	P_{27}	40,68858
P_9	162,35092	P_{28}	20,0119
P_{10}	144,108	P_{29}	20,082712
P_{11}	148,88677	P_{30}	20,351092
P_{12}	179,25946	P_{31}	20,015089
P_{13}	110,06545	P_{32}	20,002126
P_{14}	90,053548	P_{33}	25,002658
P_{15}	106,07577	P_{34}	18,145732
P_{16}	120,0714	P_{35}	8,0009802
P_{17}	160,19522	P_{36}	25,002658
P_{18}	65,125875	P_{37}	24,14335
P_{19}	65,205491	P_{38}	22,161383

Tabela 4: Melhor resultado (50 experimentos) para o estudo de caso obtido usando BBO (sem o método Taguchi).

Potência	Geração (MW)	Potência	Geração (MW)
P_1	306,23581	P_{20}	269,2184
P_2	462,13627	P_{21}	267,16557
P_3	393,92125	P_{22}	259,07344
P_4	447,06709	P_{23}	148,20699
P_5	375,71173	P_{24}	12,290251
P_6	448,94471	P_{25}	111,07156
P_7	443,84451	P_{26}	89,840283
P_8	439,66236	P_{27}	41,6853
P_9	131,16532	P_{28}	20
P_{10}	135,50847	P_{29}	20
P_{11}	164,06763	P_{30}	20
P_{12}	141,69906	P_{31}	20
P_{13}	110,51506	P_{32}	20,020632
P_{14}	90	P_{33}	25
P_{15}	82	P_{34}	18
P_{16}	120,69711	P_{35}	8,0385256
P_{17}	160,11103	P_{36}	25,164322
P_{18}	65	P_{37}	22,184084
P_{19}	65	P_{38}	20,17024

Tabela 5: Melhor resultado (50 experimentos) para o estudo de caso obtido usando BBO combinado com o método Taguchi.

A figura 2 mostra um comparativo da convergência (valores médios da melhor solução para 50 simulações) da otimização usando BBO sem e com a adoção do método Taguchi. Pode-se notar que o ponto inicial do BBO-Taguchi é melhor (menor com relação aos valores de função objetivo) do que o ponto inicial sem a inclusão do método Taguchi.

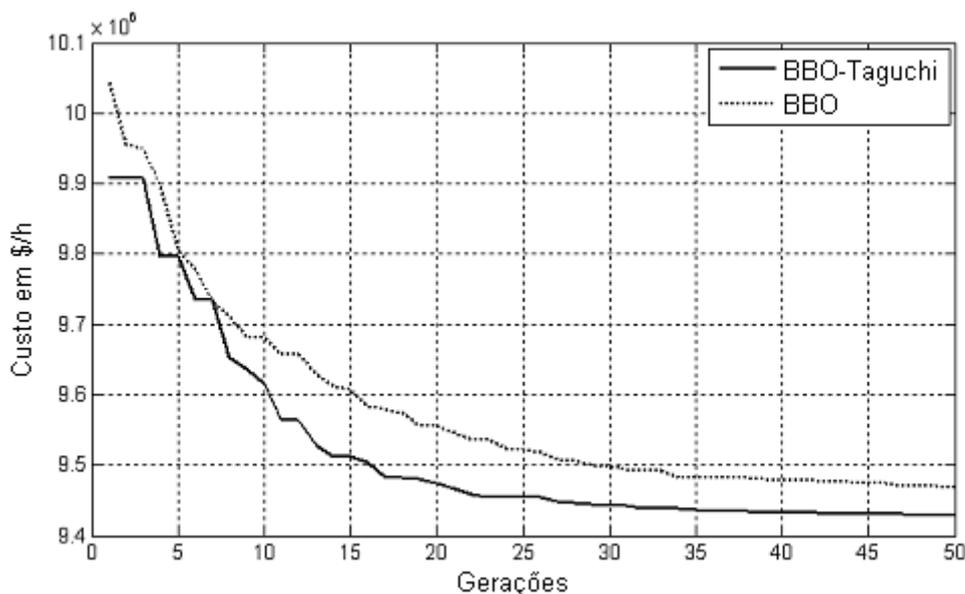


Figura 2: Otimização usando BBO clássico (sem o método Taguchi) e BBO com o método Taguchi.

6 CONCLUSÃO E FUTURA PESQUISA

A biogeografia é o estudo das distribuições geográficas dos organismos e pode ser útil no projeto de algoritmos de otimização, como, por exemplo, o proposto em Simon (2008).

Neste artigo, foi validada uma abordagem de otimização inspirada em biogeografia para resolução de um problema de despacho econômico de energia elétrica. O melhor resultado obtido neste artigo foi utilizando o algoritmo BBO combinado com método Taguchi com função custo de 9429145,663\$/h. Este resultado foi superior aos apresentados em Chaturvedi et al. (2009) usando um algoritmo de nuvem de partículas com coeficientes de aceleração variantes no tempo, onde o melhor resultado em termos do valor da função objetivo foi 9500448,307 \$/h para o estudo de caso de despacho econômico com 38 unidades geradoras.

Pesquisa futura deve ser realizada para complementar esta pesquisa. Como por exemplo, a utilização do BBO para problemas dinâmicos e/ou com a presença de múltiplos objetivos de despacho econômico de energia elétrica e engenharia de confiabilidade. Também pode-se incluir o método Taguchi como um método de busca local visando a melhoria dos resultados de otimização.

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, 303963/2009-3/PQ e 478158/2009-3) e Fundação Araucária (Programa de Apoio à Pesquisa Básica e Aplicada 14/2008, Convênio 416/09, Protocolo 15149). Além disso, o primeiro autor agradece a PUCPR e ao CNPq pela bolsa de iniciação científica concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chaturvedi, K. T., Pandit, M. e Srivastava, L. (2009). Particle swarm optimization with time varying acceleration coefficients for non-convex economic power dispatch, *Electrical*

- Power and Energy Systems*, vol. 31, no. 6, pp. 249-257, 2009.
- Chowdhury, B. H. e Rahman, S. M. (1990). A review of recent advances in economic dispatch, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 1248-1259.
- Darwin, C. (1859). *The origin of species*, Gramercy.
- 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.
- Jin, C. -J. e Hsieh, M. -H. (2009). An efficient hybrid Taguchi-genetic algorithm for protein folding simulation, *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 10, pp. 12446-12453.
- Ko, C. -N., Chang, Y. -P. e Wu, C. -J. (2007). An orthogonal-array-based particle swarm optimizer with nonlinear time-varying evolution, *Applied Mathematics and Computation*, vol. 191, no. 1, pp. 272-279.
- 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.
- Liu, D. e Cai, Y. (2005). Taguchi method for solving the economic dispatch Problem with nonsmooth cost functions, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 2006-2014.
- MacArthur, R. e Wilson, E. (1967). *The theory of biogeography*, Princeton University Press.
- 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.
- Ross, P. J. (1989). *Taguchi techniques for quality engineering*, New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- 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.
- Subbaraj, P., Rengaraj, R. e Salivahanan, S. (2010). Enhancement of Self-adaptive real-coded genetic algorithm using Taguchi method for Economic dispatch problem, *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 1, pp. 83-92.
- Sydulu, M. (1999). A very fast and effective non-iterative “ λ -logic based” algorithm for economic dispatch of thermal units, *Proceedings of IEEE Region 10 Conference TENCN*, Inchon, South Korea, vol. 2, pp. 1434-1437.
- Taguchi, G. e Clausing, D. (1990). Robust quality, *Harvard Business Review*, Jan.-Feb.
- Taguchi, G., Taguchi, S. e Chowdhury, S. (2000). *Taguchi, robust engineering*. New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- Tsai, J. T., Liu, T. K. e Chou, J. H. (2004). Hybrid Taguchi-genetic algorithm for global numerical optimization, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 4, pp. 365-377.
- Wallace, A. (1876). *The geographical distribution of animals*, Adamant Media Corporation.
- Yıldız, A. R. (2009). A new design optimization framework based on immune algorithm and Taguchi's method, *Computers in Industry*, vol. 60, no. 8, pp. 613-620, 2009.