

METAHEURÍSTICA BASEADA EM BIOGEOGRAFIA APLICADA À OTIMIZAÇÃO DE DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA

MARSIL DE ATHAYDE COSTA E SILVA¹, LEANDRO DOS SANTOS COELHO²

¹ *Graduação em Engenharia Mecatrônica (Controle e Automação)*

² 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

E-mails: marsil@ymail.com, leandro.coelho@pupr.br

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 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 is comparatively better than recent studies presented in the literature.

Keywords— Economic dispatch, Thermal generators, Optimization methods, Biogeography based-optimization.

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 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 38 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 o a abordagem de otimização baseada em biogeografia são comparativamente melhores que os resultados dos estudos recentes apresentados na literatura.

Palavras-chave— Despacho econômico, Geradores térmicos, Métodos de otimização, Otimização baseada em biogeografia.

1 Introdução

O objetivo básico do problema de despacho econômico da geração de energia elétrica é o escalonamento das saídas das unidades de geração conveniadas para encontrar a demanda de carga consumidora a um custo mínimo de operação, 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 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). Os resultados 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 no algoritmo de otimização baseado em biogeografia são descritos na seção 3. Nas seções 4 e 5 são apresentados, respectivamente, os resultados de simulação e a conclusão deste artigo.

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, ou seja,

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

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

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 presente no sistema; P_D é a demanda de carga total (em MW); P_L são as perdas de transmissão (em MW) e P_i^{\min} e P_i^{\max} são respectivamente as saídas de operação mínimas e máximas da unidade geradora i (em MW). O custo total de combustível deve ser minimizado conforme representado pela equação

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

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

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

onde a_i , b_i e c_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

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”). 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 μ e emigração λ 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).

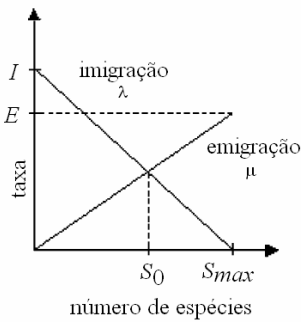


Figura 1. Modelo de espécies (MacArthur e Wilson, 1967).

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

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

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

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

(ii) Gerar populações iniciais de forma aleatória, tal que:

$$P_i^j = P_i^{\min} + (P_i^{\max} - P_i^{\min}) \cdot r \quad (7)$$

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:

(iv.1) Gerar as taxas de imigração e emigração,

$$\lambda_j = \frac{I(1-j)}{S_{max}} \quad e \quad \mu_j = E \frac{j}{S_{max}},$$

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.

(iv.2) Calcular a derivada da probabilidade:

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

(iv.3) Calcular a nova probabilidade:

$$Pr_j = Pr_j + \dot{Pr}_j$$

$$Pr_j = \frac{Pr_j}{\dot{Pr}_j}$$

(iv.4) Modificar algum habitat: Selecionar uma população aleatoriamente e então aplicar aleatoriamente o fator de mutação para cada espécie:

$$m_S = m_{max} \left(1 - \frac{Pr_S}{Pr_{max}} \right)$$

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.

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

(6) Calcular então os custos de cada população e regular as potências dos geradores para que o custo fique menor e a demanda de potência seja atendida. Retornar para o início do laço de repetição (iv).

4 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 encontrada pelas unidades geradoras é $P_D = 6000$ MW. Os dados do sistema são apresentados na tabela 1. Os parâmetros de configuração usados no algoritmo de otimização baseado em biogeografia (BBO) foram: taxa máxima de emigração para o habitat $E=1$, taxa máxima de

imigração para o habitat $I=1$, população de 50 habitats, probabilidade de mutação $p_m = 0.07$, e número máximo de gerações escolhido foi de 50.

Na tabela 2 são apresentados os resultados de simulação obtidos para o estudo de caso. Na tabela 3 é apresentado o melhor resultado, este com função custo de 9440920,567 \$/h e satisfazendo a restrição de igualdade de $P_D = 6000$ MW.

5 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 usando o algoritmo de otimização baseado em biogeografia com função custo de 9440920,567 \$/h 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.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (processo: 309646/2006-5/PQ) e a bolsa de iniciação científica PIBIC/PUCPR (bolsa CNPq) concedida ao aluno Marsil de Athayde Costa e Silva.

Tabela 2. Resultados de convergência do BBO para o caso com 38 unidades geradoras.

técnica	custo mínimo (\$/h)	custo médio (\$/h)	desvio padrão do custo (\$/h)	custo máximo (\$/h)
BBO	9440920,567	9477402,724	9546775,176	24082,018

Tabela 3. Melhor resultado (50 experimentos) para o estudo de caso obtido usando BBO.

potência	geração (MW)	potência	geração (MW)
P_1	443,9620	P_{20}	272,0000
P_2	455,8559	P_{21}	272,0000
P_3	417,7780	P_{22}	229,3731
P_4	332,3308	P_{23}	138,0746
P_5	453,7201	P_{24}	10,0000
P_6	401,3914	P_{25}	92,2861
P_7	475,9794	P_{26}	75,8758
P_8	368,1965	P_{27}	60,1707
P_9	114,0000	P_{28}	20,0000
P_{10}	154,2494	P_{29}	20,0000
P_{11}	169,0077	P_{30}	20,0000
P_{12}	114,0000	P_{31}	20,0000
P_{13}	110,0000	P_{32}	20,0000
P_{14}	90,0000	P_{33}	25,0000
P_{15}	82,0000	P_{34}	18,0000
P_{16}	120,0000	P_{35}	10,8282
P_{17}	181,2244	P_{36}	25,0000
P_{18}	65,1387	P_{37}	20,0000
P_{19}	65,0000	P_{38}	37,5572

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*, **31**(6): 249-257.
- Chowdhury, B. H. e Rahman, S. M. (1990). A review of recent advances in economic dispatch, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **5**(4): 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*, **56**(1): 71-80.
- 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*, **24**(1): 51-57.
- MacArthur, R. e Wilson, E. (1967). *The theory of biogeography*, Princeton University Press.
- Simon, D. (2008). Biogeography-based optimization, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **12**(6): 702-713.
- 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*, vol. 2, pp. 1434-1437.
- Wallace, A. (1876). *The geographical distribution of animals*, Adamant Media Corporation.

Tabela 1. Dados do sistema com 38 geradores.

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