

# MÉTODO EVOLUTIVO APLICADO À OTIMIZAÇÃO DE DESPACHO ECONÔMICO USANDO UNIDADES TÉRMICAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

## Leandro dos Santos Coelho

Laboratório de Automação e Sistemas, LAS  
Programa de Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, PPGEPS  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR  
Rua Imaculada Conceição, 1155, CEP 80215-901, Curitiba, PR, Brasil  
leandro.coelho@pucpr.br

## Viviana Cocco Mariani

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR  
Rua Imaculada Conceição, 1155, CEP 80215-901, Curitiba, PR, Brasil  
viviana.mariani@pucpr.br

*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 híbrida usando estratégia evolutiva (Evolution Strategy, ES) e método de quase-Newton é proposta. A ES é utilizada para gerar boas soluções potenciais, e o método de quase-Newton é utilizado para o ajuste fino (busca local) da solução obtida pela ES. A metodologia híbrida é validada para um sistema teste que consiste de 13 unidades geradoras térmicas e apresenta uma função incremental do custo de combustível e considera os efeitos do ponto de válvula. 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 método híbrido de ES e método de quase-Newton são comparativamente melhores que os resultados dos estudos recentes apresentados na literatura.

*Palavras chave:* despacho econômico, unidades térmicas, métodos de otimização, estratégias evolutivas.

## 1. Introdução

O objetivo básico do problema de despacho econômico da geração de energia elétrica é o escalonamento das saídas das unidades de geração convenientes 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 (Abido, 2003). 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  $\lambda$ , técnicas baseadas em gradiente, método dos pontos interiores, programação linear e programação dinâmica (Lin e Chen, 2002; Granelli e Montagna, 2000; Ding, 1994; Hindi e Ab Ghani, 1991; Wenyuan, 1987). 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 híbrida para resolução do problema de despacho econômico de carga com a presença do efeito do ponto de válvula. O método híbrido proposto integra uma abordagem híbrida de Estratégia Evolutiva (ES) (Bäck *et al.*, 1997; Bäck, 1996; Beyer e Schwefel, 2002) para a etapa de busca global combinada com um método Quase-Newton (QN) para a etapa de busca local.

A metodologia híbrida é testada em um estudo de caso abrangendo 13 unidades térmicas geradoras de energia elétrica (Walters e Sheble, 1993; Sinha *et al.*, 2003) considerando-se o efeito de válvula. Os resultados obtidos são

analisados e comparados com outros apresentados na literatura, que ressaltam a eficiência da abordagem de otimização proposta neste artigo.

## 2. Problema de 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 na equação (3),

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

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

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

onde  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$  são restrições das características do gerador. A equação (4) para o cálculo do custo total pode ser modificada para considerar o efeito do ponto de válvula [16], tal que

$$\tilde{F}_i(P_i) = F_i(P_i) + \left| e_i \operatorname{sen} \left( f_i \left( P_i^{\min} - P_i \right) \right) \right| \quad (5)$$

ou

$$\tilde{F}_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + \left| e_i \operatorname{sen} \left( f_i \left( P_i^{\min} - P_i \right) \right) \right| \quad (6)$$

sendo  $e_i$  e  $f_i$  são constantes do efeito do ponto de válvula dos geradores. Conseqüentemente, o custo total de combustível que deve ser minimizado, conforme representado na equação (3), é modificado para

$$\min f = \sum_{i=1}^n \tilde{F}_i(P_i) \quad (7)$$

na qual  $\tilde{F}_i$  é a função custo para a unidade geradora  $i$  (em \$/h), que é definida pela equação (6). Nos exemplos abordados, neste artigo, são desconsideradas as perdas de transmissão  $P_L$ , portanto, neste caso  $P_L = 0$ .

## 3. Fundamentos da metodologia de otimização

Os métodos de otimização têm duas formas de configuração: os métodos determinísticos e os métodos estocásticos. Os métodos determinísticos tendem a buscar um ponto de mínimo (quando o problema é de minimização) no espaço de busca baseados na informação dada pelo gradiente da função objetivo (função custo). A eficiência destas técnicas depende de diversos fatores, tais como: a solução inicial, a precisão da avaliação da direção descendente, o método utilizado para executar a busca em linha e o critério de parada de otimização adotado.

Os métodos estocásticos, dos quais as abordagens de algoritmos e inteligência coletiva fazem parte, não necessitam do cálculo do gradiente e são aptos a encontrar a solução global. Contudo, o número de avaliações da função objetivo, necessárias para encontrar a solução, é geralmente maior que o número requerido pelos métodos determinísticos.

A seguir são detalhados os fundamentos das ES, do método QN e do método híbrido combinando ES e QN.

### 3.1. Estratégias evolutivas

Uma variedade de Algoritmos Evolutivos (Aes) tem sido desenvolvida e apresentada na literatura. Entretanto, todos os AEs têm uma base conceitual comum, através de procedimentos (operadores) de seleção, mutação e cruzamento (ou recombinação). O interesse nos AEs é por possuírem mecanismos de busca eficientes frente a buscas globais. A maioria das abordagens correntes dos AEs descende dos princípios de diferentes metodologias, principalmente: algoritmos genéticos, programação evolutiva, estratégias evolutivas e evolução diferencial.

No contexto das estratégias evolutivas, Rechenberg (1973) foi pioneiro e desenvolveu a teoria de velocidade de convergência para (1+1)-ES denominada *1/5-success rule*. Neste caso, Rechenberg criou um mecanismo simples de mutação e seleção em que um indivíduo (uma possível solução para o problema) gera um descendente por geração usando uma mutação baseada na geração de números com distribuição normal (Gaussiana). Rechenberg (1973) também propôs a primeira estratégia evolutiva com múltiplos membros, a  $(\mu+1)$ -ES onde  $\mu \geq 1$  indivíduos trocam informações para gerar um descendente, que eventualmente substitui o pior indivíduo pai. Schwefel (1965) introduziu o operador de recombinação e populações com mais de um indivíduo.

A motivação para estender (1+1)-ES e  $(\mu+1)$ -ES para  $(\mu+\lambda)$ -ES e  $(\mu,\lambda)$ -ES possui dois aspectos de importância essencial: a utilização de plataformas computacionais com processamento paralelo e habilitar auto-adaptação dos parâmetros (por exemplo, desvios padrões) da estratégia.

A nomenclatura  $(\mu+\lambda)$ -ES sugere que  $\mu$  antecessores (pais) produzam  $\lambda$  descendentes e toda população é reduzida novamente a  $\mu$  antecessores na próxima geração. Neste caso, embora os antecessores sobrevivam até eles serem superados por descendentes melhores. A  $(\mu,\lambda)$ -ES, por outro lado, sugere que somente os descendentes sofram seleção, e os antecessores sejam descartados. A implementação básica da ES consiste das seguintes etapas:

(i) iniciar o contador de número de gerações,  $k = 1$ ;

(ii) iniciar a população,  $P(k)$  de  $\mu$  indivíduos  $(x_i, \sigma_i)$ ,  $\forall i \in \{1, \dots, \mu\}$ , onde os  $x_i$ 's é dado pelo  $i$ -ésimo objeto variável (solução do problema) e os  $\sigma_i$ 's são as variáveis da estratégia (parâmetros de auto-adaptação);

(iii) avaliar a função de aptidão,  $f(x_i)$ , em cada indivíduo da população;

(iv) cada  $\mu$  antecessor cria seus  $\mu / \lambda$  descendentes, onde

$$x_i'(j) = x_i(j) + \sigma_i(j) \cdot N_i(0,1) \quad (8)$$

onde  $N_i(0,1)$  é um vetor de números independentes gerados aleatoriamente com função densidade de probabilidade Gaussiana (média zero e desvio padrão unitário) para a  $i$ -ésima variável objeto.

(v) avaliar a função aptidão,  $f(x_i')$ , de cada descendente  $(x_i', \sigma_i')$ ,  $\forall i \in \{1, \dots, \lambda\}$ ;

(vi) classificar os descendentes  $(x_i', \sigma_i')$ ,  $\forall i \in \{1, \dots, \lambda\}$  em ordem ascendentes de acordo com seus valores de função de aptidão, e aplicar o operador de seleção de  $(\mu+\lambda)$  ou  $(\mu,\lambda)$  para a determinação dos antecessores na próxima geração;

(vii) incrementar o contador de gerações, tal que  $k = k + 1$ ;

(viii) enquanto o critério de parada (número de gerações máximo) não é satisfeito retornar para a etapa (iv).

A estratégia evolutiva utiliza como operador principal a mutação, que trabalha diretamente com vetores de valores reais (ponto flutuante) e permite a auto-adaptação dos parâmetros da estratégia através de desvio padrão e covariâncias. Diversos mecanismos de recombinação são utilizados em ES (Bäck e Schwefel, 1993) produzindo um novo indivíduo de dois indivíduos antecessores selecionados aleatoriamente com função densidade de probabilidade uniforme. O operador de recombinação pode ser aplicado tanto nos parâmetros da estratégia quanto nas variáveis objeto.

Neste trabalho, o operador de recombinação intermediária é aplicado aos parâmetros da estratégia. Na literatura, diversas estratégias de auto-adaptação têm sido propostas para ES (Bäck *et al.*, 1997; Bäck, 1996; Beyer e Schwefel, 2002). O procedimento usado nas ES clássicas (CES) para o passo de mutação é dado por uma estratégia de adaptação lognormal dada por

$$\sigma_i'(j) = \sigma_i(j) \cdot \exp [\tau' \cdot N(0,1) + \tau \cdot N_j(0,1)] \quad (9)$$

onde  $N(0,1)$  representa um vetor de números independentes gerados aleatoriamente com função densidade de probabilidade Gaussiana (média zero e desvio padrão unitário). O fator global,  $\tau'$ , permite uma mudança completa na mutabilidade, e o fator local  $\tau$  permite mudanças individuais dos tamanhos de passo. Os fatores  $\tau$  e  $\tau'$  são usualmente configurados para  $1/\sqrt{2\sqrt{n}}$  e  $1/\sqrt{2n}$ , onde  $n$  é o número de parâmetros a serem otimizados.

### 3.2. Estratégia evolutiva combinada com método de quase-Newton

Uma aplicação direta do método de Newton é computacionalmente proibitiva devido ao custo computacional da avaliação da matriz Hessiana. Abordagens alternativas, conhecidas como Quase-Newton (QN) ou métodos da variável métrica, constroem uma aproximação da inversa da Hessiana usando somente a informação das primeiras derivadas da função erro sobre um número de passos (Bishop, 1995).

Os procedimentos mais comumente utilizados são o Davidson-Fletcher-Power (DFP) e o Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS). Neste trabalho, a abordagem BFGS é utilizada. A rotina BFGS utilizada neste trabalho é providenciada pelo *Matlab Optimization Toolbox* (função *fminunc*). Os detalhes do procedimento BFGS são apresentados em Fletcher (1987) e Nocedal (1991).

O método QN e as ES possuem vantagens complementares. A combinação proposta neste artigo de CES com QN consiste em uma forma de hibridização seqüencial. Foi testada uma abordagem de método híbrido CES-QN.

Este método híbrido consiste em aplicar a CES ao problema de otimização e a melhor solução, a cada geração, é utilizada como solução inicial para o método de QN, que realiza a busca local. O método QN é utilizado em 40 avaliações de função objetivo. Neste contexto, se a melhor solução do problema de uma geração para outra não mudou, o método de QN não é aplicado.

## 4. Descrição do estudo de caso e resultados de simulação

Os sistemas elétricos são interconectados de forma a obter os benefícios de custos mínimos de geração, confiança máxima e melhores condições operacionais, tais como compartilhamento de reserva de energia, aprimoramento da estabilidade e operação sobre situações de emergência. Neste contexto, o problema de otimização do despacho econômico de energia elétrica é relevante para atendimento de requisitos de qualidade e eficiência na geração de energia elétrica.

O problema de despacho econômico estudado neste trabalho consiste de 13 unidades geradoras e está descrito em Sinha *et al.* (2003) e Wong e Wong (1994). Neste caso a demanda de potência a ser encontrada pelas unidades geradoras é  $P_D = 1800$  MW. Os dados do sistema são apresentados na tabela 1. Os parâmetros de configuração usados na estratégia evolutiva nas simulações foram:  $G=800$  gerações,  $\mu = 1$  indivíduo e  $\lambda = 30$  indivíduos.

Na tabela 2 são apresentados os resultados numéricos de simulação e o tempo demandado com cada abordagem avaliada para o estudo de caso. Na tabela 3 é apresentado o melhor resultado, este obtido usando CES-QN de 17964,878 \$/h.

Nota-se que o método QN (realizados 100 experimentos usando diferentes valores de solução inicial) teve o menor tempo computacional dos métodos testados. O melhor resultado de simulação do QN, ou seja, um custo mínimo de 17998,199 \$/h ficou próximo ao melhor resultado obtido pelo CES-QN.

Dos métodos testados, nota-se pela tabela 2 que a CES-QN foi a técnica de otimização com menor custo mínimo e médio. Neste contexto, a CES-QN apresentou maior custo computacional que a QN e CES quando usadas de forma isolada.

No final desta seção, os melhores resultados de cada abordagem (apresentados na tabela 2) são comparados com outros métodos apresentados na literatura, conforme apresentado na tabela 4. Uma rápida análise desta tabela mostra que o melhor resultado do CES-QN é superior aos apresentados na literatura recente sobre o estudo de caso com 13 unidades geradoras.

Tabela 1. Dados para o estudo de caso de 13 unidades térmicas geradoras, onde as potências  $P_i^{min}$  e  $P_i^{max}$  são dadas em MW.

unidade geradora	$P_i^{min}$	$P_i^{max}$	$a$	$b$	$c$	$e$	$f$
1	0	680	0,00028	8,10	550	300	0,035
2	0	360	0,00056	8,10	309	200	0,042
3	0	360	0,00056	8,10	307	150	0,042
4	60	180	0,00324	7,74	240	150	0,063
5	60	180	0,00324	7,74	240	150	0,063
6	60	180	0,00324	7,74	240	150	0,063
7	60	180	0,00324	7,74	240	150	0,063
8	60	180	0,00324	7,74	240	150	0,063
9	60	180	0,00324	7,74	240	150	0,063
10	40	120	0,00284	8,60	126	100	0,084
11	40	120	0,00284	8,60	126	100	0,084
12	55	120	0,00284	8,60	126	100	0,084
13	55	120	0,00284	8,60	126	100	0,084

Tabela 2. Resultados de convergência para o caso com 13 unidades geradoras com ponto de válvula e  $P_D = 1800$  MW (dados de 100 experimentos com cada método de otimização).

técnica	tempo médio (s)	custo mínimo (\$/h)	custo médio (\$/h)	desvio padrão do custo (\$/h)	custo máximo (\$/h)
QN	<b>0,12</b>	17998,199	18944,079	783,309	22967,708
CES	9,10	18090,446	18356,618	135,191	18699,437
CES-QN	28,15	<b>17964,878</b>	18099,839	<b>56,855</b>	<b>18240,399</b>

Tabela 3. Melhor resultado (100 experimentos) para o estudo de caso obtido usando CES-QN.

potência	geração
$P_1$	628,319808
$P_2$	224,112656
$P_3$	149,272752
$P_4$	109,865856
$P_5$	60,000000
$P_6$	109,866532
$P_7$	109,233651
$P_8$	109,831405
$P_9$	109,497379
$P_{10}$	40,000000
$P_{11}$	40,000000
$P_{12}$	55,000000
$P_{13}$	55,000000
Somatório de $P_i, i=1..13$	1800,0000

Tabela 4. Comparativo dos resultados apresentados na literatura e os obtidos neste trabalho para a função custo  $f$ .

método de otimização	referência	custo mínimo (\$/h) para 13 unidades geradoras
programação evolucionária	Sinha <i>et al.</i> (2003)	17994,07
nuvem de partículas	Victoire e Jeyakumar (2004)	18030,72
programação evolucionária híbrida com SQP	Victoire e Jeyakumar (2004)	17991,03
nuvem de partículas híbrida com SQP	Victoire e Jeyakumar (2004)	17969,93
QN	este trabalho	17998,199
CES	este trabalho	18090,446
CES-QN	este trabalho	<b>17964,878</b>

Notação: SQP (*Sequential Quadratic Programming*)

## 5. Conclusão e futura pesquisa

Neste artigo, foi apresentada uma nova metodologia híbrida combinando CES e QN para resolução do problema de despacho econômico de energia elétrica com a presença do efeito do ponto de válvula. A CES foi utilizada junto ao método QN em uma configuração híbrida de projeto.

Em relação ao procedimento de resolução do problema de despacho econômico de energia elétrica considerando o efeito do ponto de válvula, os resultados de algumas abordagens de métodos híbridos de CES e QN testados para a otimização (problema de minimização) das equações (1) e (2) foram melhores que os apresentados na literatura atual para este o caso de 13 unidades térmicas.

A QN quando aplicada de forma isolada explora o espaço de busca rapidamente com a direção do gradiente e garante uma solução “ótima” local. O desempenho da CES-QN testada foi animador, pois estas abordagens encontraram solução global de alta qualidade em tempo computacional aceitável. No entanto, em relação ao método de QN aplicado de forma isolada, a desvantagem foi o custo computacional maior da CES e da CES-QN para obtenção da convergência para um valor de função custo competitivo com outras técnicas apresentadas na literatura, tais como programação evolucionária e nuvem de partículas.

## 6. Referências

- Abido, M. A., 2003, “A Novel Multiobjective Evolutionary Algorithm for Environmental/Economic Power Dispatch”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 65, No. 1, pp. 71-81.
- Bäck, T., 1996, “Evolutionary Algorithms in Theory and Practice”, New York: Oxford University Press.
- Bäck, T., Fogel, D. B., Michalewicz, Z. (eds.), 1997, “Handbook of Evolutionary Computation”, Bristol, Philadelphia: Institute of Physics Publishing, NY, Oxford: Oxford University Press.
- Bäck, T., Schwefel, H. -P., 1993, “An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization”, *Evolutionary Computation*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-23.
- Beyer, H. -G., Schwefel, H. -P., 2002, “Evolution Strategies”, *Natural Computing*, Vol. 1, pp. 3-52.
- Bishop, C. M., 1995, “Neural Networks for Pattern Recognition”, Oxford University Press, New York, USA.
- Chowdhury, B. H.; 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.
- Ding, A. A. E., 1994, “Environmentally Constrained Economic Dispatch using Linear Programming”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 29, No. 3, pp. 155-159.
- Fletcher, R., 1987, “Practical Methods of Optimization”, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, NY.
- Granelli, G. P., Montagna, M., 2000, “Security-constrained Economic Dispatch using Dual Quadratic Programming”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 56, No. 1, pp. 71-80.
- Hindi, K. S.; Ab Ghani, M. R., 1991, “Dynamic Economic Dispatch for Large Scale Power Systems: a Lagrangian Relaxation Approach”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 13, No. 1, pp. 51-56.
- Lin, W. -M.; 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.
- Nocedal, J., 1991, “Theory of Algorithms for Unconstrained Optimization”, *Acta Numerica*, Vol. 1, pp. 199-242.
- Rechenberg, I., 1973, “Evolutionsstrategie: Optimierung Systeme nach Prinzipien der Biologischen Evolution”, Dr. - Ing. Thesis, Technical University of Berlin, Department of Process Engineering, Germany.
- Schwefel, H. -P., 1965, “Kybernetische Evolution als Strategie der Experimentellen Forschung in der Strömungstechnik”, Master’s thesis, Technical University of Berlin, Germany.
- Sinha, N.; Chakrabarti, R.; Chattopadhyay, P. K., 2003, “Evolutionary Programming Techniques for Economic Load Dispatch”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 7, No. 1, pp. 83-94.
- Vicotire, T. A. A.; Jeyakumar, A. E., 2004, “Hybrid PSO-SQP for Economic Dispatch with Valve-Point Effect”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 71, No. 1, pp. 51-59.
- Walters, D. C.; Sheble, G. B., 1993, “Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 3, pp. 1325-1332.
- Wenyuan, L., 1987, “A Successive Linear Programming Model for Real-time Economic Power Dispatch with Security”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 13, No. 3, pp. 225-233.
- Wong, K. P.; Wong, Y. W., 1994, “Genetic and Genetic/Simulated-annealing Approaches to Economic Dispatch”, *IEEE Proc. Generation, Transmission, and Distribution*, Vol. 141, No. 5, pp. 507-513.

## **EVOLUTIONARY METHOD APPLIED TO ECONOMIC DISPATCH OPTIMIZATION USING THERMAL UNITS TO ENERGY ELECTRICAL GENERATION**

Leandro dos Santos Coelho  
Laboratório de Automação e Sistemas, LAS  
Programa de Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, PPGEPS  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR  
Rua Imaculada Conceição, 1155, CEP 80215-901, Curitiba, PR, Brasil  
leandro.coelho@pucpr.br

Viviana Cocco Mariani  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR  
Rua Imaculada Conceição, 1155, CEP 80215-901, Curitiba, PR, Brasil  
viviana.mariani@pucpr.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, an alternative hybrid method is proposed. An evolution strategy (ES) is used to produce good potential solutions, and the quase-Newton (QN) method is used to fine-tune of final solution of ES. The hybrid methodology is validated for a test system consisting of 13 thermal units whose incremental fuel cost function takes into account the valve-point loading effects. The simulation results are compared with those of other studies reported in the literature. Note that in studied case, the result reported here using hybrid approach of ES and QN is comparatively better than recent studies presented in the literature.

Keywords: economic dispatch, thermal units, optimization methods, evolution strategies.