

SOLUÇÃO DO DESPACHO ECONÔMICO AMBIENTAL COM RESTRIÇÃO DE ESTABILIDADE A PEQUENAS PERTURBAÇÕES UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

RAIMUNDO N. D. COSTA FILHO¹, V. LEONARDO PAUCAR¹

1. *Departamento de Engenharia de Eletricidade, Universidade Federal do Maranhão
Avenida dos Portugueses 1966, Bacanga, São Luís-MA, 65080-805, Brasil
E-mails: raylog2009@hotmail.com, Lpaucar@ieee.org*

Abstract – In this work a solution of environmental/economic dispatch (EED) with small-disturbance stability constraint by using genetic algorithms is proposed. The environmental/economic dispatch aims to minimize the electric energy production cost and the emission of pollutants resulting from the electricity generation, and observing the equality and inequality constraints of the problem. Besides the inequality constraints of active power limits of the generators and of active power balance, the restriction of small-disturbance stability has been included. The EED problem, which has a multi-objective characteristic, has been modeled using an objective function obtained through a conversion factor and a weighted criterion. Simulations were carried out in Matlab using two test systems: one of 3 generators and 9 buses, and the IEEE 30-bus test system of 6 generators. Results of application of genetic algorithms to solve the EED small-disturbance stability constraint indicate that the environmental/economic dispatch can be solved appropriately whereas the poorly damped and critical oscillation modes may be enhanced.

Keywords - Intelligent systems applications to power systems, small-disturbance stability, economic and environmental dispatch, electric energy systems, genetic algorithms.

Resumo– Neste trabalho apresenta-se um estudo da solução do problema de despacho econômico ambiental (DEA) com restrição de estabilidade a pequenas perturbações utilizando a técnica de algoritmos genéticos. O despacho econômico ambiental visa minimizar tanto o custo de produção de energia elétrica quanto a emissão de poluentes decorrentes da geração de eletricidade, atendendo às restrições do problema. Além das restrições dos limites mínimos e máximos dos geradores e do balanço de potência ativa, tem sido incluída a restrição de estabilidade a pequenas perturbações. O problema do DEA de característica multiobjetivo foi modelado através de uma única função objetivo utilizando um fator de conversão e o critério de ponderação. Foram realizadas simulações em ambiente Matlab utilizando dois sistemas teste: um de 3 geradores e 9 barras, e o sistema IEEE-30 de 6 geradores e 30 barras. Os resultados da aplicação de algoritmos genéticos para resolver o DEA com restrição de estabilidade a pequenas perturbações indicam que o despacho econômico ambiental pode ser resolvido adequadamente e ainda melhorar o amortecimento dos modos de oscilação críticos e pobremente amortecidos do sistema.

Palavras-chave – Aplicações de sistemas inteligentes em sistemas de potência, estabilidade a pequenas perturbações, despacho econômico ambiental, sistemas de energia elétrica, algoritmos genéticos.

1. Introdução

O objetivo básico do problema de despacho econômico (DE) dos sistemas de energia elétrica (SEE) é minimizar o custo de combustível utilizado na geração de eletricidade (Wood, 1996). Por outro lado, o despacho ambiental (DA) visa minimizar a emissão de poluentes provenientes da combustão dos combustíveis fósseis utilizados na geração termelétrica. Ademais, é muito importante o conhecimento dos aspectos de estabilidade de um sistema elétrico porque um dos objetivos principais na operação do SEE é garantir que o sistema opere com segurança, isto é, que o sistema seja estável, após a ocorrência de perturbações pequenas ou severas. Os efeitos da segurança do sistema no contexto dos mercados elétricos competitivos são diretos e significativos sobre os preços da eletricidade.

O despacho econômico ambiental (DEA) objetiva minimizar tanto o custo de geração de energia elétrica quanto a emissão de poluentes. Embora algumas restrições de segurança estática possam ser consideradas no problema do despacho econômico e ambiental (DEA), o limite de estabilidade a pequenas perturbações não tem sido incluído no DEA. Se o sistema não é estável ou apresenta modos de oscilação pobremente amortecidos após a ocorrência

de pequenas perturbações, os geradores síncronos do SEE estão propensos a experimentar severas oscilações eletromecânicas de baixa frequência que podem levar à instabilidade angular oscilatória do sistema.

Para a solução do problema do despacho econômico ambiental converteu-se o problema original multiobjetivo em um problema de otimização escalar pela utilização de um fator de conversão h_i (Koridak, 2008), uma vez que, o despacho econômico e o despacho ambiental são problemas incomensuráveis. Enquanto a função custo é dada em \$/h a função ambiental é dada em kg/h.

Várias estratégias e técnicas foram propostas para resolver o problema do DEA. Uma solução analítica é apresentada em (Palanichamy, 2008). Técnicas de inteligência artificial (IA), tais como recozimento simulado (*simulated annealing*), algoritmos genéticos e otimização por enxame de partículas também tem sido utilizados para resolver o DEA (Erdogmus, 2009; Niknam, 2012). Essas técnicas, entretanto, envolvem um grande número de iterações e são muito sensíveis a ajuste de parâmetros. Mais recentemente, outras técnicas de IA têm sido propostas para a resolução do DEA tais como os algoritmos culturais e pesquisa gravitacional.

Neste trabalho apresenta-se a aplicação de algoritmos genéticos para a resolução do problema do despacho econômico ambiental. Além das restrições dos limites mínimos e máximos da potência ativa dos geradores e do balanço de potência ativa no sistema, incluiu-se a restrição da estabilidade angular a pequenas perturbações. Foram realizadas simulações com dois sistemas teste, um sistema de 3 geradores e 9 barras e o sistema IEEE 30 de 6 geradores e 30 barras. As perdas no sistema foram incluídas a partir da resolução do problema de fluxo de potência CA.

2. Descrição do problema

O despacho econômico e ambiental está relacionado com a análise do sistema de energia elétrica operando em regime permanente. Sendo que as pequenas perturbações são de ocorrência aleatória e não podem ser identificadas, é pertinente resolver o problema do despacho observando a restrição da estabilidade angular a pequenas perturbações de forma a prevenir oscilações eletromecânicas de baixa frequência que podem levar à instabilidade oscilatória do sistema de potência.

A seguir serão formulados os problemas do despacho econômico e ambiental, estabilidade angular a pequenas perturbações e do despacho econômico e ambiental com restrição de estabilidade angular a pequenas perturbações.

2.1 Despacho econômico e ambiental

O problema de despacho econômico, abordado neste trabalho, pode ser descrito matematicamente com uma função objetivo e duas restrições, uma de igualdade e outra de desigualdade (Wood, 1996; Zhu, 2009):

$$\min F_T = \min \sum_{i=1}^{N_g} F_i(P_{Gi}) = \min \sum_{i=1}^{N_g} (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{Gi} = P_{perdas} + P_D \quad (2)$$

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

Onde a equação (2) representa as restrições de igualdade do balanço de potência, enquanto a expressão (3) representa as restrições de desigualdade relativas aos limites da capacidade de geração de potência ativa de cada unidade geradora. Em que: N_g é o número de geradores no sistema, a_i , b_i e c_i são os coeficientes econômicos da unidade i , F_T é a função total do custo de combustível, P_D é a demanda de carga total e P_{perdas} representa as perdas de transmissão. As perdas na transmissão são obtidas

a partir das equações do fluxo de potência e podem ser calculadas com um programa convencional de fluxo de potência CA.

O problema de despacho ambiental, discutido neste trabalho, pode ser descrito matematicamente com uma função objetivo (4) e sujeito às restrições (2) e (3) (Palanichamy, 2008):

$$\min E_T = \min \sum_{i=1}^{N_g} E_i(P_{Gi}) = \min \sum_{i=1}^{N_g} (d_i P_{Gi}^2 + e_i P_{Gi} + f_i) \quad (4)$$

Em que: E_T é a emissão total de poluentes (kg/h), P_{Gi} é a geração da unidade i (MW), d_i , e_i e f_i são os coeficientes de emissão de poluentes da unidade i e N_g é o número de geradores.

O problema multiobjetivo do DEA pode ser convertido em um problema de otimização escalar pela utilização do fator de conversão h_i (Palanichamy, 2008). O problema pode ser formulado matematicamente segundo (5) (Bayón, 2012):

$$\min f = \min(\delta F_T + (1 - \delta) h_i E_T) \quad (5)$$

Para resolver o problema DEA adotou-se o método de ponderação inserindo o fator δ na função objetivo. Para cada peso δ fornece-se uma única solução na curva de pareto frontal (Zavala, 2012).

2.2 Avaliação da estabilidade angular a pequenas perturbações

O estudo da estabilidade a pequenas perturbações nos sistemas de energia elétrica é representado pelo conjunto de equações diferenciais- algébricas (Condren, 2006):

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x, y, p) \\ g(x, y, p) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Em que o vetor x representa o conjunto das variáveis de estado do sistema, o vetor y inclui as variáveis algébricas e p é o vetor das variáveis de controle.

A estabilidade a pequenas perturbações de um SEE depende da condição de operação. Assumindo-se que o sistema está operando no regime permanente, todas as derivadas \dot{x} são iguais a zero. Então, uma vez que as variáveis de controle são conhecidas ($p=p_0$), os valores das variáveis remanescentes que definem um sistema em equilíbrio (x_0, y_0) são obtidos resolvendo as equações (7) (Kundur, 1994):

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x_0, y_0, p_0) \\ g(x_0, y_0, p_0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

A avaliação da estabilidade a pequenas perturbações é baseada na análise de um sistema de potência multimáquina linearizado. A linearização é realizada pela aproximação de (6) pelo primeiro termo da

expansão da série de Taylor em torno do ponto de equilíbrio (x_0, y_0) . Portanto, a linearização conduz à expressão (8) (Kundur, 1994):

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_x f & D_y f \\ D_x g & D_y g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (8)$$

Em que $D_x f$, $D_x g$, $D_y f$ e $D_y g$ são, respectivamente, a matriz Jacobiana dos vetores f e g com relação às variáveis x e y , calculadas em (x_0, y_0) .

Assumindo que a matriz Jacobiana $D_y g$ é não-singular, as variáveis algébricas podem ser eliminadas de (8) para obter a equação do sistema (Kundur, 1994):

$$\Delta \dot{x} = A_{sis} \Delta x \quad (9)$$

Em que a matriz A_{sis} é a matriz de estado do sistema. Esta é calculada pela expressão (10):

$$A_{sis} = D_x f - D_y f [D_y g]^{-1} D_x g \quad (10)$$

A avaliação da estabilidade a pequenas perturbações está baseada na análise dos autovalores da matriz de estado do sistema. Os autovalores podem ser reais ou complexos conjugados (Kundur, 1994):

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (11)$$

A parte real σ está relacionada ao crescimento exponencial da resposta. Já a parte imaginária ω determina a frequência de oscilação do respectivo modo de oscilação. A frequência do modo de oscilação em Hz é dada por (12) (Kundur, 1994):

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (12)$$

A razão de amortecimento para esta frequência é dada por (13) (Kundur, 1994).

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (13)$$

2.3 Despacho econômico ambiental com restrição de estabilidade a pequenas perturbações

Na prática, valores aceitáveis para a razão de amortecimento ζ são normalmente maiores que 5%, portanto ζ_{min} pode ser igual a 5% (Martins, 2007). Abaixo disso o sistema de potência é considerado pobremente amortecido. O problema DAE com restrição de estabilidade a pequenas perturbações é dado a seguir.

$$\min f = \min(\delta F_T + (1 - \delta)h_i E_T)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{N_g} P_{Gi} &= P_{perdas} + P_D \\ P_{Gi}^{min} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}; i=1, \dots, N_G \\ \zeta_i &\geq \zeta_{min}; i=1, \dots, m \end{aligned}$$

Em que m é o total de modos de oscilação.

3. Implementação do DEA utilizando algoritmos genéticos.

Os algoritmos genéticos (AG), criado por Holland, são uma classe particular de algoritmos evolutivos que usam técnicas inspiradas pela biologia evolutiva (Reddy, 2012). Os AG são algoritmos estocásticos de busca influenciados pelo princípio de evolução de Darwin.

Os algoritmos genéticos trabalham com populações de indivíduos (cromossomos- em geral codificados na forma de vetores). Estes cromossomos são estruturas de dados que codificam uma solução potencial para um problema. Através de processos evolutivos, chamados de operadores genéticos, os cromossomos são recombinados, mutados e passam por um processo de seleção natural, gerando assim novas soluções melhores que as da geração anterior. Finalmente, ao final do processo os melhores indivíduos representam a solução do problema. São algoritmos robustos podendo ser aplicados a uma vasta lista de problemas práticos.

Um procedimento para a implementação de um AG aplicado ao problema do DEA é mostrado na Tabela 1. A população inicial do AG é formada pelos mínimos das potências dos geradores. A função de avaliação é dada pelo inverso da equação (5). O processo de seleção ocorre pelo processo de torneio, onde um número n de indivíduos é escolhido aleatoriamente. Em seguida, ocorre a recombinação em que dois indivíduos permutam partes de suas estruturas entre si para gerar novos indivíduos. Por fim, ocorre a mutação, onde um cromossomo tem sua cadeia alterada. O processo finaliza até uma tolerância ser respeitada.

Tabela 1: Procedimento do DEA com restrição de estabilidade a pequenas perturbações com AG

<p>Leitura dos coeficientes Despacho econômico: a, b, c Despacho ambiental: d, e, f Leitura de dados estáticos e dinâmicos do SEE Cálculo de δ e h_i { t = 0 Inicializa a população = $(P_1^{min}, P_2^{min}, \dots, P_{N_g}^{min})$ Avaliação da população ($fitness = 1/f$). Repita até (tolerância $< 10^{-6}$) { t = t + 1 Faz seleção; Descarta indivíduos não selecionados; Faz cruzamento; Aplica mutação; Avalia cada indivíduo; Executa estabilidade a pequenas perturbações } }</p>

4. Simulações e resultados

Várias funções no Matlab foram escritas para resolver o problema do DEA com restrição de estabilidade a pequenas perturbações. Além disso, utilizou-se o aplicativo PSAT para resolver o problema da estabilidade a pequenas perturbações (Milano, 2005).

Foram realizadas simulações da aplicação de algoritmos genéticos para resolver o problema DEA com restrição de estabilidade a pequenas perturbações considerando dois sistemas teste: o primeiro composto de 3 geradores e 9 barras, e o segundo (IEEE 30) de 6 geradores e 30 barras.

4.1 Sistema teste de 3 geradores e 9 barras

Este sistema teste de 3 geradores é frequentemente utilizado para o estudo da estabilidade como descreve (Anderson, 2002; Condren, 2006). Os dados estáticos e dos reguladores de tensão estão documentados em (Anderson, 2002). Este sistema teste está composto de 3 geradores, 3 cargas e 9 ramos, como ilustra a figura 1. Todos os geradores foram representados pelo modelo IV e estão equipados com reguladores automáticos de tensão. Os dados dos coeficientes econômicos, dos coeficientes ambientais e os dados dinâmicos dos geradores síncronos se encontram no apêndice na Tabela 4. Para este sistema foram calculados $\delta = 0,96$ e $h_i = 39,41$. Os valores das potências ativas dos geradores, das perdas e da menor razão de amortecimento do sistema estão mostrados na Tabela 2. Além disso, mostra-se a comparação entre os casos de DEA sem restrição de estabilidade a pequenas perturbações e DEA com restrição de estabilidade a pequenas perturbações.

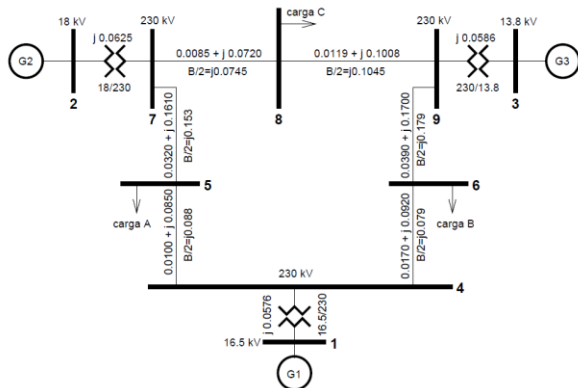


Figura 1: Sistema de 3 geradores e 9 barras (Anderson, 2002).

4.2 Sistema IEEE 30 de 6 geradores

O sistema é composto por seis geradores síncronos, todos eles representados pelo modelo IV, com exceção do gerador da barra 1, representado pelo modelo clássico. Os dados estáticos e o estado do caso base do sistema se encontram em (PSTCA, 2013). Os dados dos coeficientes econômicos, dos coeficientes

ambientais e os dados dinâmicos dos geradores síncronos se encontram no Apêndice na Tabela 5.

Para este sistema foram calculados $\delta = 0,72$ e $h_i = 2,0533$. Os valores das potências ativas dos geradores, das perdas e da menor razão de amortecimento do sistema estão mostrados na Tabela 3. Além disso, mostra-se a comparação dos casos do DEA com/sem restrição de estabilidade a pequenas perturbações.

5. Discussão dos resultados

Observa-se das Tabelas 2 e 3 que os custos econômicos e ambientais aumentaram. Para o caso (4.1) tem-se um aumento de 15536,52 para 15774,87 (um aumento de 1,53%) para o despacho econômico e de 140,111 para 162,712 (um aumento de 16,13%) para o despacho ambiental.

Para o caso (4.2) tem-se um aumento de 813,504 \$/h para 1122,662 \$/h (um aumento de 37,99%) para o despacho econômico e de 381,614 kg/h para 645,147 kg/h (um aumento de 69,05%) para o despacho ambiental. Observa-se que a segurança do sistema tem um efeito direto e significativo sobre os custos econômicos e ambientais.

Tabela 2: Resultados do DEA com/sem restrição de estabilidade a pequenas perturbações para o sistema de 3 geradores

DEA com restrição de estabilidade					
Demanda	Potência (MW)			Perdas	$\zeta_{\text{mínimo}}$
(MW)	G_1	G_2	G_3	(MW)	(%)
315	123,37	61,21	133,77	3,35	5,826
Custo econômico (\$/h)			Custo ambiental (kg/h)		
15774,87			162,712		
DEA sem restrição de estabilidade					
Demanda	Potência (MW)			Perdas	$\zeta_{\text{mínimo}}$
(MW)	G_1	G_2	G_3	(MW)	(%)
315	65,43	139,89	114,50	4,82	2,785
Custo econômico (\$/h)			Custo ambiental (kg/h)		
15536,52			140,111		

Tabela 3: Resultados do DEA com/sem restrição de estabilidade a pequenas perturbações para o sistema IEEE 30 de 6 geradores

DEA com restrições de estabilidade					
Demanda	Potência (MW)			Perdas	$\zeta_{\text{mínimo}}$
(MW)	G_1	G_2	G_3	(MW)	(%)
283,4	33,990	27,371	34,054	4,149	5,301
	G_4	G_5	G_6		
	93,149	86,959	12,035		
Custo econômico (\$/h)			Custo ambiental (kg/h)		
1122,662			645,147		
DEA sem restrições de estabilidade					
Demanda	Potência (MW)			Perdas	$\zeta_{\text{mínimo}}$
(MW)	G_1	G_2	G_3	(MW)	(%)
283,4	173,90	31,436	22,843	8,714	4,219
	G_4	G_5	G_6		
	27,610	17,246	19,094		
Custo econômico (\$/h)			Custo ambiental (kg/h)		
813,504			381,614		

6. Conclusão

Neste trabalho foi apresentada uma solução do problema do despacho econômico ambiental com restrições de estabilidade a pequenas perturbações utilizando algoritmos genéticos. A função multiobjetivo foi convertida em uma função mono objetivo através introdução do peso δ .

Para incluir a restrição de estabilidade a pequenas perturbações, as equações diferenciais e algébricas do sistema foram linearizadas em torno de um ponto de operação. Para garantir que o sistema seja estável após pequenas perturbações, adotou-se uma razão de amortecimento mínimo, que normalmente é de 5%. O problema do DEA com restrição de estabilidade a pequenas perturbações foi resolvido para o sistema de 3 geradores e o sistema teste IEEE-30 de 6 geradores. Os resultados demonstraram que a estabilidade do sistema tem um efeito imediato e expressivo sobre os custos econômicos e ambientais do despacho econômico ambiental.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico- pelo suporte financeiro.

Apêndice

Dados do sistema de 3 geradores e 9 barras

Tabela 4: Dados econômicos e ambientais dos geradores do sistema de 3 geradores

Unidade	Coeficiente econômico			Limites (MW)	
	a_i	b_i	c_i	P_{min}	P_{max}
1	0,03546	38,3055	1243,531	25	250
2	0,02110	36,3278	165,569	25	270
3	0,01799	38,2704	1356,659	35	285
Coeficiente ambiental					
Unidade	d_i	e_i	f_i		
1	0,00683	-0,5455	40,2669		
2	0,00461	-0,5116	42,8955		
3	0,00461	-0,5116	42,8955		

Tabela 5: Dados dinâmicos dos geradores do sistema teste de 3 geradores

Gerador	G_1	G_2	G_3
x_l (p.u)	0,0336	0,0521	0,0742
r_a (p.u)	0,0	0,0	0,0
x_d (p.u)	0,146	0,896	1,312
x'_d (p.u)	0,060	0,119	0,181
x_q (p.u)	0,097	0,864	1,258
x'_q (p.u)	0,097	0,197	0,250
T'_{d0} (s)	8,96	6,00	5,89
T'_{q0} (s)	0,31	0,535	0,60
H(s)	23,64	6,40	3,01

Dados do sistema IEEE-30 de 6 geradores

Tabela 6: Dados econômicos e ambientais dos geradores do sistema IEEE-30 de 6 geradores

Unidade	Coeficiente econômico			Limites	
	a_i	b_i	c_i	P_{min}	P_{max}
1	0,00375	2,00	0,0	20	200
2	0,01750	1,75	0,0	20	80
3	0,06250	1,00	0,0	15	50
4	0,00834	3,25	0,0	10	100
5	0,02500	3,00	0,0	10	90
6	0,02500	3,00	0,0	12	40
Coeficiente ambiental					
Unidade	d_i	e_i	f_i		
1	0,0126	-1,1000	22,983		
2	0,0200	-0,1000	25,313		
3	0,0270	-0,0100	25,505		
4	0,0291	-0,0050	24,900		
5	0,0290	-0,0040	24,700		
6	0,0271	-0,0055	25,300		

Tabela 7: Dados dinâmicos dos geradores do sistema IEEE 30 de 6 geradores

Gerador	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6
x_l (p.u)	*	0,052	0,074	0,074	0,074	0,074
r_a (p.u)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
x_d (p.u)	*	1,138	0,859	1,060	0,946	0,903
x'_d (p.u)	0,050	0,350	0,299	0,330	0,376	0,321
x_q (p.u)	*	0,681	0,581	0,630	0,566	0,539
x'_q (p.u)	*	0,197	0,250	0,250	0,250	0,250
T'_{d0} (s)	*	5,60	5,50	5,40	5,00	7,28
T'_{q0} (s)	*	0,535	0,60	0,60	0,60	0,60
H(s)	8,00	4,938	4,988	5,050	2,950	2,749

Referências Bibliográficas

- Anderson, P. M. and Fouad, A. A. (2002). Power System Control and Stability. Wiley-IEEE Press, 2nd edition.
- Bayón, L.; Grau, J. M.; Ruiz, M. and Suárez, P. M. (2012). The Exact Solution of the Environmental/Economic Dispatch Problem. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 2, pp. 723- 731.
- Condren, J. and Gedra, T. W. (2006). Expected-Security- Cost Optimal Power Flow with Small-Signal Stability Constraints. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 4, pp. 1736- 1743.
- Erdogmus, P.; Ozturk, A. and Duman, S. (2009). Environmental/Economic Dispatch using Genetic Algorithms and Simulated Annealing. International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems.
- Koridak, L. A.; Rahli, M. and Younes, M. (2008). Hybrid Optimization of the Emission and Economic Dispatch by the Genetic Algorithm. Leonardo Journal of Sciences, pp. 193-203
- Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control. McGraw- Hill.
- Martins, N.; Pellanda, P. C. and Rommes, J. (2007). Computation of Transfer Function Dominant Zeros with Applications to Oscillation Damping Control of Large Power Systems. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No.4, pp.1657-1664.
- Milano, F. (2005). An Open Source Power System Analysis Toolbox. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 3, pp. 1199- 1206.
- Niknam, T. and Douagou-Mojarrad, H. (2012). Multiobjective economic/emission dispatch by multiobjective θ -particle swarm optimization. IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 6, pp. 363-377.
- Palanichamy, C. and Babu, N. S. (2008). Analytical Solution for Combined Economic and Emissions Dispatch. Electric Power Syst. Res., Vol. 78, No. 7, pp. 1129-11137.
- PSTCA, Power Systems Tests Case Archive, University of Washington, acesso em 15/05/2013, <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>
- Reddy, M. J. and Kumar, D. N. (2012). Computational algorithms inspired by biological processes and evolution. Current Science, Vol. 103, No. 4, pp. 370- 380.
- Wood, A. J. and Wollenberg, B. F. (1996). Power Generation, Operation and Control. London, UK: John Wiley & Sons.
- Zavala, V. M. and Flores-Tlacuahuac, A. (2012). Stability of Multiobjective Predictive Control: A Utopia-Tracking Approach. Automatica.
- Zhu, J. (2009). Optimization of Power System Operation. New Jersey, John Wiley & Sons.