

OTIMIZAÇÃO DE DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADO EM UM ALGORITMO EVOLUTIVO COM INSPIRAÇÃO QUÂNTICA E INFORMAÇÃO DE DIVERSIDADE

Júlio Xavier Vianna Neto¹, Diego Luis de Andrade Bernert² e Leandro dos Santos Coelho²

¹Graduação em Engenharia Mecatrônica (Controle e Automação), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Rua Imaculada Conceição 1155, CEP 80215-901, Curitiba, PR, Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Rua Imaculada Conceição 1155, CEP 80215-901, Curitiba, PR, Brasil
julio.neto@onda.com.br; dbernert@gmail.com; leandro.coelho@pupr.br

Abstract – This paper aims to evaluate the performance of an improved quantum-inspired evolutionary algorithm based on diversity information of population (IAEIQ) in solving of economic dispatch problems of electric energy. The main objective of economic dispatch of electric energy is to determine the optimal schedule of generating units so as to meet the power demand at minimum operating cost considering operating constraints. In this context, the IAEIQ was implemented and validated for a benchmark problem of economic dispatch with 15 thermal generators with prohibited operating zones. From the results for the benchmark problem, it is observed that the proposed IAEIQ approach provides best objective function value compared to various methods available in the recent literature.

Keywords – Quantum Computing, Evolutionary Algorithm, Economic Dispatch of Electric Energy, Optimization, Diversity Information.

Resumo – Este artigo tem como objetivo avaliar o desempenho de um algoritmo evolutivo inspirado em computação quântica e baseado em informação de diversidade da população (IAEIQ) na resolução de problemas de despacho econômico de energia elétrica. O objetivo principal do problema de despacho econômico é determinar o escalonamento ótimo de unidades de geração atendendo a demanda de potência a um custo mínimo de operação considerando restrições operacionais. Neste contexto, o IAEIQ foi implementado e validado para um problema teste de despacho econômico com 15 geradores térmicos com zonas de operação proibidas. Dos resultados para o problema teste é observado que o IAEIQ proposto obtém melhor resultado em termos de função objetivo que os de vários métodos avaliados da literatura recente.

Palavras-chave – Computação Quântica, Algoritmo Evolutivo, Despacho Econômico de Energia Elétrica, Otimização, Informação de Diversidade.

1. Introdução

Recentemente, inúmeras abordagens de algoritmos evolutivos (AEs) que buscam uma rápida convergência à solução ótima ou mesmo quase ótima em problemas complexos de otimização têm sido propostas na literatura, a citar, por exemplo, [1] e [2]. Em outro contexto, a computação quântica é uma área baseada nas características da mecânica quântica como incerteza, superposição, interferência e emaranhamento para processar informação através de métodos inovadores. O Algoritmo Evolutivo com Inspiração Quântica (AEIQ, *Quantum-inspired Evolutionary Algorithm*) avaliado neste artigo é inspirado no conceito de múltiplos universos da física quântica, e permite realizar o processo de otimização com um menor número de avaliações de soluções. O AEIQ, proposto em [3], foi desenvolvido usando os fundamentos de *qubits* (bits quânticos) para representação de indivíduos, uma porta quântica como operador de variação e um processo de observação.

O problema de despacho econômico tem como objetivo principal o cálculo dos níveis de geração, geralmente em MW, de cada unidade geradora, de modo a suprir inteiramente a demanda da maneira

mais econômica possível e respeitando determinadas restrições físicas e operacionais pré-estabelecidas [1]. Neste artigo, uma abordagem melhorada de AIEQ baseada em informação de diversidade da população (IAEIQ) é apresentada e validada para um problema teste de despacho econômico de energia elétrica com 15 geradores térmicos e a presença de zonas proibidas de operação.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. Uma descrição do AIEQ e do IAEIQ é apresentada na seção 2. Nas seções 3 e 4 são apresentados, respectivamente, a formulação do problema de despacho econômico e os resultados de simulação para um estudo de caso. Na seção 5, a conclusão é apresentada.

2. Algoritmo evolutivo com inspiração quântica

Os algoritmos quânticos são abordagens computacionais utilizadas para processar informação, constituídos de portas lógicas quânticas. A importância de tais algoritmos é evidenciada pelo fato de que muitos problemas interessantes são impossíveis de resolver em computadores clássicos, e em computadores quânticos, porém, possuem solução viável. A promessa dos computadores quânticos é possibilitar novos algoritmos que tornam tratáveis problemas que requerem recursos exorbitantes para solucioná-los em um computador clássico.

Devido à dificuldade da implementação de computadores quânticos e do desenvolvimento de novos algoritmos quânticos, surge uma nova abordagem denominada computação com inspiração quântica. Esta abordagem propõe a criação de algoritmos inspirados em certos princípios da mecânica quântica (como ondas estacionárias, interferência e coerência), assim como os algoritmos quânticos, porém desenvolvidos para serem executados em computadores clássicos. Ao invés de investir em novas técnicas para poder usufruir da computação quântica, a computação com inspiração quântica desenvolve algoritmos clássicos que utilizam os efeitos quânticos para melhorar seu desempenho na resolução de problemas.

Por outro lado, em outro contexto, os algoritmos evolutivos (AEs) são caracterizados pela representação do indivíduo, pela função objetivo, que representa o nível de adaptação do indivíduo, e pela dinâmica populacional, como tamanho da população, operador de variação, seleção de indivíduos, reprodução e herança, método da competição de sobrevivência, etc. O projeto de um algoritmo evolutivo deve utilizar estes componentes de forma apropriada, buscando um algoritmo eficiente que explore o espaço de busca com um número pequeno de indivíduos e a solução global com um curto tempo de execução.

Unindo-se a metodologia de AEs com a inspiração quântica, surge AEIQ. Na computação evolutiva, a representação do indivíduo pode ser binária, numérica ou simbólica, por exemplo. Entretanto, AEIQ em sua primeira proposição utiliza um novo recurso para esta representação, chamado de *Q-bit*, que é baseado no conceito do *qubit* da computação quântica. Um indivíduo em AEIQ é formado por uma seqüência de *Q-bits*, e representa probabilisticamente uma possível solução ao problema. A vantagem de um indivíduo de *Q-bits* é que ele pode representar uma superposição linear dos estados, ou soluções binárias, no espaço de busca. Ou seja, um indivíduo de *Q-bits* pode gerar probabilisticamente todos os indivíduos binários que representam as possíveis soluções ao problema, através da observação da *string* de *Q-bits*. Portanto, a representação por *Q-bit* tem uma característica de diversidade populacional melhor que outras representações.

Um *Q-gate*, ou porta quântica, é definido como operador de variação do AEIQ, que modifica os indivíduos, levando-os a representar melhores soluções ou até eventualmente um único estado. Inicialmente os indivíduos de AEIQ representam a superposição linear de todos os estados possíveis com a mesma probabilidade, o que gera soluções binárias bastante diversificadas.

Com sucessivas aplicações da porta quântica, cada *Q-bit* do indivíduo se aproxima de 0 ou 1, e o indivíduo tende a convergir para um estado único. Desta maneira, a diversidade das soluções desaparece gradualmente. Por este mecanismo inerente, AEIQ pode tratar o equilíbrio entre exploração e abuso. A figura 1 mostra a estrutura geral de AEIQ, caracterizando as suas principais operações.

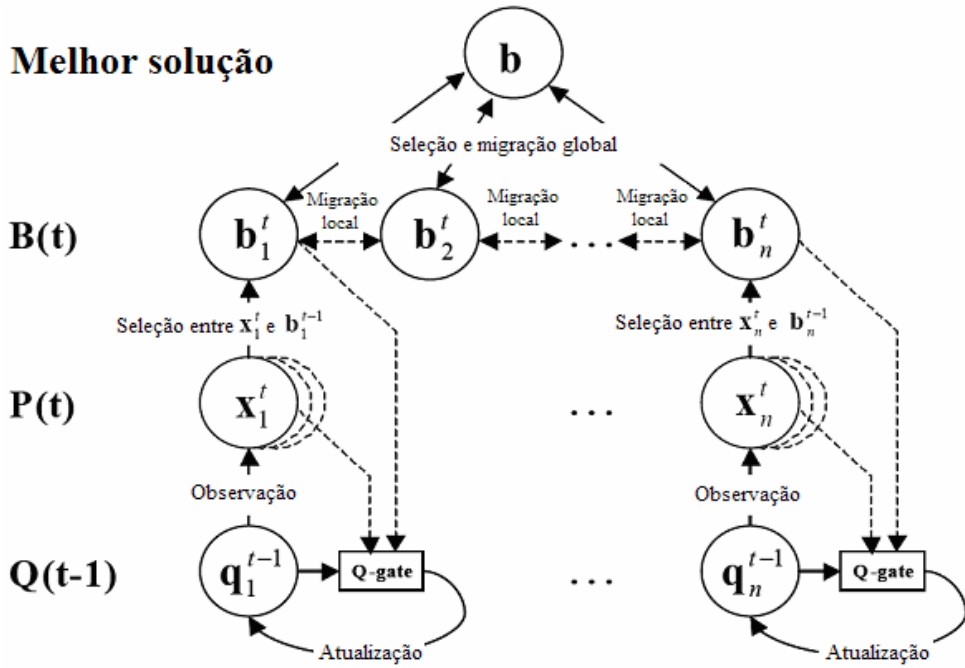


Figura 1 – Estrutura geral do AEIQ.

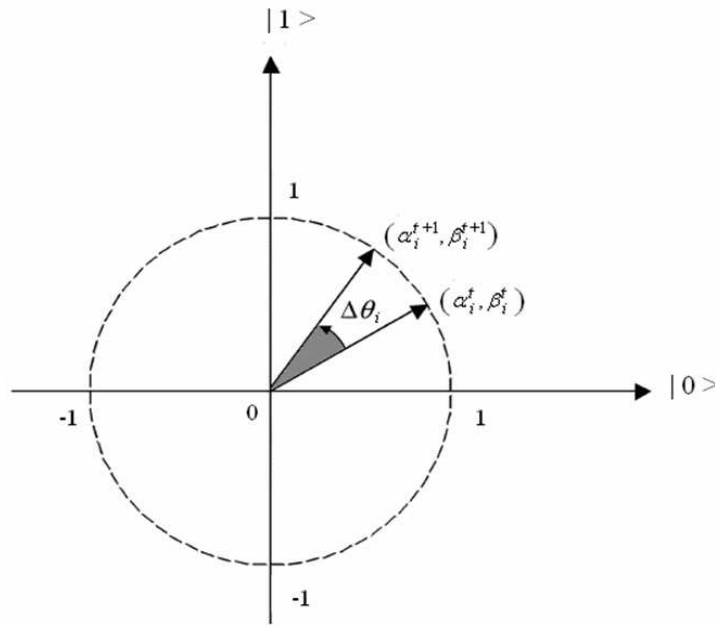


Figura 2 – Representação polar da rotação do *Q-bits*.

Neste trabalho, a implementação do AEIQ com representação binária foi realizada de acordo com sua definição em [3] e [4]. Um indivíduo neste algoritmo é representado por uma seqüência de m *Q-bits*, tal que:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_m \\ \beta_1 & \beta_2 & \dots & \beta_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

considerando

$$|\alpha_i|^2 + |\beta_i|^2 = 1 \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

onde $|\alpha_i|^2$ é a probabilidade do *Q-bit* i ser encontrado no estado “0” e $|\beta_i|^2$ é probabilidade dele ser encontrado no estado “1”.

AEIQ é um algoritmo estocástico que apresenta similaridades com outros algoritmos evolutivos. AEIQ, porém, mantém uma população de indivíduos de Q -bits, $Q(t) = \{q_1^t, q_2^t, \dots, q_n^t\}$ na geração t , onde n é o tamanho da população, e q_j^t é um indivíduo de m Q -bits, sendo que m é o tamanho da string do indivíduo.

É importante mencionar que a população clássica $P(t)$ é representada por indivíduos de strings binárias. Um processo de observação transforma a população quântica $Q(t-1)$ na população clássica $P(t)$, como visto na figura 1. Neste trabalho foi utilizada a porta quântica de rotação para atualizar a população quântica, onde o i -ésimo Q -bit (α_i^t, β_i^t) de q_j^t é atualizado usando

$$\begin{bmatrix} \alpha_i^{t+1} \\ \beta_i^{t+1} \end{bmatrix} = U(\Delta\theta_i^t) \begin{bmatrix} \alpha_i^t \\ \beta_i^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_i^t) & -\sin(\Delta\theta_i^t) \\ \sin(\Delta\theta_i^t) & \cos(\Delta\theta_i^t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_i^t \\ \beta_i^t \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Neste trabalho adotam-se os mesmos parâmetros de ângulo e tabela de busca (ver figura 2 e tabela 1) usados para a porta de rotação do clássico AEIQ proposto por [3], ou seja, $\theta_3 = 0.05\pi$, $\theta_5 = -0.05\pi$, e 0 para os outros ângulos. $\theta_i, i = 1, 2, \dots, 8$, são os ângulos de rotação a serem aplicados através da equação 4, em cada caso descrito na tabela 1. Após a rotação, o estado do Q -bit se aproxima de “0” ou “1”, dependendo do sinal do ângulo de rotação. Deve-se enfatizar que a magnitude e o sinal de $\Delta\theta_i$ afetam a velocidade de convergência do AEIQ.

Tabela 1 – Parâmetros da tabela de busca do AEIQ.

x_{ji}^t	b_{ji}^t	$f(x_j^t) \geq f(b_j^t)$	$\Delta\theta_i$
0	0	Falso	θ_1
0	0	Verdadeiro	θ_2
0	1	Falso	θ_3
0	1	Verdadeiro	θ_4
1	0	Falso	θ_5
1	0	Verdadeiro	θ_6
1	1	Falso	θ_7
1	1	Verdadeiro	θ_8

O procedimento de otimização do AEIQ pode ser resumido no diagrama apresentado na figura 3. Para um detalhamento mais aprofundado sobre os passos do AEIQ e suas correlações com a figura 1, sobre Q -gates e o processo de atualização, remete-se o leitor a [3] e [4].

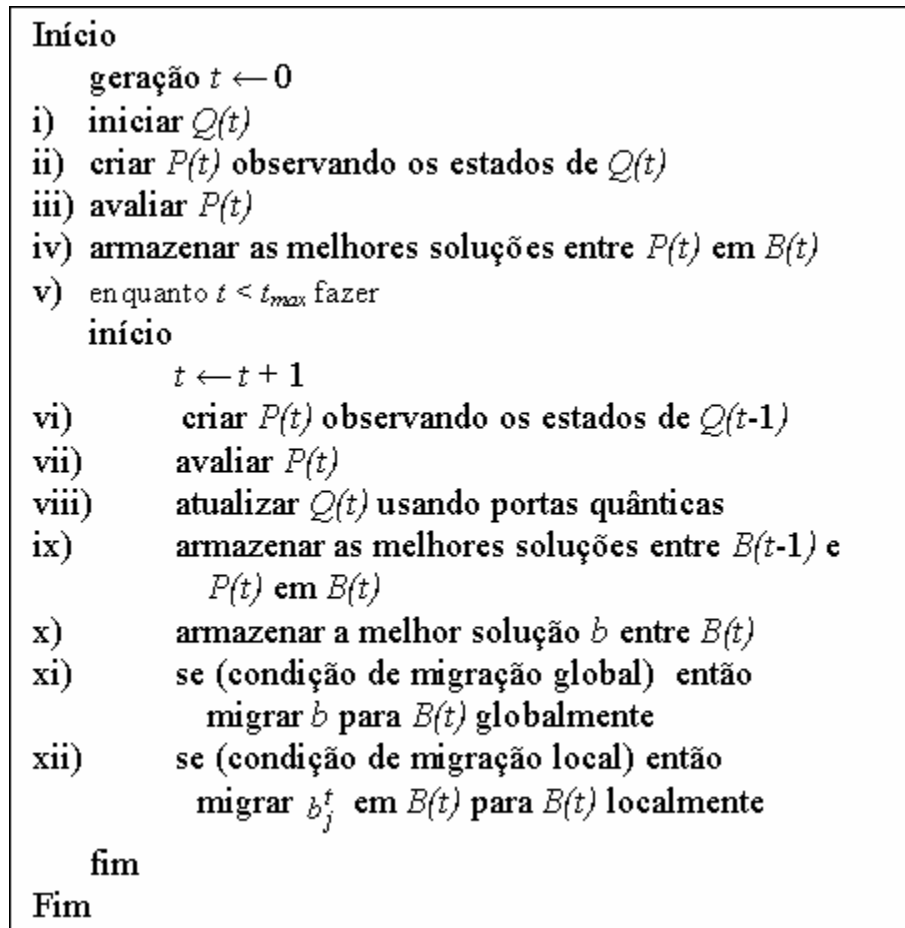


Figura 3 – Diagrama de fluxo de dados no AEIQ [4].

2.1 Abordagem IAEIQ

O IAEIQ proposto adota uma porta NOT para o ajuste dos Q -bits se o melhor valor de função objetivo da população não melhorar enquanto a seguinte relação for satisfeita: $(t / t_{max}) > 0.01$. Neste caso, a i -ésima posição do indivíduo de Q -bits na geração t é sorteado e o i -ésimo Q -bit (α_i^t, β_i^t) é atualizado pela porta NOT. A porta NOT troca a probabilidade do estado “1” (ou “0”) pela probabilidade do estado “0” (ou “1”). Desta maneira pode-se escapar de um ótimo local. Neste trabalho adotou-se que a porta NOT tem probabilidade de aplicação de 50%. Este procedimento tem inspiração na operação de mutação presente em diversos algoritmos evolutivos.

Inspirado em [5] e [2], a abordagem IAEIQ proposta neste artigo usa informação da diversidade da população para o ajuste dos valores de $\Delta\theta$. Por conseguinte, neste trabalho é proposta a seguinte regra para a sintonia de θ_3 e θ_5 (ver tabela 1 – valor zero para os outros ângulos) usando uma medida de diversidade baseada no número de 1’s em $P(t) = \{x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t\}$, conforme apresentado na figura 4 para um problema de minimização.

$$\begin{aligned}
 &\chi = 0,05 \\
 &\text{Se } f < f_{melhor} \text{ e } P_j(t) = 0 \text{ e } B_j(t) = 0 \\
 &\quad \theta_3 = (1 - soma(P_j(t))) \cdot \chi \cdot \pi \\
 &\text{Se } f > f_{melhor} \text{ e } x_j^t = 1 \text{ e } B_j(t) = 0 \\
 &\quad \theta_5 = -(1 - soma(P_j(t))) \cdot \chi \cdot \pi
 \end{aligned}$$

Figura 4 – Pseudocódigo usado no IAEIQ.

3. Despacho econômico de energia elétrica

O tipo de problema de despacho econômico de energia elétrica abordado neste trabalho pode ser descrito matematicamente com uma função objetivo e duas restrições. As restrições representadas pelas expressões (5) e (6) devem ser satisfeitas, ou seja,

$$\sum_{i=1}^n P_i - P_L - P_D = 0 \quad (5)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (6)$$

A equação (5) representa as restrições de igualdade do balanço de potência (isto é, balanço entre suprimento e demanda), enquanto a expressão (6) 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 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

$$\min f = \sum_{i=1}^n f_i(P_i), \quad (7)$$

onde f é a função custo (objetivo) de combustível para a unidade geradora i (em \$/h), $i=1, \dots, n$, que é definida pela equação

$$f_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2, \quad (8)$$

onde a_i , b_i e c_i são constantes características do i -ésimo gerador.

O estudo de caso abordado neste artigo é descrito em [6-8]. A formulação do problema considerando 15 unidades geradoras com a presença de 4 zonas proibidas de operação para os geradores 2, 5, 6 e 12, *spinning reserve* de 200 MW e uma demanda P_D de 2650 MW é apresentada, respectivamente, nas tabelas 2 e 3. Neste artigo, o tratamento das restrições foi baseado no procedimento adotado em [9].

4. Resultados

Para validação dos algoritmos propostos, em relação ao estudo de caso, foram efetuadas 50 simulações para o AEIQ clássico e o IAEIQ. Foi utilizado número máximo de gerações igual a 200 e população de 25 indivíduos nos dois algoritmos validados. No estudo de caso abordado são desconsideradas as perdas de transmissão P_L , portanto, $P_L = 0$.

A tabela 4 mostra estatísticas de simulação obtidas com os resultados das 50 simulações com o AEIQ e o IAEIQ para efeito de análise de robustez e desempenho. Nota-se por esta tabela que o IAEIQ (resultado na tabela 5 e figura 5) obteve o melhor desempenho que o AEIQ clássico proposto por [3].

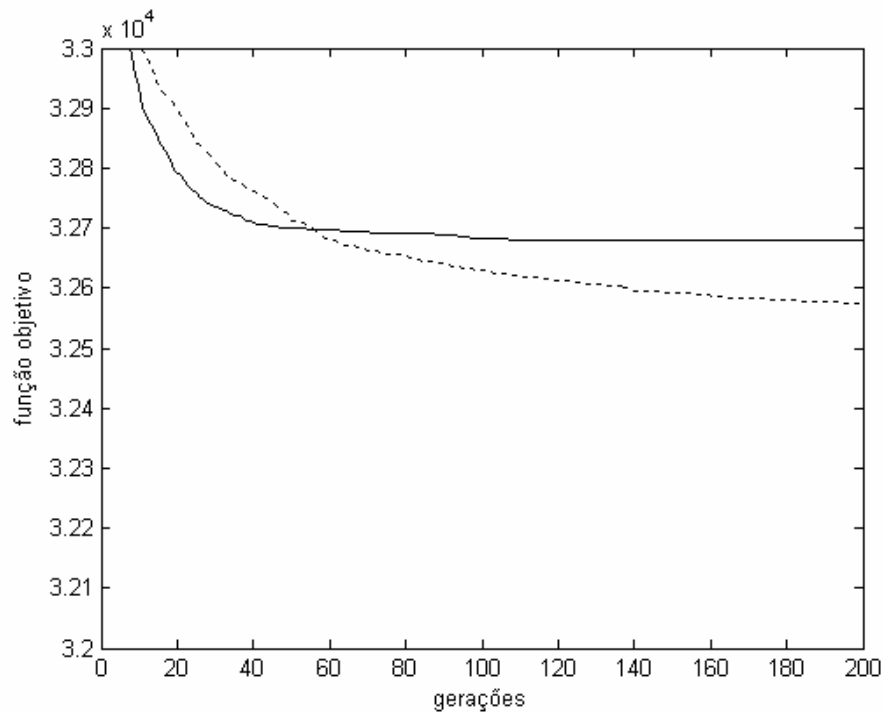


Figura 5 – Convergência (média de 50 simulações para o valor de f da melhor solução a cada geração).

A tabela 6 mostra uma comparação das melhores soluções da literatura e o melhor resultado obtido pelo IAEIQ. Nota-se que o resultado obtido pelo IAEIQ é superior (menor) aos apresentados na tabela 6.

5. Conclusão

A partir dos resultados obtidos pode-se perceber que a inspiração quântica realmente tem um bom potencial na área de otimização. O resultado mais satisfatório deste projeto foi obtido com a aplicação do proposto IAEIQ para o estudo de caso com 15 geradores, que foi superior à melhor solução encontrada na recente literatura.

Em futura pesquisa, os autores desejam comparar o IAEIQ com diferentes ajustes dos parâmetros de projeto em problemas de despacho econômico de energia elétrica de maior porte.

Agradecimentos: Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (processo: 309646/2006-5/PQ) e ao programa de iniciação científica PIBIC/PUCPR pela bolsa de iniciação científica concedida ao aluno Júlio Xavier Vianna Neto.

Referências:

- [1] Jeyakumar, D. N., Jayabarathi, T. e Raghunathan, T. (2006). Particle swarm optimization for various types of economic dispatch problems, **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 38(1): 36-42.
- [2] Coelho, L. S., De Souza, R. C. T. e Mariani, V.C. (2009). Improved differential evolution approach based on cultural algorithm and diversity measure applied to solve economic load dispatch problems, **Mathematics and Computers in Simulation**, 79(10): 3136-3147.
- [3] Han, K. e Kim, J. (2002). Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization, **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, 6(6): 580-593.
- [4] Han, K. (2003). Quantum-inspired evolutionary algorithm. **Thesis**, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Korea.
- [5] Ursem, R. K. (2002). Diversity-guided evolutionary algorithms, **Proceedings of Parallel Problem Solving from Nature Conference - PPSN VII**, Granada, Spain, pp. 462-471.
- [6] Lee, F. N. e Breipohl, A. M. (1993). Reserve constrained economic dispatch with prohibited operating zones, **IEEE Transactions on Power Systems**, 8(1): 246-254.

- [7] Somasundaram, P., Kuppusamy, K. e Devi, R. P. K. (2004). Economic dispatch with prohibited operating zones using fast computation evolutionary programming algorithm, **Electric Power Systems Research**, 70(3): 245-252.
- [8] Papageorgiou, L. G. e Fraga, E. S.(2007). A mixed integer quadratic programming formulation for the economic dispatch of generators with prohibited operating zones, **Electric Power Systems Research**, 77(10): 1292-1296.
- [9] Noman, N. e Iba, H. (2008). Differential evolution for economic load dispatch problems, **Electric Power Systems Research**, 78(3): 1322-1331.
- [10] Orero, S. O. e Irving, M.R. (1996). Economic dispatch of generators with prohibited operating zones: a genetic algorithm approach, **IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution**, 143(6): 529-534

Tabela 2 – Dados do sistema com 15 geradores.

gerador	a_i (\$/h)	b_i (\$/MWh)	c_i (\$/MWh ²)	P_i^{min} (MW)	P_i^{max} (MW)	<i>spinning reserve</i> , S_i^{max} (MW)
1	671,03	10,07	0,000299	150	455	50
2	574,54	10,22	0,000183	150	455	0
3	374,59	8,8	0,001126	20	130	30
4	374,59	8,8	0,001126	20	130	30
5	461,37	10,4	0,000205	150	470	0
6	630,14	10,1	0,000301	135	460	0
7	548,2	9,87	0,000364	135	465	50
8	227,09	11,5	0,000338	60	300	50
9	173,72	11,21	0,000807	25	162	30
10	175,95	10,72	0,001203	20	160	30
11	186,86	11,21	0,003586	20	80	20
12	230,27	9,9	0,005513	20	80	0
13	225,28	13,12	0,000371	25	85	20
14	309,03	12,12	0,001929	15	55	40
15	323,79	12,41	0,004447	15	55	40

Tabela 3 – Zonas proibidas para o sistema com 15 geradores.

gerador	zona 1 (MW)	zona 2 (MW)	zona 3 (MW)
2	[185–225]	[305–335]	[420–450]
5	[180–200]	[260–335]	[390–420]
6	[230–255]	[365–395]	[430–455]
12	[30–55]	[65–75]	–

Tabela 4 – Estatísticas de simulação (melhor resultado de cada uma das 50 simulações) para o estudo de caso, em termos da função custo (equação (7)).

índice para f	AEIQ	IAEIQ
Custo mínimo	32563,4839	32451,8511
Custo máximo	32806,2897	32699,5552
Custo médio	32679,5453	32575,3542
Desvio padrão	0,0064	0,0054

Tabela 5 – Melhor resultado (50 experimentos) obtido usando IAEIQ.

potência	geração	potência	geração	potência	geração	potência	geração
P_1	237,4817	P_5	432,4529	P_9	30,4161	P_{13}	26,4042
P_2	394,0124	P_6	518,9828	P_{10}	50,8831	P_{14}	27,7161
P_3	171,1649	P_7	423,1771	P_{11}	52,9717	P_{15}	16,3823
P_4	116,8386	P_8	69,6178	P_{12}	81,4980	$\sum_{i=1}^{15} f_i(P_i)$	2650 MW

Tabela 6 – Comparação de resultados obtidos para o problema com 15 geradores com os resultados da literatura.

método de otimização	custo mínimo (\$/h) para 15 unidades geradoras
algoritmo genético [10]	32514
nuvem de partículas [1]	32506,3
programação quadrática [8]	32506,14
IAEIQ	32451,8511