

DESPACHO ECONÔMICO COM PERDAS E SUAS VARIANTES UTILIZANDO O ALGORITMO BUSCA HARMÔNICA

EMANNUEL J. FERNANDES, JOSÉ A. DO NASCIMENTO, JOSÉ C. TELES

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia
Caixa Postal 6001, Campus do Pici, CEP 60455-760, Fortaleza-CE*

E-mails: emmanuel.fernandes@ymail.com, almeida@dee.ufc.br, teles@dee.ufc.br

Abstract — This work aims at presenting the application of a new search optimization algorithm called Harmonic Search, a metaheuristic technique that has inspiration in how the musicians improvise better melodies during a song performance, to the Economic Dispatch of Generation problem and main variants, including losses, prohibited operating zones, ramp rate limits and spinning reserve. Comparisons with other algorithms from the test cases in the literature demonstrate the effectiveness of this algorithm to provide solutions comparable with the state of the art algorithms in the area.

Keywords — Economic Dispatch, Harmony Search, Improved Harmonic Search, Metaheuristics, Optimization.

Resumo — Este trabalho objetiva apresentar a aplicação de um novo algoritmo de otimização denominado Busca Harmônica, uma técnica metaheurística que tem sua inspiração na maneira como os músicos improvisam melhores melodias durante a execução de uma música, na solução do problema do Despacho Econômico de Geração e suas principais variantes, dentre elas, as perdas da rede, zonas de operação proibidas, limites de rampa e reserva de giro. Comparações com outros algoritmos em casos de teste presentes na literatura comprovam a eficácia desse algoritmo em prover soluções comparáveis aos algoritmos estado da arte na área.

Palavras-chave — Despacho Econômico, Busca Harmônica, Busca Harmônica Melhorada, Metaheurísticas, Otimização.

Introdução

O problema do Despacho econômico de Geração (DE) é um problema de otimização e consiste em distribuir a demanda total de potência solicitada pela rede, junto com as perdas da rede, entre as unidades de geração disponíveis de forma que o custo total da geração seja minimizado. Variações do problema têm sido propostas na literatura com o intuito de tornar a modelagem dos geradores cada vez mais próxima das condições operativas reais.

Atualmente as técnicas que fazem uso de algum tipo de inteligência computacional, denominadas Metaheurísticas, têm suplantado as técnicas de otimização clássicas, conhecidas como Determinísticas, em vários aspectos como facilidade de desenvolvimento, robustez em seus resultados, convergência recorrente, facilidade de adaptação às variantes de qualquer problema, dentre outras. Tendo em vista essa tendência, o objetivo deste trabalho é apresentar um algoritmo recente e promissor, denominado Busca Harmônica, na resolução do problema do despacho e variações.

O DE é um problema amplamente estudado e com uma bibliografia de longa data. Chowdhury e Rahnman [1] traz um compêndio de todos os trabalhos publicados entre 1977 até 1988. Wong e Fung [2] introduz uma das primeiras técnicas de inteligência computacional na abordagem do problema do despacho, o Simulated Annealing (SA). O método apresentava a facilidade de incorporar restrições, a garantia de uma solução exata embora possa não ser a solução ótima do problema sendo capaz de acomodar outras características nas funções de custo sem impedimentos de complexidade matemática. Fatores que levaram os pesquisadores a dar maior atenção aos métodos de inteligência artificial a partir de então. Gaing [3] incluiu várias características não-lineares dos geradores como taxas limites de rampa, zonas de operação proibidas e funções de custo não-suaves com uma abordagem heurística nova baseada na simulação do comportamento de sistemas sociais simplificados, o algoritmo Particle Swarm. Os métodos propostos foram capazes de promover soluções de qualidade aos casos teste utilizados.

1 Formulação do problema do Despacho econômico de Geração

Uma solução para o problema do despacho consiste em descobrir a potência de todos os geradores disponíveis que levam o custo do despacho ao mínimo, visto que cada gerador tem uma função de custo associada ao seu nível de geração. Uma função de custo quadrática típica seria na forma da seguinte equação:

$$F_i(P_{Gi}) = a + bP_{Gi} + cP_{Gi}^2, \quad (1)$$

onde P_{Gi} é a saída de potência da i -ésima unidade, e a , b e c são os coeficientes da função de custo.

Uma vez o despacho disponível para todos os geradores da rede num dado tempo, ao menos um gerador se mantém acomodando-se às variações de demanda da rede, o gerador de regulação ou balanço.

1.1 Modelo do Despacho Econômico Básico

Considerando um sistema de potência e n geradores prontos para o despacho, o custo total de produção é dado por:

$$F_C(P_G) = \sum_{i=1}^n F_i(P_{Gi}), \quad (2)$$

onde P_G é o vetor com potências de saída de todas unidades. Se as perdas da rede não são levadas em consideração, ou são consideradas uma constante somada a demanda da carga, que é o Despacho Básico, então, todos os geradores devem contribuir com potência para suprir a demanda total, ou seja

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} = P_D^{Total}. \quad (3)$$

1.2 Modelo do Despacho Econômico Clássico

Todo sistema de potência apresenta o efeito das perdas de energia nas linhas de transmissão e distribuição. Quanto maior e mais interconectado o sistema, onde a potência é transmitida através de longas distâncias com baixa densidade de carga, maior será o efeito das perdas nas linhas de transmissão.

A inclusão das perdas é feita por uma fórmula aproximada, conhecida por Fórmula de Perdas de Kron, segundo Lukman et al. [4], e também conhecida por Fórmula de Perdas pela Matriz B, segundo Wood et al. [5], descrita na equação a seguir:

$$P_{Perdas} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} + \sum_{i=1}^n B_{0j} P_{Gj} + B_{00}, \quad (4)$$

com B_{ij} , B_{0j} e B_{00} denotando as matrizes de perdas da rede.

O problema do despacho econômico clássico consiste, novamente, em minimizar o custo total dado na Equação (1), satisfazendo a nova equação do balanço de potência considerando as perdas:

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} = P_D^{Total} + P_{Perdas}, \quad (5)$$

onde P_D^{Total} é a demanda de potência total da rede.

2 Inclusão de outras Restrições no Problema

Uma modelagem mais realista e precisa das unidades geradoras reais deve incluir várias peculiaridades operativas ao problema, como zonas de operação proibidas, limites de rampa e reserva de giro.

2.1 Restrição do Limite Mínimo e Máximo de Geração

A restrição do limite mínimo reside no fato de que uma unidade para começar a produzir potência necessita já estar aquecida e consumindo certa quantidade de combustível, estando então apta a entregar sua quantidade mínima de potência. A restrição do limite máximo de potência refere-se a uma operação instável e forçada das partes mecânicas da máquina devido a trepidação e aquecimento excessivos quando opera além de certo limite de geração.

As restrições de desigualdade referentes aos limites máximo/mínimo de geração de cada unidade são dadas por:

$$P_{Gi,mín} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,máx} \quad (6)$$

2.2 Zonas de Operação Proibidas

As zonas de operação proibida são impostas pelas características operativas do gerador ou de equipamentos auxiliares a eles, tais como caldeiras, bombas de alimentação, ou outras, conforme Orero (6). Existe ainda as tais zonas devido a características de ponto de válvula não modeláveis, não operando-se a unidade em tais regiões, segundo Yalcinoz (7). Portanto, as zonas possíveis de operação, estratificando o espaço de busca de cada gerador com n_i zonas proibidas, são descritas por:

$$\begin{aligned} P_{Gi,mín} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi,inf}^1 \\ P_{Gi,sup}^{j-1} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi,inf}^j, \quad j = 2, 3, \dots, n_i \\ P_{Gi,sup}^{n_i} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi,máx} \end{aligned} \quad (7)$$

2.3 Limites de Rampa

Devido a aspectos construtivos, é fato que a mudança no nível de geração de um estado de despacho para outro não ocorre instantaneamente. As variações na potência de saída de uma unidade geradora ocorrem continuamente e cada unidade geradora tem valores máximos de acréscimo e de decréscimo de potência por hora, os limites de rampa, conforme a expressão abaixo:

$$\text{máx}(P_{Gi,mín}, P_{Gi}^0 - DR_i) \leq P_{Gi} \leq \text{mín}(P_{Gi,máx}, P_{Gi}^0 + UR_i), \quad (8)$$

onde P_{Gi}^0 é o despacho atual, DR_i e UR_i são limites de decréscimo e acréscimo de potência por hora.

2.4 Reserva de Giro

Caso uma falha ou falta em alguma unidade geradora ocorra, o sistema poderá suprir a energia que não está mais disponível através da elevação da geração em outras unidades da rede que foram deixadas propositalmente com folgas suficientes em relação ao limite máximo de geração, a soma das reservas de giro de cada unidade compõe a reserva de giro total. Segundo Wang (8), essa restrição de segurança pode ser expressa matematicamente como:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in \Psi} S_i &> S_R \quad \text{onde} \\ S_i &= \text{mín}\{(P_{Gi,máx} - P_{Gi}), S_{i,máx}\} \vee i \in (\Psi - \psi) \\ S_i &= 0 \vee i \in \psi \end{aligned} \quad (9)$$

onde S_R e S_i são as reservas total e unitária, Ψ é o conjunto de todas as unidades despacháveis e ψ o das unidades que compõem a reserva de giro.

3 Algoritmo de Busca Harmônica

O algoritmo de otimização Busca Harmônica, criado por Geem et al. [9], tem o seguinte slogan: “Um processo de busca pela melhor harmonia musical”. Vejamos a descrição do algoritmo HS e sua aplicação. Em qualquer problema de otimização, existe um conjunto de variáveis, que serão os instrumentos artificiais dos músicos, que precisam ser combinadas para a obtenção da solução ótima global, a harmonia perfeita. Inicializa-se uma memória, chamada de memória harmônica (HM), que é preenchida com soluções possíveis para o problema, imitando o conjunto de notas que os músicos já tem em mente antes da execução da música. Na busca por uma melhor solução pode-se tentar uma nova solução considerando combinações entre valores das variáveis que estão na HM, com ou sem ajustes, ou tentar novas combinações, semelhante a improvisação feita pelos músicos reais. Logo em seguida avalia-se essa nova solução através da função objetivo do problema verificando se é melhor do que qualquer das soluções presentes na HM, em caso positivo substitui-se a solução anterior pela nova. Portanto, percebe-se que a possibilidade de se encontrar novas soluções cada vez melhores cresce com o número de iterações, pois a HM vai sendo preenchida por soluções cada vez melhores, ocasionando a convergência do algoritmo.

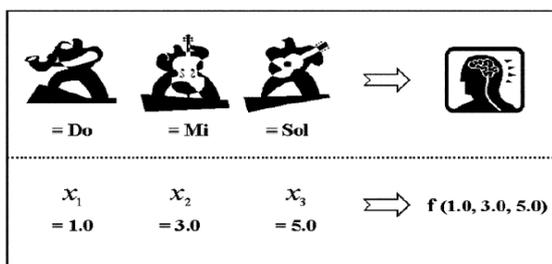


Figura 1. Improvisação musical e a Improvisação do algoritmo.

A Figura 1 mostra um comparativo entre uma improvisação feita pelos músicos e uma improvisação feita pelo algoritmo de otimização Busca Harmônica. Os músicos improvisam uma combinação das notas Dó e Mi com o acorde Sol e avaliam na mente se a combinação foi boa, o desenvolvedor da técnica chama esse processo de estimação estética. O algoritmo apresenta uma solução, [1.0, 3.0, 5.0] , e a avalia na função objetivo para verificar se ela é melhor do que uma das anteriormente obtidas.

Vale ressaltar que existem três formas de um músico improvisar um acorde ou nota durante o processo de improvisação, que é gerar uma nova solução, a seguir:

- 1) Tocar uma nota extraída de sua memória, ou da HM no caso do algoritmo, pois já existem garantias de que ela se encaixa ao problema em questão;
- 2) Tocar uma nota adjacente a uma nota presente em sua memória fazendo uso das escalas musicais. No caso do algoritmo, isso é feito de um valor extraído da HM, porém ajustado matematicamente;
- 3) Tocar uma nota completamente aleatória, porém pertencente ao tom da música. Ou seja, o algoritmo gera um valor aleatório para a variável, mas sendo um valor que é possível no atendimento às restrições do problema.

Observe o fluxograma do algoritmo básico na Figura 2 no qual são apresentados os principais passos do método de Busca Harmônica.

3.1 Algoritmo de Busca Harmônica Melhorado

O algoritmo de busca harmônica melhorado (IHS) foi desenvolvido por Mahdavi et al [10], que propõem uma melhoria substancial no algoritmo original pois melhora a exploração no início da busca e refina as soluções no processo final de convergência.

Os parâmetros PAR (probabilidade de ajuste de notas) e bw (passo de ajuste de nota) ajudam o algoritmo a encontrar soluções globalmente e localmente melhores, respectivamente. O IHS propõe varia-los dinamicamente, no decorrer das iterações, dentro seus limites mínimo e máximo, para os parâmetros PAR e bw, respectivamente, de acordo com as seguintes equações:

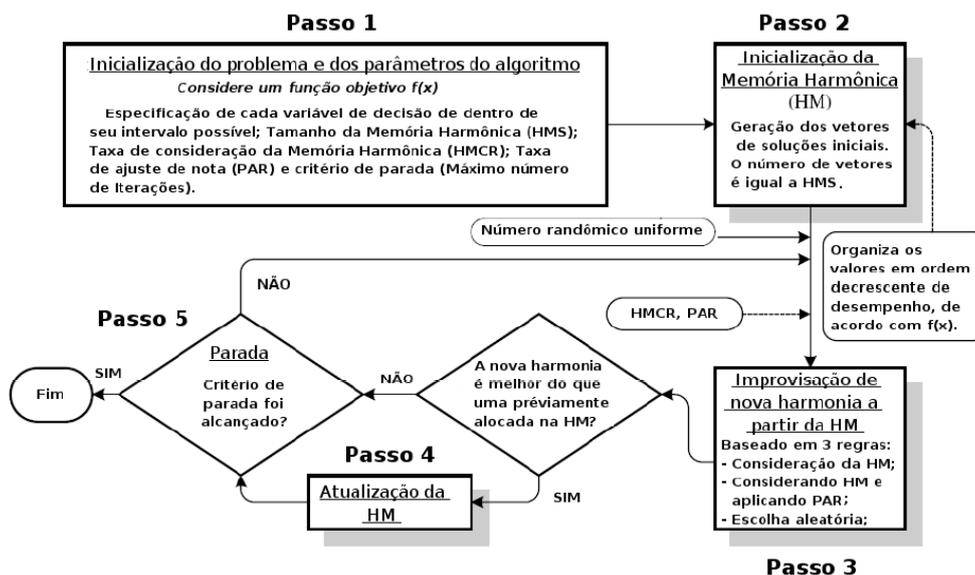


Figura 2. Algoritmo de busca harmônica básico.

$$PAR(gn) = PAR_{\min} + (PAR_{\max} - PAR_{\min}) \frac{gn}{NI}, \quad (10)$$

$$bw(gn) = bw_{\max} e^{-L \frac{gn}{NI}} \quad (11)$$

onde $L = \ln(bw_{\min} / bw_{\max})$, gn é o número da iteração atual e NI o total delas. Uma análise das expressões revela que enquanto PAR cresce linearmente, bw decresce exponencialmente.

De uma forma resumida, o algoritmo pode ser dividido em dois procedimentos: Inicialização e Iterações. A inicialização abrange os Passos 1 e 2 da Figura 2, enquanto que as iterações compreendem os Passos 3, 4 e 5 da mesma ilustração.

No passo 1 são fornecidos os dados do caso de teste e ajustados os valores das variáveis do algoritmo. No passo 2 a HM é inicializada com vetores solução que satisfaçam todas as restrições do problema. O balanço de potência é satisfeito através do uso do artifício do gerador de balanço, retirado do artigo de Tippayachai et al [11]. Nessa abordagem define-se um gerador de referência, P_R , em nosso caso o gerador com maior amplitude de geração, ou seja, maior valor de $(P_{Gi,\max} - P_{Gi,\min})$.

A fórmula das perdas da rede, conforme visto na Equação (4), é função da geração de todas as unidades, e pode ser reescrita em função do gerador de balanço, obtendo-se a seguinte equação:

$$AP_R^2 + (B-1)P_R + P_D - \sum_{i=1, i \neq R}^N P_{Gi} = 0. \quad (12)$$

Observa-se que essa equação é quadrática na variável P_R , portanto a saída de potência da unidade de balanço é a solução da referida equação. Maiores detalhes dessa abordagem são apresentados na referência [11].

Uma melhoria proposta pelo presente trabalho foi a variação dinâmica da HMCR. Considerando mais a diversificação das soluções, adotamos uma HMCR menor no início das iterações, e posteriormente, no decorrer das iterações, a HMCR varia de forma crescente até o seu limite máximo, ou seja, faz uso da mesma Equação (10), apenas substituindo PAR por $HMCR$.

4 Simulações e Resultados

Nessa seção são apresentadas simulações computacionais considerando dois sistemas teste para avaliar o desempenho do algoritmo proposto, são eles:

Caso 1) Sistema de 6 geradores, limites de rampa e zonas proibidas. O número de zonas de operação proibidas estão presentes no regime operacional de todos os 6 geradores. Os dados desse caso teste, inclusive matrizes de perdas da rede, estão disponíveis no artigo descrito por Gaing [3].

Caso 2) Sistema de 15 geradores, zonas proibidas e reserva de giro. Temos um número maior de geradores e a consideração das reservas de giro individuais de cada um deles para compor a reserva de giro do sistema. O caso está descrito no artigo de El-Gallad et al [12], com os dados presentes no mesmo artigo. O artigo traz dados dos geradores, zonas de operação proibidas e limites máximos de ociosidade utilizados como reserva de giro para cada unidade geradora.

4.1 Resultados para o Caso 1

Os parâmetros do HS foram estabelecidos como: tamanho da HM, $HMS = 12$ (empiricamente, o dobro do número de geradores), taxa de consideração da HM, $HMCR = 0.90$, taxa de ajuste de notas, $PAR_{\min} = 0,30$ e $PAR_{\max} = 0,99$, intervalo de ajuste de notas, $BW_{\min} = 0,1$ e $BW_{\max} = 10$, número de improvisações, $NI = 2000$, demanda de potência de 1263 MW e potência base de 100MVA, devido as perdas.

Os resultados do teste do sistema utilizando o algoritmo HS foram comparados aos resultados obtidos pelo autor em seus dois algoritmos, AGE e PSO, desenvolvidos pelo mesmo com o propósito de contrastar as soluções. Os resultados estão expostos na tabela 1. Os três algoritmos conseguiram contornar a restrição dos limites de rampa e das zonas de operação proibidas. Porém, a característica principal que deve ser enfatizada numa simulação computacional de despacho é a capacidade do algoritmo em encontrar a solução de custo mínimo sem desprezar as restrições do problema. Portanto, ao ser realizada a comparação do PSO com o HS, percebe-se que os mesmos tiveram habilidade suficiente para rastrear a solução ótima global, porém o HS implementado neste trabalho apresentou uma sutil vantagem devido a respeitar rigorosamente o balanço de potência, vide última linha da Tabela 1, e chegar ao custo mínimo de 15449,899536 unidades monetárias por hora (u.m/h).

4.2 Resultados para o Caso 2

O algoritmo desenvolvido por El-Gallad et al [12] apresentou uma limitação severa, pois teve que definir a priori a potência de saída de alguns geradores e comprometer a sobra de sua capacidade no atendimento da reserva de giro total do sistema. O autor do artigo fixou a saída das unidades geradoras 14 e 15 em 15MW para liberar o restante da capacidade desses geradores, 80MW, para compor a reserva de giro. O algoritmo desenvolvido neste artigo, HS, não fará essa limitação, não despachando nenhuma unidade a priori, nem pré-allocando reservas de giro.

Os parâmetros do HS foram estabelecidos como: tamanho da HM, HMS = 30, taxa de consideração da HM, HMCRmín = 0,75 e HMCRmáx = 0,95, taxa de ajuste de notas, PARmin = 0,01 e PARmax = 0,99, intervalo de ajuste de notas, BWmin = 0,01 e BWmax = 10, número de improvisações, NI = 5000, demanda de 2650 MW e reserva girante de 200MW.

Dessa maneira percebe-se, da comparação dos resultados presentes na Tabela 2, que os dois algoritmos, PSO e HS, foram competentes o suficiente para rastrear a mesma solução ótima. Ambos os algoritmos obtiveram valores muito próximos para as saídas de cada um dos geradores sob despacho. O HS foi o mais completo em seu resultado, visto que obteve erro nulo no atendimento a restrição do balanço de geração, não teve nenhuma unidade geradora previamente despachada, e nenhuma pré-alocação de reserva de giro.

Tabela 1. Resultados para o caso de teste 1.

P (MW)	AGE	PSO	HS
P_1	474,8066	447,4970	447,490638
P_2	178,6363	173,3221	173,307038
P_3	262,2089	263,4745	263,445350
P_4	134,2826	139,0594	139,072903
P_5	151,9039	165,4761	165,489678
P_6	74,1812	87,1280	87,152577
$\sum P_i$	1276,03	1276,01	1275,958186
P_{Perdas}	13,0217	12,9584	12,958186
Custo (u.m/h)	15459,0	15450,0	15449,899536
P_D^{calc}	1263,0083	1263,0516	1263,000000

5 Conclusão

A excelência da aplicação do algoritmo de busca harmônica ao problema do despacho e suas variantes deve-se principalmente a facilidade de implementação do mesmo, por ser, dentre outros fatores, um algoritmo estocástico e metaheurístico, por prover robustez em seus resultados devido a obtenção de resultados compatíveis ao estado-da-arte em todos os casos de teste abordados, e a escalabilidade do mesmo graças a sua simplicidade, boa capacidade exploratória do espaço de busca e refinamento final das soluções, isso sem violar nenhuma das restrições impostas pelo problema.

Tabela 2. Resultados para o caso de teste 3.

P (MW)	PSO	HS	S_i^{HS}
P_1	449,208	448,3717	6,6282
P_2	450	450,0791	0
P_3	129,999	129,9959	0,0040
P_4	129,999	129,9976	0,0023
P_5	335,001	335,0263	0
P_6	455,787	456,5295	0
P_7	464,998	464,9839	0,0160
P_8	60,002	60,0024	50
P_9	25	25,0008	30
P_{10}	20	20,0081	30
P_{11}	20	20,0001	20
P_{12}	55,002	55,0036	0
P_{13}	25	25,0000	20
P_{14}	15	15,0003	39,9996
P_{15}	15	15,0000	39,9999
$\sum P_i$	2649,996	2650,0000	236,6502
Custo (u.m/h)	32545	32545,052	-
Erro (KW)	4	0,0	-

6 Referências Bibliográficas

- [1] Chowdhury, B. Hh.; Rahnman, S. “A review of recent advances in economic dispatch”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 1248-1259, November 1990.
- [2] Wong, K.P.; Fung, C.C. “Simulated annealing based economic dispatch algorithm”. IEE Proceedings-C, Vol. 140, No. 6, pp. 509-515, November 1993.
- [3] Gaing, Z.-L. “Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, N° 3, pp. 1187-1195, August 2003.
- [4] Lukman, D.; Blackburn, T.R. “Modified Algorithm of Load Flow Simulation for Loss Minimization in Power Systems”. Power Electronics and Drive Systems. Proceedings. 4th IEEE International Conference on, pp. 84-88 vol.1, 2001.
- [5] Wood, A. J.; Wollenberg, B. F. Power Generation, Operation, and Control. Wiley-Interscience, 2 edition, 1996.
- [6] Orero, S.O. “Economic dispatch of generators with prohibited operating zones: a genetic algorithm approach”. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 143, No. 6, pp. 529-534, november 1996.
- [7] Yalcinoz, T.; Short, M.J. “Large-scale economic dispatch using an improved Hopfield Neural Network”. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 144, No. 2, pp 181-185, March 1997.
- [8] Wang, S.-K.; Chiou, J.-P.; Liu, C.-W. “Non-smooth/non-convex economic dispatch by a novel hybrid differential evolution algorithm”. IET Gener. Transm. Distrib., 1, (5), pp. 793–803, 2007.
- [9] Geem, Z. W.; Kim, J. H.; Loganathan, G.V. “A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search”. Simulation 2001, 76:2; pp. 60-68, 2001.

- [10] Mahdavi, M.; Fesanghary, M.; Damangir, E. “An improved harmony search algorithm for solving optimization problems”. *Applied Mathematics and Computation* 188, pp. 1567–1579, 2007.
- [11] Tippayachai, J.; Ongsakul, W.; Ngamroo, I. “Parallel Micro Genetic Algorithm for Constrained Economic Dispatch”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, N° 3, pp. 790-797, August 2002.
- [12] El-Gallad, A.; El-Hawary, M.; Sallam, A., Kalas, A. “Swarm Optimizer For Constrained Economic Dispatch With Prohibited Operating Zones”. *Proceedings of the IEEE Canadian Conference On Electrical & Computer Engineering*, pp. 78-81, 2002.