

# 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: [emannuel.fernandes@ymail.com](mailto:emannuel.fernandes@ymail.com), [almeida@dee.ufc.br](mailto:almeida@dee.ufc.br), [teles@dee.ufc.br](mailto:teles@dee.ufc.br)*

**Abstract**— This work aims to present 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, in solving the Economic Dispatch of Generation problem and main variants, including losses, valve-point effects, 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, pontos de válvula, 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.

## 1 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 artificial, denominadas Metaheurísticas, têm suplantado as técnicas de otimização clássicas, conhecidas como Determinísticas, em vários aspectos como facilidade de desenvolvimento, robustez em seus resultados, convergência garantida, 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 (1) traz um compêndio de todos os trabalhos publicados entre 1977 até 1988.

Wong (2) introduz uma das primeiras técnicas de inteligência artificial 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.

Walters (3) explora o uso de Algoritmos genéticos na abordagem ao problema com a inclusão de uma melhoria na modelagem dos geradores, antes de difícil solução pelas técnicas convencionais, os pontos de válvula.

Yalcinoz (4) apresenta melhorias no uso de redes neurais para abordar o problema do despacho em grandes proporções, com um número elevado de geradores. Os resultados mostraram que a técnica foi eficiente na abordagem do problema do despacho clássico de grande porte.

Gaing (5) 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. O método proposto foi capaz de promover soluções de qualidade aos casos teste utilizados.

## 2 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 equação 1.

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

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 num dado intervalo de tempo, ao menos um gerador se mantém acomodando-se às variações de demanda da rede, o gerador de regulação ou balanço.

### 2.1 Modelo do Despacho Econômico Básico

Considerando um sistema de potência e  $n$  geradores prontos para o despacho, o custo total de produção é dado pela equação 2.

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

$P_G$ , 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, veja equação 3.

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

### 2.2 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 (6), e também conhecida por Fórmula de Perdas pela Matriz B, segundo Wood (7), descrita na equação 4.

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

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

O problema do despacho econômico clássico consiste, novamente, em minimizar o custo total, equação 1, satisfazendo a nova equação do balanço de potência, considerando as perdas, equação 5.

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

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

## 3 Inclusão de outras Restrições no Problema

Para considerar uma modelagem mais realista e precisa do comportamento das unidades geradoras reais, várias peculiaridades operativas são incorporadas ao problema do despacho. Algumas características são: influência dos pontos de válvula, zonas de operação proibidas, limites de rampa e reserva de giro.

### 3.1 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 e mínimo de geração de cada unidade são mostradas na equação 6.

$$P_{Gi,min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,max} \quad (6)$$

### 3.2 Pontos de Válvula

Quando em operação, se é necessário aumentar a potência de saída de uma unidade termelétrica, uma maior quantidade de vapor deve ser injetada na turbina. Os efeitos que ocorrem quando se inicia a abertura de válvulas de admissão de vapor na turbina produzem ondulações na função de custo da unidade. Pontos onde ocorrem a abertura dessas válvulas são conhecidos como “pontos de válvula” (PV).

A modelagem da função de custo com influência de múltiplos PV é feita mediante a inclusão de um termo senoidal na função de custo de cada gerador. A nova função de custo será conforme a equação 7.

$$\hat{F}_C(P_G) = F_C(P_{Gi}) + \alpha_i |e_i \text{sen}(f_i(P_{Gi,min} - P_{Gi}))| \quad (7)$$

onde  $\alpha_i \in \{0,1\}$  indica se existe ou não PV's, e  $e_i$ ,  $f_i$  modelam a forma da influência dos PV's.

### 3.3 Zonas de Operação Proibidas

As zonas de operação proibidas são impostas pelas características operativas do gerador ou de equipamentos auxiliares a eles, tais como caldeiras, bombas de alimentação, dentre outras, conforme Orero (8). Existe ainda as tais zonas devido a características de ponto de válvula não modeláveis, não operando a unidade em tais regiões, segundo Yalcinoz (4).

Portanto, as zonas possíveis de operação ficarão descritas na equação 8, estratificando o espaço de busca de cada gerador com  $n_i$  zonas proibidas.

$$P_{Gi,mín} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,inf}^1$$

$$P_{Gi,super}^{j-1} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,inf}^j \rightarrow j = 2,3,\dots,n_i \quad (8)$$

$$P_{Gi,super}^{n_i} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,máx}$$

### 3.4 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. Os limites de rampa são modelados como na equação 9.

$$\text{máx}(P_{Gi,mín}, P_{Gi}^0 - DR_i) \leq P_{Gi} \leq \text{mín}(P_{Gi,máx}, P_{Gi}^0 + UR_i) \quad (9)$$

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

### 3.5 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 (9), essa restrição de segurança pode ser expressa matematicamente pela equação 10.

$$\sum_{i \in \Psi} S_i > S_R \text{ onde}$$

$$S_i = \text{mín}((P_{Gi,máx} - P_{Gi}), S)$$

$$S_i = 0 \quad \forall i \in \Psi$$

$S_R$  e  $S_i$  são as reservas total e unitária,  $\Psi$  é o conjunto de todas as unidades despacháveis e  $\Psi$  o das unidades que comporão a reserva de giro.

## 4 Algoritmo de Busca Harmônica

O algoritmo de otimização Busca Harmônica, criado por Geem (10), tem o seguinte slogan: "Um processo de busca pela melhor harmonia musical".

Vejam 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.

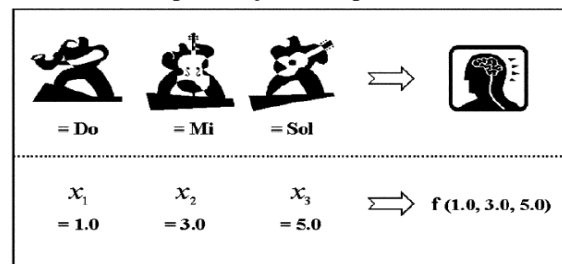


Figura 1. Improvisação musical e a Improvisação do algoritmo.

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.

A figura 1 mostra um comparativo entre uma

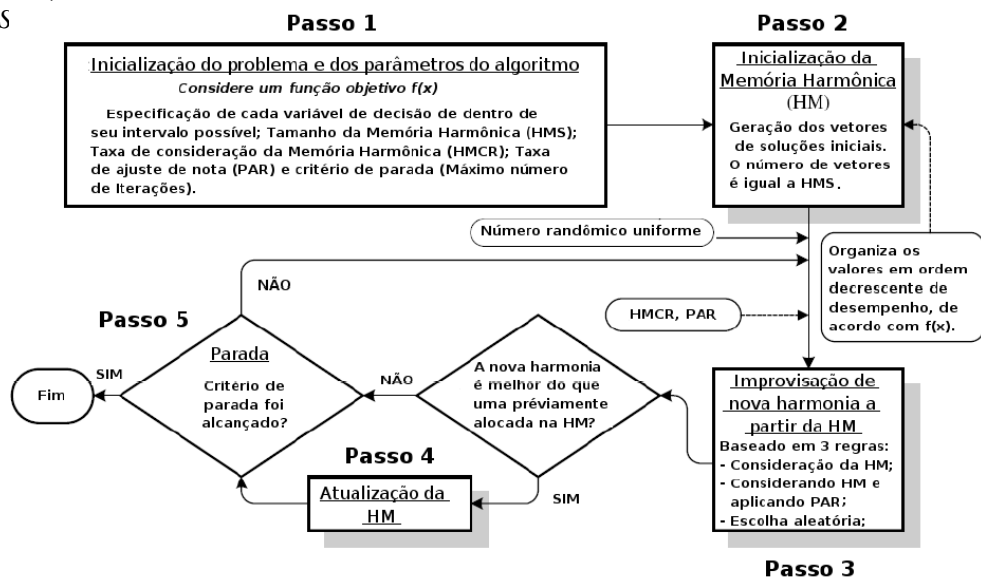


Figura 2. Algoritmo de busca harmônica Básico.

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 estimativa 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.

#### 4.1 Algoritmo de Busca Harmônica Melhorado

O algoritmo de busca harmônica melhorado (IHS) foi desenvolvido por Mahdavi et al (11). E propõe 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, dentre seus limites mínimo e máximo de acordo com as equações 11, para o PAR, e 12, para o bw.

$$PAR(gn) = PAR_{min} + (PAR_{max} - PAR_{min}) \frac{gn}{NI} \quad (11)$$

$$bw(gn) = bw_{max} e^{-\frac{L \cdot gn}{NI}} \quad \text{onde} \quad (12)$$

$$L = \ln\left(\frac{bw_{min}}{bw_{max}}\right)$$

$gn$  é o número da iteração atual e  $NI$  o total delas.

As duas expressões mostram 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 (12). 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 equação 13.

$$AP_R^2 + (B-1)P_R + P_D - \sum_{i=1, i \neq R}^N P_{Gi} = 0 \quad (13)$$

Observe 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 consulte a referência (12).

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 11, apenas substituindo PAR por HMCR.

## 5 Simulações e Resultados

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

**Caso 1)** Sistema de 6 barras/3 geradores e pontos de válvula. Os dados para este caso de teste são providos pelo clássico livro do Wood (7), páginas 31, 32, 112 e 117. O mesmo caso foi abordado por Walters (3), utilizando algoritmos genéticos, com a desconsideração das perdas da rede e a inclusão do efeito dos pontos de válvula.

**Caso 2)** 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 (5).

**Caso 3)** 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 (13), com os dados presentes no mesmo artigo. O artigo traz dados dos geradores, zonas de

Tabela 1. Resultados para o caso de teste 1.

| P (MW)               | AG     | HS                 |
|----------------------|--------|--------------------|
| $P_1$                | 300,0  | 449,221849         |
| $P_2$                | 400,0  | 251,040507         |
| $P_3$                | 150,0  | 149737642          |
| $\sum P_i$           | 850,0  | 850,000000         |
| <b>Custo (u.m/h)</b> | 8237,6 | <b>8228,810259</b> |
| <b>Tempo (s)</b>     | 16     | 22,51              |

operação proibidas e limites máximos de ociosidade utilizados como reserva de giro para cada unidade geradora.

### 5.1 Resultados para o Caso 1

No artigo original o autor (3) cita a inclusão das perdas da rede, porém não mostra nenhum resultado obtido para esse sistema com pontos de válvula e inclusão das perdas. Motivo pelo qual não foi feita tal análise aqui.

Os parâmetros do HS foram estabelecidos como: tamanho da HM,  $HMS = 6$  (sempre 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 850 MW.

Os resultados para esse caso de teste então descritos na tabela 1. A linha de custo mostra claramente que o Algoritmo genético, proposto pelo autor do artigo, desfoca da solução ótima global, e converge para uma solução um pouco inferior, um ótimo local. O mesmo artigo mostra que o AG converge com soluções que desrespeitam o balanço de potência, sendo punidas com uma função de

Tabela 2. Resultados para o caso de teste 2.

| 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   | <b>15449,899536</b> |
| $P_D^{calc}$  | 1263,0083 | 1263,0516 | <b>1263,000000</b>  |

penalização. O mesmo não acontece com o HS, visto que ele respeita o balanço de potência em todas as possíveis soluções demonstrando confiabilidade durante todo o processo, além do que o HS provê um refinamento da solução final, pois aproxima-se mais da solução ótima global.

### 5.2 Resultados para o Caso 2

Um caso com 6 unidades geradoras, zonas de operação proibidas presentes no regime operacional de todas elas e com os respectivos limites de rampa.

Os parâmetros do HS foram os mesmos do caso anterior, exceto o tamanho da HM,  $HMS = 12$ , a demanda de potência que é de 1263 MW e a potência base de 100MVA, dado devido a consideração das 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 2. 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 desrespeitar 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 2, e chegar ao custo mínimo de 15449,899536 unidades monetárias por hora (u.m/h).

### 5.3 Resultados para o Caso 3

O algoritmo desenvolvido por Gallad 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,  $HMCR_{min} = 0.75$  e  $HMCR_{max} = 0.95$ , taxa de ajuste de notas,  $PAR_{min} = 0.01$  e  $PAR_{max} = 0.99$ , intervalo de ajuste de notas,  $BW_{min} = 0.01$  e  $BW_{max} = 10$ , 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 3, que os dois

algoritmos, PSO e HS, foram competentes o suficiente para rastrear a solução ótima global. Ambos os algoritmos obtiveram valores muito próximos para as saídas de cada um dos geradores sob despacho. O PSO conseguiu ser infimamente superior, com um custo inferior apenas na casa dos centavos, porém com a desvantagem da violação, mesmo que pequena, da restrição do balanço de carga, gerando desconfiância na forma como o algoritmo chega ao mínimo.

O HS foi o mais completo em seu resultado, visto que rastreou o ótimo global, com 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, ainda assim chegou aos mesmos resultados do outro algoritmo sob análise.

## 6 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 que guarda diversas qualidades de algoritmos da atualidade, 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, tudo isso sem violar, em nenhuma iteração, as restrições mais variadas impostas pelo problema.

## Referências Bibliográficas

- [1] CHOWDHURY, B. H.; RAHRNAN, 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] WALTERS, D. C.; SHEBLE, G. B. "Genetic Algorithm solution of economic dispatch with valve point loading". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 1325-1332, August 1993;
- [4] 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;
- [5] GAING, Z.-L. "Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints". IEEE Transactions on

Tabela 3. 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  | <b>236,6502</b> |
| Custo (u.m/h) | 32545    | 32545,052  | -               |
| Erro (KW)     | <b>4</b> | <b>0,0</b> | -               |

Power Systems, Vol. 18, N° 3, pp. 1187-1195, August 2003;

- [6] 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;
- [7] WOOD, A. J.; WOLLENBERG, B. F. Power Generation, Operation, and Control. Wiley-Interscience, 2 edition, 1996;
- [8] ORERO, S.O.; 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;
- [9] 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;
- [10] GEEM, Z. W.; KIM, J. H.; Loganathan, G.V. "A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search". Simulation 2001, 76:2; pp. 60-68, 2001;
- [11] MAHDAVI, M.; FESANGHARY, M.; DAMANGIR, E. "An improved harmony search

algorithm for solving optimization problems”.  
Applied Mathematics and Computation 188, pp.  
1567–1579, 2007;

- [12] 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;
- [13] 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;