

Buscas Harmônicas para o Problema do Despacho Econômico de Energia Elétrica

Jeniffer Siebeneichler, Carolina Almeida, Richard Gonçalves
Universidade Estadual do Centro-Oeste - UNICENTRO
Departamento de Ciência da Computação
Guarapuava, Paraná 85015-430
Email: jsiebeneichler@gmail.com

Resumo—Este trabalho investiga o desempenho de quatro variantes da técnica Busca Harmônica na solução do problema do Despacho Econômico de Energia Elétrica. A Busca Harmônica é uma metaheurística inspirada na forma que os músicos empregam para encontrar a melhor harmonia para suas composições e tem sido empregada com sucesso em diferentes problemas de otimização. As versões investigadas são: Busca Harmônica Canônica, Busca Harmônica Melhorada, Busca Harmônica Melhor Global e Busca Harmônica Melhor Global Auto-adaptativa. São utilizados sistemas de teste com 13 e 40 geradores e que consideram o efeito de ponto de válvula. As quatro diferentes Buscas Harmônicas são comparadas entre si e a melhor delas é comparada com algoritmos da literatura. A melhor Busca Harmônica investigada obtém bons resultados, sendo a heurística que encontra os menores custos de produção para todos os sistemas de teste considerados.

I. INTRODUÇÃO

Alguns problemas complexos de otimização não são passíveis de serem resolvidos por métodos exatos, geralmente pelo alto custo computacional decorrente. Desse modo, o uso de técnicas de inteligência computacional [1] se tornam alternativas interessantes para a resolução de tais problemas. Dentre a gama de algoritmos de inteligência computacional pode-se destacar os Enxames de Partículas [2], a Evolução Diferencial [3], os Sistemas Imunológicos Artificiais [4] e a Busca Harmônica [5], a qual é o foco deste trabalho.

Um problema em particular que não pode ser resolvido com o uso de métodos exatos é o Despacho Econômico de Energia Elétrica (DEEL). O DEEL é um dos mais importantes problemas a ser resolvido durante o planejamento e operacionalização de um sistema de geração de energia elétrica [6]. O objetivo deste problema é minimizar o custo total de combustível de geradores de energia elétrica sujeito a restrições operacionais. Neste trabalho, as características de entrada e saída das unidades geradoras são inerentemente não-lineares e altamente multimodais devido ao efeito de ponto de válvula, que torna o problema mais complexo de ser resolvido.

Neste trabalho são implementadas quatro métodos baseados em Busca Harmônica (BH) para a solução do DEEL com efeito de ponto de válvula. A Busca Harmônica se inspira no processo de improvisação utilizados por músicos, em particular no *jazz*, para compor melodias e tem obtido bons resultados na solução de problemas de otimização. Neste trabalho são investigadas quatro variações da BH: Busca Harmônica Canônica (BH)[5], Busca Harmônica Melhorada

(BH_M)[7], Busca Harmônica Melhor Global (BH_G)[8] e Busca Harmônica Melhor Global Auto-adaptativa (BH_{GA})[9].

O restante do trabalho está organizado conforme segue. Na Seção II o problema do Despacho Econômico de Energia Elétrica é brevemente descrito. A Seção III apresenta os principais conceitos da Busca Harmônica. Os métodos investigados são descritos na Seção IV enquanto a Seção V apresenta os experimentos e os resultados obtidos com os algoritmos implementados, comparando-os com algoritmos da literatura. Finalmente, a Seção VI contém as conclusões e alguns apontamentos para trabalhos futuros.

II. DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA

O Despacho Econômico é um problema que ocorre no contexto da geração de energia elétrica. A finalidade do despacho econômico é minimizar o custo dos geradores de energia, considerando suas restrições. O problema é matematicamente descrito pela Equação 1.

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } F &= \sum_{j=1}^n F_j(P_j) \\ \text{sujeito a } \sum_{j=1}^n P_j - P_D &= 0 \quad \text{e} \\ P_j^{\min} &\leq P_j \leq P_j^{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

Onde $F_j(P_j)$ é o custo do j -ésimo gerador em custo/hora, P_j é a potência do j -ésimo gerador, n é o número de geradores, P_D é a demanda do sistema e P_j^{\min} e P_j^{\max} são os mínimo e máximo do j -ésimo gerador, respectivamente.

Para calcular o custo de cada unidade geradora sem considerar o efeito de ponto de válvula, usa-se a aproximação quadrática apresentada na Equação 2.

$$F_j(P_j) = a_j * P_j^2 + b_j * P_j + c_j \quad (2)$$

Onde, a_j , b_j e c_j são os coeficientes de custo do j -ésimo gerador.

Ao se considerar o efeito de ponto de válvula, o problema torna-se mais complexo devido à não-linearidade e multimodalidade introduzidas. A formulação do custo de cada gerador é então dada pela Equação 3.

$$F_j(P_j) = a_j * P_j^2 + b_j * P_j + c_j + |e_j * \sin(f_j * (P_j^{\min} - P_j))| \quad (3)$$

Onde, a_j , b_j , c_j , e_j e f_j são os coeficientes do j -ésimo gerador.

III. BUSCA HARMÔNICA

A Busca Harmônica (BH) é um algoritmo que imita a improvisação musical, onde os músicos tentam achar as notas de seus instrumentos que, juntas, formam um estado perfeito de harmonia [5]. Esse algoritmo pode explorar o espaço de busca para encontrar vetores de soluções (ou de harmonias) tanto para problemas discretos quanto contínuos.

A BH já foi utilizada com sucesso para resolver diversos problemas [10] e possui algumas variações, sendo as principais: a Busca Harmônica Canônica (BH)[5], a Busca Harmônica Melhorada (BH_M)[7], a Busca Harmônica Melhor Global (BH_G)[8] e a Busca Harmônica Melhor Global Autoadaptativa (BH_{GA})[9], as quais são investigadas no âmbito desse trabalho.

O pseudocódigo da Busca Harmônica é apresentado no Algoritmo 1. Ele é composto por três fases: inicialização da Memória Harmônica (*HM*) (linha 2), improvisação de uma harmonia (linha 4) e atualização da memória (linha 7) [5]. Sucintamente, a BH inicializa *HMS* harmonias aleatoriamente (inicialização) e depois improvisa uma nova harmonia por *NI* gerações (improvisação). A improvisação de uma nova harmonia corresponde à geração de uma nova solução. Se a nova solução for melhor que a pior harmonia armazenada na *HM*, a nova solução substitui a pior caso contrário nada ocorre (atualização da memória).

Algorithm 1 Busca Harmônica (BH)

```

1: função BH
2:    $HM = \mathbf{x}_i \in \Omega, i \in (1, \dots, HMS)$ 
3:   para  $t \leftarrow 0$  até  $NI$  faça
4:      $\mathbf{x}^{new} = \text{IMPROVISAÇÃO}(HM)$ 
5:      $\mathbf{x}^{worst} = \min_{\mathbf{x}_i} f(\mathbf{x}_i), \mathbf{x}_i \in HM$ 
6:     se  $f(\mathbf{x}^{new}) > f(\mathbf{x}^{worst})$  então
7:        $HM = (HM \cup \{\mathbf{x}^{new}\}) \setminus \{\mathbf{x}^{worst}\}$ 
8:     fim se
9:   fim para
10: fim função

```

A improvisação da BH é apresentada no Algoritmo 2, onde r, r_1, r_2 e r_3 são variáveis aleatórias uniformes no intervalo [0,1]. Os parâmetros da improvisação são: Taxa de Consideração da Memória Harmônica (*HMCR*), Taxa de Ajuste de Timbre (*PAR*) e Largura de Banda (*BW*). A improvisação também pode ser dividida em três fases: (1) consideração da memória (linha 4), onde o componente de uma harmonia existente na memória (k -ésima harmonia selecionada aleatoriamente) é copiado para a harmonia sendo gerada; (2) ajuste de timbre (linha 6), o qual perturba o componente selecionado e (3) seleção aleatória (linha 9), a qual gera um novo componente aleatoriamente [5], considerando ($x^{(U)}$) e ($x^{(L)}$), respectivamente, o limite superior e o limite inferior para cada componente.

A Busca Harmônica descrita até o momento é a versão clássica e será denominada Busca Harmônica Canônica (BH) no restante desse documento. A seguir serão descritas as demais variações da Busca Harmônica consideradas neste trabalho.

Algorithm 2 Função de Improvisação da Busca Harmônica

```

1: função IMPROVISAÇÃO(HM) :  $\mathbf{x}^{new}$ 
2:   para  $i \leftarrow 0$  até  $n$  faça
3:     se  $r_1 < HMCR$  então
4:        $\mathbf{x}_i^{new} = \mathbf{x}_i^k, k \in (1, \dots, HMS)$ 
5:     se  $r_2 < PAR$  então
6:        $\mathbf{x}_i^{new} = \mathbf{x}_i^{new} \pm r_3 \times BW$ 
7:     fim se
8:     senão
9:        $\mathbf{x}_i^{new} = \mathbf{x}_i^{(L)} + r \times (\mathbf{x}_i^{(U)} - \mathbf{x}_i^{(L)})$ 
10:    fim se
11:  fim para
12: fim função

```

A. Busca Harmônica Melhorada

A Busca Harmônica Melhorada (BH_M) é basicamente idêntica à BH, mas os valores de *PAR* e *BW* são adaptados ao longo da evolução. Para cada geração de harmonia, existirá um novo *PAR* e *BW*. Seus valores são calculados utilizando as Equações 4, 5 e 6.

$$PAR_{gn} = PAR_{min} + \frac{(PAR_{max} - PAR_{min})}{NI} * gn \quad (4)$$

Onde PAR_{min} é a taxa mínima de ajuste, PAR_{max} é a taxa máxima de ajuste, $PAR_{(gn)}$ é o *PAR* da geração atual, *NI* é o número máximo de gerações e *gn* é a geração atual.

$$BW_{(gn)} = BW_{max} \exp(c * gn) \quad (5)$$

$$c = \frac{\ln(\frac{BW_{min}}{BW_{max}})}{NI} \quad (6)$$

Onde BW_{min} é a largura de banda mínima, BW_{max} é a largura de banda máxima, $BW_{(gn)}$ é a *BW* da geração atual e os demais termos são como definidos anteriormente.

Deste modo o valor de *PAR* é incrementado de maneira linear ao longo das gerações enquanto o valor de *BW* é decrementado de maneira exponencial.

B. Busca Harmônica Melhor Global

A Busca Harmônica Melhor Global (BH_G) utiliza conceitos da Otimização por Enxame de Partículas, em particular o conceito de seguir o líder (melhor solução do enxame). Para isso, a etapa de ajuste de timbre é modificada de maneira a inserir componentes da melhor solução atual armazenada na Memória Harmônica na solução sendo improvisada. O parâmetro correspondente a Largura de Banda é eliminado e o valor de *PAR* é ajustado da mesma maneira que ocorre na BH_M. A Equação 7 apresenta o novo passo da improvisação.

$$\mathbf{x}_i^{new} = \mathbf{x}_k^{best}, k \in (1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

C. Busca Harmônica Melhor Global Auto-Adaptativa

A Busca Harmônica Melhor Global Auto-Adaptativa também considera a melhor harmonia durante a etapa de improvisação. Além disso, ela provê mecanismos de auto-adaptação dos parâmetros PAR e $HMCR$ e modifica a etapa de improvisação da BH. As novas versões das etapas de consideração de memória e de ajuste do timbre são apresentadas nas Equações 8 e 9. A adaptação do parâmetro BW ocorre de acordo com a Equação 10.

$$x_i^{new} = x_i^k \pm r \times BW, k \in (1, \dots, HMS), r \in U(0, 1) \quad (8)$$

$$x_i^{new} = x_i^{best} \quad (9)$$

$$BW(t) = \begin{cases} BW_{max} - \frac{BW_{max} - BW_{min}}{NI} & \text{if } t < NI/2, \\ BW_{min} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

Os parâmetros $HMCR$ e PAR são variáveis aleatórias com distribuição normal definidas nos intervalos $[0.9, 1]$ e $[0, 1]$, com desvio padrão (σ) igual a 0.01 e 0.05 e média (μ) igual a $HMCRm$ e $PARm$, respectivamente. A auto-adaptação dos valores de $HMCRm$ e $PARm$ ocorre a cada lp improvisações (onde lp é o período de aprendizagem) e são definidos como a média dos valores de $HMCR$ e PAR , respectivamente, armazenados ao longo de lp gerações. Apenas os valores que deram origem a harmonias que foram introduzidas na memória harmônica são armazenadas.

IV. MÉTODOS PROPOSTOS: BUSCAS HARMÔNICAS PARA O DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA

A seguir são descritas as Buscas Harmônicas para o Despacho Econômico de Energia Elétrica. As Buscas Harmônicas iniciam com a geração da Memória Harmônica (população) inicial. Cada indivíduo da população recebe um valor aleatório dentro do limite mínimo e máximo permitido para cada gerador. Em seguida, cada harmonia que não possui sua produção igual a demanda passa pela função de reparação (Algoritmo 3). Os parâmetros de entrada da função de reparação são: Solução (harmonia que será reparada); P^{min} e P^{max} , um vetor com a produção mínima e máxima, respectivamente, de cada gerador e Demanda (demanda a ser atendida).

A função de reparação é como segue: escolhe-se aleatoriamente um gerador. Se o gerador escolhido é capaz de absorver toda a diferença entre a energia demandada e a energia produzida, modifica-se o valor do gerador de maneira que isso ocorra e encerra-se o procedimento. Caso contrário, o gerador escolhido absorve o maior valor possível minimizando a diferença entre a energia demandada e a energia produzida ao máximo possível considerando apenas aquele gerador e repete-se esses passos até que a demanda seja atendida.

A seguir, cada harmonia é avaliada, ou seja, tem seus custos de produção calculados de acordo com as Equações 1 e 3. Na sequência o algoritmo entra em seu laço principal (Algoritmo 1, linhas 3 a 9). Neste laço, ocorrem as etapas de improvisação e atualização da Memória Harmônica.

Algorithm 3 Reparação

função REPARAÇÃO(Solução, P^{min} , P^{max} , Demanda) :
 SoluçãoReparada

Calcular diferença entre produção e Demanda

enquanto diferença == 0 **faça**

Sortear aleatoriamente um gerador i

se $P_i^{min} < (P_i + \text{diferença}) < P_i^{max}$ **então**

Adicionar diferença a P_i

Diferença recebe zero

fim se

se $(P_i + \text{diferença}) > P_i^{max}$ **então**

Calcular diferença-parcial, $P_i^{max} - P_i$

$P_i = P_i^{max}$

Subtrair diferença-parcial de diferença

fim se

se $(P_i + \text{diferença}) < P_i^{min}$ **então**

Calcular diferença-parcial, $P_i - P_i^{min}$

$P_i = P_i^{min}$

Somar diferença-parcial a diferença

fim se

fim enquanto

fim função

O passo de improvisação varia de acordo com a Busca Harmônica adotada e é conforme descrito na Seção III para cada uma das buscas. Ao término da improvisação uma nova harmonia é gerada, a qual deve passar pela função de reparação (Algoritmo 3) para garantir que a demanda de produção é atendida. Após reparada, a nova harmonia é avaliada.

Então ocorre a etapa de atualização da Memória Harmônica. Nessa etapa a nova harmonia é comparada com a pior harmonia armazenada na HM e caso ela seja melhor é inserida na memória enquanto a pior harmonia é eliminada; caso contrário nada ocorre.

Finalmente, a execução do algoritmo se encerra quando o critério de parada adotado é atingido. Neste trabalho, um número máximo de gerações é utilizado como critério de parada.

V. RESULTADOS

Três instâncias de teste do Despacho Econômico de Energia Elétrica foram adotadas:

- **Primeiro Estudo de Caso:** considera 13 geradores com efeito de ponto de válvula e demanda de 1800 MW [3]. Este problema do despacho econômico de energia possui vários mínimos locais e, portanto, seu mínimo global é difícil de ser determinado [11].
- **Segundo Estudo de Caso:** é semelhante ao estudo de caso anterior, com os mesmos coeficientes de custo e número de geradores. A diferença entre os dois estudos de caso é que o primeiro adota uma demanda de 1800 MW enquanto o segundo possui uma demanda de 2520 MW [11].
- **Terceiro Estudo de Caso:** considera 40 geradores com efeito de ponto válvula e demanda de 10500 MW [12]. O espaço de soluções deste estudo de caso também contém múltiplos ótimos locais [13].

Tabela I. PARÂMETROS DAS BUSCAS HARMÔNICAS

	HMCR	PAR	BW
BH	0.95	0.10	$0.01 * \Delta_x$
BH _M	0.95	$PAR_{min} = 0.01$ $PAR_{max} = 0.20$	$BW_{min} = 0.0001$ $BW_{max} = 0.05 * \Delta_x$
BH _G	0.95	$PAR_{min} = 0.01$ $PAR_{max} = 0.40$	-
BH _{GA}	0.95	0.90	$BW_{min} = 0.001$ $BW_{max} = 0.10 * \Delta_x$

Foram realizadas 50 execuções independentes (com populações iniciais diferentes) de cada algoritmo nos três casos de testes considerados. Os algoritmos das Buscas Harmônicas para DEEL foram implementados na linguagem C++ e executados em uma máquina Intel Core I5 2.3 GHz e 4 GB de RAM com sistema operacional Linux. Para todos os experimentos, o tamanho da população foi igual a dez vezes o número de geradores (10n) conforme sugerido em [14] e o critério de parada adotado foi setenta mil vezes o número de geradores (70000n) iterações. Os demais parâmetros das Buscas Harmônicas investigadas são apresentados na Tabela I¹, onde Δ_x corresponde à amplitude do espaço de busca ($x^{(U)} - x^{(L)}$, ou seja, o limite superior menos o limite inferior para cada componente).

O restante da presente seção é organizada como segue. Na subseção V-A, as quatro versões de Busca Harmônica são comparadas entre si considerando os três casos de teste e a melhor versão é determinada. Na sequência, nas subseções V-B, V-C e V-D, a melhor versão analisada da Busca Harmônica, BH_G, é comparada com os resultados reportados na literatura.

A. Comparação entre as Buscas Harmônicas

Esta subseção apresenta a comparação entre as diferentes Buscas Harmônicas nos três casos de teste analisados. A Tabela II mostra que, para o primeiro estudo de caso, a Busca Harmônica Melhorada (BH_M) apresenta os melhores valores para o menor custo, para o custo médio e para o desvio padrão. A Busca Harmônica Melhor Global (BH_G) obtém os melhores valores para o menor e maior custos. No geral, a BH_M possui os melhores resultados para este caso de teste, sendo que o desempenho da BH_G pode ser considerado satisfatório.

Tabela II. PRIMEIRO ESTUDO DE CASO - 13 GERADORES E DEMANDA DE 1800 MW

Métrica	BH	BH _M	BH _G	BH _{GA}
Mínimo	17960,36623	17960,36612	17960,36612	18042,19535
Média	17963,16337	17961,71774	17964,67278	18119,64623
Máximo	17973,41001	17976,51925	17969,48016	18181,29409
Desvio Padrão	4,071926126	3,944172701	4,281735202	30,32352078

Tabela III. SEGUNDO ESTUDO DE CASO - 13 GERADORES E DEMANDA DE 2520 MW

Métrica	BH	BH _M	BH _G	BH _{GA}
Mínimo	24164,05187	24164,05874	24164,05083	24667,88517
Média	24164,18001	24164,66124	24164,07040	24742,25647
Máximo	24168,86420	24171,60536	24164,17229	24785,54715
Desvio Padrão	0,695248434	1,269950304	0,028134083	27,50031755

Para o segundo e para o terceiro estudos de caso, conforme pode ser observado nas Tabelas III e IV, a Busca Harmônica Melhor Global (BH_G) apresenta os melhores valores para todas as métricas consideradas (menor custo, custo médio,

¹Os parâmetros adotados correspondem a valores sugeridos na literatura.

Tabela IV. TERCEIRO ESTUDO DE CASO - 40 GERADORES E DEMANDA DE 10500 MW

Métrica	BH	BH _M	BH _G	BH _{GA}
Mínimo	121494,7576	121877,2981	121411,9013	127308,0884
Média	121688,8353	122090,7853	121484,7196	127742,6332
Máximo	121754,3312	122358,2306	121599,3648	128400,2436
Desvio Padrão	83,36641405	96,12031247	28,30436081	332,6356625

maior custo e desvio padrão) e a Busca Harmônica Canônica (BH) possui os segundo melhores resultados para ambas as instâncias.

Ao se considerar os resultados agregados de todos os casos de teste, pode se afirmar que a Busca Harmônica Global obteve o melhor desempenho. Portanto, a BH_G será utilizado na comparação com a literatura nas subseções seguintes. Contudo, devido ao seu bom desempenho no primeiro caso de teste, a Busca Harmônica Melhorada também será considerada na comparação com a literatura para esse caso de teste em particular. O desempenho ruim da BH_{GA} provavelmente esta correlacionado ao método de adaptação dos seus parâmetros.

B. Resultados para o Primeiro Estudo de Caso - 13 Geradores e Demanda de 1800 MW

A Tabela V apresenta a comparação dos resultados obtidos pelos algoritmos propostos neste trabalho (BH_G e BH_M) com outras abordagens recentes da literatura.

Tabela V. RESULTADOS PARA O PRIMEIRO ESTUDO DE CASO. CUSTOS EM US\$

Caso com 13 geradores e demanda de 1800 MW				
Método	Custo Mín	Custo Médio	Custo Máx	Desvio
BH_G	17960,36	17964,67	17969,48	4,28
BH_M	17960,36	17961,71	17976,51	3,94
ICIS [15]	17960,36	17968,59	17969,50	2,44
DEC-SQP [3]	17963,94	17973,13	17984,81	1,97
EP-SQP [16]	17991,03	18106,93	-	-
HQPSO5 [2]	17963,95	18273,86	18633,04	123,22
HDE [17]	17975,73	18134,80	-	-
ST-HDE [17]	17963,89	18046,38	-	-
DE [18]	17963,83	17965,48	17975,36	-
CDEMD [11]	17961,94	17974,68	18061,41	20,30
GSA [19]	17963,84	18041,21	18910,31	-
FAPSO-VDE [20]	17963,82	17963,82	17963,83	-
FA [21]	17963,83	18029,16	18168,80	148,54
θ -PSO [22]	17963,82	17965,20	17980,20	4,38

Neste caso é possível observar que os algoritmos propostos (BH_G e BH_M) obtiveram melhores valores para o custo mínimo (17960,36, juntamente com o ICIS) do que as abordagens de comparação. Com relação ao custo médio, o melhor resultado foi obtido pela Busca Harmônica Melhorada. Os algoritmos propostos foram superados no quesito custo máximo pela abordagem baseada em Otimização por Enxame de Partículas (Algoritmo FAPSO-VDE) [20]. Com isso, pode-se afirmar que ambos os algoritmos propostos obtém bons resultados e que o melhor algoritmo para esse caso de teste é a BH_M.

A Tabela VI apresenta o melhor resultado obtido pelos algoritmos propostos (BH_G e BH_M), codificado por um vetor P_i , $i = 1, \dots, 13$ com custo mínimo de 17960,36².

²O melhor resultado com relação ao custo mínimo de ambos os algoritmos é idêntico.

Tabela VI. MELHORES RESULTADOS OBTIDOS PARA O PRIMEIRO ESTUDO DE CASO UTILIZANDO A BH_G E A BH_M .

Potência	Geração	Potência	Geração	Potência	Geração
P_1	628,3185	P_6	60	P_{11}	40
P_2	149,5996	P_7	109,8665	P_{12}	55
P_3	222,7490	P_8	109,8665	P_{13}	55
P_4	109,8665	P_9	109,8665	$\sum_{j=1}^{13} P_i =$	1800,00
P_5	109,8665	P_{10}	40	Custo =	17960,36

C. Resultados para o Segundo Estudo de Caso - Caso 13 Geradores e Demanda de 2520 MW

Foi feita uma comparação da melhor abordagem proposta com algumas abordagens recentes da literatura e os resultados estão na Tabela VII.

Tabela VII. RESULTADOS PARA O SEGUNDO ESTUDO DE CASO. CUSTOS EM US\$

Caso com 13 geradores e demanda de 2520 MW				
Método	Custo Mín	Custo Médio	Custo Máx	Desvio
BH_G	24164,05	24164,07	24164,17	0,02
SDE [23]	24164,05	24168,28	24200,05	-
DTSA [24]	24169,95	-	-	-
DE [18]	24169,91	24169,91	24169,91	-

Para este caso, a BH_G , foi capaz de encontrar o menor custo juntamente com o algoritmo SDE [23] e foi melhor em outros dois indicadores de custo: médio (24164,07) e máximo (24164,17). Portanto, a melhor Busca Harmônica proposta foi o algoritmo com melhor desempenho para esse caso de teste.

A Tabela VIII apresenta o melhor resultado obtido pela BH_G codificado por um vetor P_i , $i = 1, \dots, 13$ com custo mínimo de 24164,05.

Tabela VIII. MELHORES RESULTADOS OBTIDOS PARA O SEGUNDO ESTUDO DE CASO UTILIZANDO A BH_G .

Potência	Geração	Potência	Geração	Potência	Geração
P_1	628,3185	P_6	159,7331	P_{11}	77,3999
P_2	299,1993	P_7	159,7331	P_{12}	92,3997
P_3	294,4846	P_8	159,7331	P_{13}	92,3995
P_4	159,7331	P_9	159,7331	$\sum_{j=1}^{13} P_i =$	2520,00
P_5	159,7331	P_{10}	77,3998	Cost =	24164,05

D. Resultados para o Terceiro Estudo de Caso - 40 Geradores e Demanda 10500W

A Tabela IX apresenta a comparação entre BH_G e alguns resultados reportados na literatura recente. Ela mostra que a BH_G obteve os melhores valores para o custo mínimo enquanto o FAPSO-VDE valores para custo médio e custo máximo de combustível. Portanto, para o estudo de caso com 40 geradores e demanda de 10500 MW o algoritmo FAPSO-VDE pode ser considerado o melhor algoritmo enquanto a melhor Busca Harmônica investigada obtém resultados satisfatórios, em particular com relação ao custo mínimo.

A Tabela X apresenta o melhor resultado obtido com o BH_G codificado por um vetor P_i , $i = 1, \dots, 40$ com custo igual a 121411,90.

VI. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste artigo foi investigado o uso de métodos baseados em Busca Harmônica para tratar o problema do Despacho Econômico de Energia Elétrica, o qual possui características

Tabela IX. RESULTADOS PARA O TERCEIRO ESTUDO DE CASO. CUSTOS EM US\$

Caso com 40 geradores e demanda de 10500 MW				
Método	Custo Mín	Custo Médio	Custo Máx	Desvio
BH_G	121411,90	121484,72	121599,36	28,30
ICIS [15]	121411,97	121584,64	121751,75	108,13
DEC-SQP [3]	121741,97	122295,12	122839,29	386,18
NPSO-LRS [25]	121664,43	122209,31	122981,59	-
CEP-PSO [26]	123670,00	124145,60	124900,00	-
CEP [12]	123488,29	124793,48	126902,89	-
FEP [12]	122679,71	124119,37	127245,59	-
MFEP [12]	122647,57	123489,74	124356,47	-
IFEP [12]	122624,35	123382,00	125740,63	-
PSO [16]	123930,45	124154,49	-	-
PSO-SQP [16]	122094,67	122245,25	-	-
DEvol [27]	121412,91	121430,00	121464,40	-
HDE [17]	121813,26	122705,66	-	-
ST-HDE [17]	121698,51	122304,30	-	-
DE [18]	121416,29	121422,72	121431,47	-
CDEMD [11]	121423,40	121526,73	121696,98	54,86
CSO [28]	121461,67	121936,19	122844,53	-
BBO [29]	121426,95	121508,03	121688,66	-
ICA-PSO [30]	121413,20	121428,14	121453,56	-
QPSO [31]	121448,21	122225,07	-	-
IABC-LS [32]	121412,73	-	121471,61	-
FAPSO-VDE [20]	121412,56	121412,61	121412,78	-
NDS [33]	121647,39	121647,39	121647,39	-
FA [21]	121415,05	121416,57	121424,56	1,78
QGS [34]	121412,55	121423,52	121438,68	-
θ -PSO [22]	121420,90	121509,84	121852,42	92,39
DEPSO [13]	121412,56	121419,31	121468,25	-

Tabela X. MELHORES RESULTADOS OBTIDOS PARA O TERCEIRO ESTUDO DE CASO UTILIZANDO O BH_G .

Potência	Geração	Potência	Geração
P_1	110,8558	P_{21}	523,2794
P_2	110,8416	P_{22}	523,2794
P_3	97,3999	P_{23}	523,2794
P_4	179,7331	P_{24}	523,2794
P_5	97	P_{25}	523,2794
P_6	140	P_{26}	523,2794
P_7	259,5996	P_{27}	10
P_8	284,5996	P_{28}	10
P_9	284,5996	P_{29}	10
P_{10}	130	P_{30}	87,8597
P_{11}	168,7998	P_{31}	190
P_{12}	94	P_{32}	190
P_{13}	214,7598	P_{33}	190
P_{14}	394,2794	P_{34}	164,7998
P_{15}	394,2794	P_{35}	200
P_{16}	304,5195	P_{36}	200
P_{17}	489,2794	P_{37}	110
P_{18}	489,2794	P_{38}	110
P_{19}	511,2794	P_{39}	110
P_{20}	511,2794	P_{40}	511,2794
		$\sum_{j=1}^{40} P_i$	121411,90

não-lineares complexas com restrições de igualdade e desigualdade e pode apresentar multimodalidade, dificultando a sua resolução. De acordo com os resultados obtidos, as quatro Buscas Harmônicas implementadas (BH , BH_M , BH_G e BH_{GA}) obtiveram bom desempenho nos três casos de teste considerados. O método implementado que apresentou melhor desempenho considerando os três casos de teste foi a BH_G . Para os dois primeiros estudos de caso, as Buscas Harmônicas investigadas apresentam o melhor desempenho quando comparadas com os resultados reportados na literatura em termos de custo mínimo e médio de combustível. No terceiro caso a melhor Busca Harmônica (BH_G) é capaz de superar os algoritmos encontrados na literatura no quesito custo mínimo. Destaca-se que a BH_G foi capaz de encontrar os melhores valores para o custo de combustível em todos os estudos de

caso, podendo ser considerada dentre os algoritmos do estado-da-arte para este problema.

Em trabalhos futuros pretende-se analisar o desempenho dos algoritmos propostos em outras variações do problema do despacho econômico de energia, como por exemplo o despacho econômico/ambiental de energia e o despacho econômico de energia com restrições de segurança. Além disso, pretende-se estudar o efeito da hibridização com uma busca local como a Quasi-Simplex.

AGRADECIMENTOS

Jeniffer Siebeneichler gostaria de agradecer a UNICENTRO e a Fundação Araucária pela bolsa de Iniciação Científica enquanto Carolina Almeida agradece a Fundação Araucária pelo suporte parcial por meio do Projeto n. 23.116/2012.

REFERÊNCIAS

- [1] A. P. Engelbrecht, *Computational Intelligence: An Introduction*, N. York, Ed. Wiley, 2007.
- [2] L. Coelho and V. Mariani, "Particle swarm approach based on quantum mechanics and harmonic oscillator potential well for economic load dispatch with valve-point effects," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 11, pp. 1373–1378, 2008.
- [3] L. S. Coelho and V. C. Mariani, "Combining of chaotic differential evolution and quadratic programming for economic dispatch optimization with valve-point effect," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 989–996, 2006.
- [4] R. A. Gonçalves, C. P. Almeida, M. R. Delgado, E. F. G. Goldberg, and M. C. Goldberg, "A cultural immune system for economic load dispatch with non-smooth cost functions," in *6th International Conference on Artificial Immune System - ICARIS 2007*, ser. Lecture Notes in Computer Science, LNCS. Santos, Brasil: Springer, 2007.
- [5] K. S. Lee and Z. W. Geem, "A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 194, no. 36–38, pp. 3902 – 3933, 2005.
- [6] J. Park, Y. Jeong, and W. Lee, "An improved particle swarm optimization for economic dispatch problems with non-smooth cost functions," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Que, 2006.
- [7] M. Mahdavi, M. Fesanghary, and E. Damangir, "An improved harmony search algorithm for solving optimization problems," *Applied mathematics and computation*, vol. 188, no. 2, pp. 1567–1579, 2007.
- [8] M. G. Omran and M. Mahdavi, "Global-best harmony search," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 198, no. 2, pp. 643–656, 2008.
- [9] Q.-K. Pan, P. N. Suganthan, M. F. Tasgetiren, and J. J. Liang, "A self-adaptive global best harmony search algorithm for continuous optimization problems," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 216, no. 3, pp. 830–848, 2010.
- [10] D. Manjarres, I. Landa-Torres, S. Gil-Lopez, J. D. Ser, M. Bilbao, S. Salcedo-Sanz, and Z. Geem, "A survey on applications of the harmony search algorithm," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 26, no. 8, pp. 1818 – 1831, 2013.
- [11] L. S. Coelho, R. T. T. Souza, and V. C. Mariani, "Improved differential evolution approach based on cultural algorithms and diversity measure applied to solve economic load dispatch problems," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 79, pp. 3136–3147, 2009.
- [12] N. Sinha, R. Chakrabarti, and P. K. Chattopadhyay, "Evolutionary programming techniques for economic load dispatch," *Trans. Evol. Comp.*, vol. 7, no. 1, pp. 83–94, Feb. 2003.
- [13] S. Sayah and A. Hamouda, "A hybrid differential evolution algorithm based on particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch problems," *Applied Soft Computing*, vol. 13, no. 4, pp. 1608 – 1619, 2013.
- [14] R. Storn and K. Price, "Differential evolution - a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces," 1995.
- [15] R. A. Gonçalves, C. P. de Almeida, M. C. Goldberg, E. F. G. Goldberg, and M. R. Delgado, "Improved cultural immune systems to solve the economic load dispatch problems," in *IEEE Congress on Evolutionary Computation*. IEEE, 2013, pp. 621–628.
- [16] T. Victoire and A. Jeyakumar, "Hybrid pso-sqp for economic dispatch with valve-point effect," *Electric Power Systems Research*, vol. 71, no. 1, pp. 51–59, 2004.
- [17] S. K. Wang, J. P. Chiou, and C. W. Liu, "Non-smooth/nonconvex economic dispatch by a novel hybrid differential evolution algorithm," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 1, no. 5, pp. 793–803, 2007.
- [18] N. Noman and H. Iba, "Differential evolution for economic load dispatch problems," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 3, pp. 1322–1331, 2008.
- [19] R. Swain, N. Sahu, and P. Hota, "Gravitational search algorithm for optimal economic dispatch," *Procedia Technology*, vol. 6, no. 0, pp. 411 – 419, 2012.
- [20] B. Mohammadi-Ivatloo, A. Rabiee, A. Soroudi, and M. Ehsan, "Iteration {PSO} with time varying acceleration coefficients for solving non-convex economic dispatch problems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 42, no. 1, pp. 508 – 516, 2012.
- [21] X.-S. Yang, S. S. S. Hosseini, and A. H. Gandomi, "Firefly algorithm for solving non-convex economic dispatch problems with valve loading effect," *Applied Soft Computing*, vol. 12, no. 3, pp. 1180 – 1186, 2012.
- [22] V. Hosseinnazhad and E. Babaei, "Economic load dispatch using θ -pso," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 160 – 169, 2013.
- [23] R. Balamurugan and S. Subramanian, "Self-adaptive differential evolution based power economic dispatch of generators with valve-point effects and multiple fuel options," *International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering*, 2007.
- [24] S. Khamsawang, S. Pothiya, and S. Boonseng, "Distributed tabu search algorithm for solving the economic dispatch problem," in *TENCON*. Chiang Mai, Thailand: TENCON, 2004, pp. 484–487.
- [25] A. I. Selvakumar and K. Thanushkodi, "New particle swarm optimization solution to nonconvex economic dispatch problems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 42–51, 2007.
- [26] N. Sinha and B. Purkayastha, "Pso embedded evolutionary programming technique for nonconvex economic load dispatch," in *IEEE PES - Power Systems Conference and Exposition*. Brasil: IEEE PES, 2004, pp. 66–71.
- [27] R. Perez-Guerrero and R. Cedenio-Maldonado, "Economic power dispatch with non-smooth cost functions using differential evolution," in *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium*, Arlington, Virginia, 2005, pp. 183–190.
- [28] A. Selvakumar and K. Thanushkodi, "Optimization using civilized swarm: solution to economic dispatch with multiple minima," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 1, pp. 8–16, 2009.
- [29] A. Bhattacharya and P. K. Chattopadhyay, "Biogeography-based optimization for different economic load dispatch problems," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010.
- [30] J. G. Vlachogiannis and K. Y. Lee, "Economic load dispatch - a comparative study on heuristic optimization techniques with an improved coordinated aggregation-based pso," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 991–1001, 2009.
- [31] K. Meng, H. G. Wang, Z. Dong, and K. P. Wong, "Quantum-inspired particle swarm optimization for valve-point economic load dispatch," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 215–222, 2010.
- [32] D. Aydın and S. Özyön, "Solution to non-convex economic dispatch problem with valve point effects by incremental artificial bee colony with local search," *Applied Soft Computing*, vol. 13, no. 5, pp. 2456 – 2466, 2013.
- [33] W.-M. Lin, H.-J. Gow, and M.-T. Tsai, "Combining of direct search and signal-to-noise ratio for economic dispatch optimization," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 1, pp. 487 – 493, 2011.
- [34] M. Moradi-Dalvand, B. Mohammadi-Ivatloo, A. Najafi, and A. Rabiee, "Continuous quick group search optimizer for solving non-convex economic dispatch problems," *Electric Power Systems Research*, vol. 93, no. 0, pp. 93 – 105, 2012.