DESPACHO TERMOELÉTRICO DE GERAÇÃO COM ZONAS PROIBITIVAS DE OPERAÇÃO POR MEIO DA OTIMIZAÇÃO ARITMÉTICA

Filipe Miguel Hylário
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Campus da UFJF, Plataforma do Setor de Tecnologia, 36036-330, Juiz de Fora, MG.
filipe.miguel@engenharia.ufjf.br

Ezequiel da Silva Oliveira
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Campus da UFJF, Plataforma do Setor de Tecnologia, 36036-330, Juiz de Fora, MG.
ezequiel.silva@engenharia.ufjf.br

Layon Mescolin de Oliveira
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Campus da UFJF, Plataforma do Setor de Tecnologia, 36036-330, Juiz de Fora, MG.
layonmescolin@hotmail.com

Ivo Chaves da Silva Junior
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Campus da UFJF, Plataforma do Setor de Tecnologia, 36036-330, Juiz de Fora, MG.
ivo.junior@ufjf.edu.br

André Luiz Marques Marcato
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Campus da UFJF, Plataforma do Setor de Tecnologia, 36036-330, Juiz de Fora, MG.
andre.marcato@ufjf.edu,br

RESUMO

O presente trabalho aborda o problema do despacho econômico de sistemas termoelétricos de geração considerando as restrições de Zonas Proibitivas de Operação (ZOP), o que torna o problema mais realista e consequentemente, de maior dificuldade de resolução. Isso porque a geração termoelétrica, devido a questões termodinâmicas, passa a apresentar descontinuidades em determinados níveis de geração. Matematicamente, com a introdução das restrições referentes às ZOP, o problema passa a ser classificado como sendo de programação não linear descontínua.

Diante da dificuldade apresentada, o trabalho visa aplicar e avaliar a qualidade e o desempenho da otimização aritmética, técnica recente e pouco difundida na literatura, ao problema aqui descrito e comparar os resultados alcançados com a técnica de enumeração exaustiva e com outros trabalhos existentes na literatura. Para tanto, foram utilizados três sistemas termoelétricos de geração, onde pode-se verificar de maneira satisfatória, a utilização da otimização aritmética ao problema aqui abordado.

PALAVRAS CHAVE. Despacho Econômico, Zonas Proibitivas e Otimização Aritmética.
Tópicos: Energia – Meta-heurísticas

ABSTRACT

The present work addresses the problem of economic dispatch of thermoelectric generation systems considering the restrictions of Prohibitive Operation Zones (POZ), which makes the problem more realistic and, consequently, more difficult to solve. This is because thermoelectric generation, due to thermodynamic issues, starts to present discontinuities at certain levels of generation. Mathematically, with the introduction of restrictions referring to ZOP, the problem is now classified as being of non-linear discontinuous programming.

In view of the presented difficulty, the work aims to apply and evaluate the quality and performance of arithmetic optimization, a recent and little-known technique in the literature, to the problem described here and to compare the results achieved with the exhaustive enumeration technique and with other works in the literature. To this end, three thermoelectric generation systems were used, where it can be satisfactorily verified, the use of arithmetic optimization to the problem addressed here.

KEYWORDS. Economic Dispatch**,** Prohibitive Operation Zones and Arithmetic Optimization**.**
Paper topics: Energy – Metaheuristics

1. Introdução

Atualmente, diante do aumento dos custos dos combustíveis fósseis e as questões relacionadas aos impactos ambientais, bem como o aumento da demanda dos sistemas elétricos de potência, a otimização da geração termoelétrica torna-se ainda mais necessária, visando melhorar a oferta de energia e a precificação deste insumo básico. Este problema de otimização é conhecido como Despacho Econômico (DE) e tem como objetivo garantir o atendimento da demanda do sistema e minimizar o custo total de geração de energia, o qual compreende o custo dos combustíveis e os custos de operação.

As características de entrada e saída de unidades termoelétricas de geração têm sido investigadas na literatura [Wood e Wollenberg 1996], onde uma função quadrática aproximada associa o despacho de geração de potência ativa aos custos de combustível e operação da unidade geradora. No entanto, para uma representação mais realista, o problema do despacho econômico deve considerar outros fatores que afetam diretamente a relação entre entrada-saída, tais como: (i) o efeito de ponto de válvula (ii) a consideração de zonas proibitivas de operação; (iii) a possibilidade de unidades termoelétricas operarem com múltiplos combustíveis. Estes fatores tornam o DE não convexo, descontínuo e consequentemente, um problema complexo de programação matemática.

Diante das dificuldades apresentadas, o presente trabalho visa aplicar e avaliar a qualidade e o desempenho da otimização aritmética, meta-heurística recente e ainda pouco difundida na literatura, ao problema do DE considerando as Zonas Proibitivas de Operação (ZOP). A seguir, é apresentada uma breve revisão trazendo alguns trabalhos que fazem uso de meta-heurísticas na resolução do problema de despacho econômico.

2. Revisão Bibliográfica

A representação mais detalhada do DE de unidades termoelétricas de geração adere ao problema um grau de complexidade maior, sendo necessária a utilização de técnicas de otimização que possibilitem a resolução do problema [Moosavian et al. 2016]. Fazendo uma pesquisa na literatura especializada é possível verificar que as técnicas meta-heurísticas têm sido amplamente utilizadas, na resolução do despacho econômico não convexo e descontínuo, em suas versões originais ou modificadas/híbridas [Kar 2016].

Em suas versões originais podemos citar: Otimização de Enxame de Partículas [Singh e Nighoskar 2020], Krill Herd Algorithm [Ghosh et al. 2017], Algoritmo de Ecolocalização [Oliveira et al. 2015], Barnacles Mating Optimizer [Sulaiman et al. 2019], entre outros.

Em suas versões modificadas/híbridas podemos citar: Projeto Ortogonal com Partículas Otimização de enxame [Qin et al. 2017], Immune Log-Normal Evolutionary Programming [Mansor et al. 2017], Bat Algorithm [Oliveira et al. 2020], entre outros.

Seguindo nesta linha de pesquisa, o presente trabalho propõe a aplicação e a avaliação da qualidade das soluções obtidas e do desempenho da otimização aritmética [Laith et al. 2021], meta-heurística recente e ainda pouco difundida na literatura, ao problema do DE considerando zonas proibitivas de operação. Adicionalmente, os resultados obtidos pela otimização aritmética serão comparados com a técnica de enumeração exaustiva e com os resultados divulgados na literatura técnica especializada.

3. Formulação do Problema

A formulação básica do problema referente ao despacho econômico consiste em uma função objetivo composta pelo somatório dos custos de operação de todas unidades termoelétricas existentes no sistema de potência, equação (1), sendo esta sujeita a um conjunto de restrições, que são divididas em dois tipos: (i) restrições sistêmicas, onde se enquadra a restrição de atendimento à demanda, equação (2); (ii) restrições operativas, equação (3), onde se enquadram as restrições de canalização que representam os limites máximos e mínimos de geração das unidades termoelétricas. Sendo assim, a formulação básica é apresentada a seguir.

$$Minimizar\ F_T = \sum_{i=1}^{\eta_g} F_i\,(P_i) \tag{1}$$

$$Sujeito\ a: \sum_{i=1}^{\eta_g} P_i = P_D + P_L \tag{2}$$

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max} \tag{3}$$

Onde: F_T é o custo de geração total; F_i é o custo do gerador i; P_i é a potência gerada pelo gerador i; P_D é a demanda do sistema; P_i^{min} é o limite mínimo de geração do gerador i; P_i^{max} é o limite máximo de geração do gerador i; η_g é o número de unidades geradoras existentes no sistema.

A representação do custo do combustível de cada unidade geradora é aproximada pela função quadrática F(P) em (4).

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \tag{4}$$

Com o objetivo de modelar de forma mais realista o DE foi considerado no modelo acima apresentado, as restrições impostas pelas zonas operativas de operação. As zonas operativas referem-se aos serviços auxiliares das unidades tais como caldeiras, bombas de alimentação, dentre outros, implicando em regiões de operação instáveis e portanto, devem ser evitadas. Sendo assim, a curva que representa o custo de operação da unidade termoelétrica passa a ser interpretada como uma função determinada por inequações, inserindo assim uma descontinuidade ao longo da geração. Vide equação (5) e Figura 1.

$$\begin{aligned} &P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{n1} \\ &P_i^{n2} \leq P_i \leq P_i^{n3} \\ &P_i^{n4} \leq P_i \leq P_i^{max} \end{aligned} \tag{5}$$

Onde: P_i^{n1} e P_i^{n3} são os limites superiores de operação permitidos pelas ZOP; P_i^{n2} e P_i^{n4} são os limites inferiores de operação permitidos pelas ZOP.

Diante da representação da função de custo de operação considerando zonas proibitivas, vide Figura 1, pode-se perceber as dificuldades ocasionadas pela representação das zonas proibitivas no problema de despacho econômico. As descontinuidades impedem a utilização de métodos de otimização não linear, os quais fazem uso de derivadas e sendo assim, as meta-heurísticas tornam-se uma excelente opção na resolução do problema.

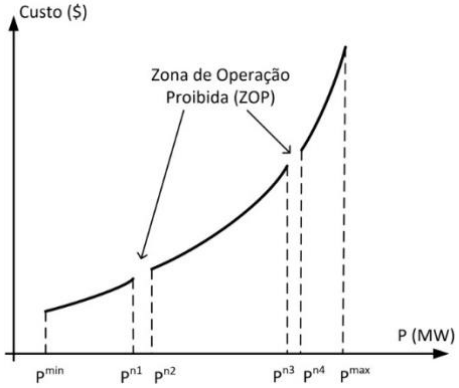


Figura 1. Representação da função de custo de operação considerando zonas proibitivas.

4. Otimização Aritmética

O Arithmetic Optimization Algorithm (AOA) ou Algoritmo de Otimização Aritmético desenvolvido por [Laith et al. 2021] possui como proposta a utilização das quatro operações básicas da aritmética para resolução de problemas de otimização cujo espaço de busca seja não linear e de difícil solução pelos métodos clássicos de otimização. O AOA utiliza o conceito de inteligência populacional, ou seja, ao longo do processo iterativo os parâmetros $x_{i,j}$ são atualizados de acordo com os parâmetros obtidos pela melhor solução x_{best}.

A principal característica do AOA está relacionada à capacidade de diversificação em um amplo espaço de busca através da investigação global de possíveis soluções e da intensificação da procura por melhores soluções através da investigação local.

As operações aritméticas Multiplicação (M) e Divisão (D) são responsáveis pelos avanços em um âmbito global enquanto as operações de Adição (A) e Subtração (S) refinam as soluções no espaço de busca local. A determinação do tipo de busca é realizada pelo parâmetro conhecido como Acelerador de Otimização Matemático (AOM) equacionado por (6).

$$AOM\ (iter) = Min + iter * \left(\frac{Max - Min}{n}\right) \tag{6}$$

Onde $AOM(j)$ é o valor do acelerador de otimização matemático da iteração atual. Min e Max são respectivamente os valores mínimos e máximos da função de aceleração.

A determinação do espaço de busca do AOA é realizada através de uma variável r_1 aleatória e o valor de $AOM(j)$. A variável r_2 , determinada no intervalo entre 0 e 1 indica qual das operações aritméticas de busca global (M ou D) será utilizada. O indicador r_3 tem função análoga a r_2 porém determinístico na escolha das operações aritméticas responsáveis pela investigação local (A ou S) do espaço de busca. Pela Figura 2 é possível verificar a correlação de AOA, r_1 , r_2 , r_3 e o espaço de busca de soluções.

4.1 Busca Global pelo AOA

Como dito anteriormente a busca global do AOA é representada pelas operações aritméticas de divisão e multiplicação. A solução candidata $x_{i,j}$ é atualizada de acordo com uma das duas possibilidades dadas pela equação (7) abaixo.

$$x_{i,j}(iter+1) = \begin{cases} x_{best}(x_j) \div (OMP + \epsilon) \times \left(\left(UB_j - LB_j\right) \times \mu + LB_j\right), & r_2 < 0{,}5 \\ x_{best}(x_j) \times OMP \times \left(\left(UB_j - LB_j\right) \times \mu + LB_j\right), & r_2 \geq 0{,}5 \end{cases} \tag{7}$$

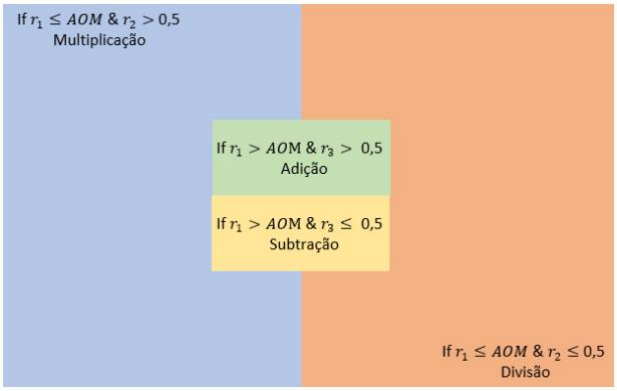


Figura 2 – Espaço de busca de soluções

Onde $x_{i,j}(iter+1)$ será o valor da nova solução após a atualização dada pela equação (2), ϵ é um pequeno valor inteiro, UB_j e LB_j são respectivamente os limites superiores e inferiores da solução do problema enquanto μ é determinado como um parâmetro de ajuste do processo de busca. O valor do Otimizador Matemático de Probabilidade (OMP) é determinado com base no processo iterativo e equacionado por (8).

$$OMP\ (iter) = 1 - \frac{iter^{1/\alpha}}{n^{1/\alpha}} \tag{8}$$

Onde α é denominado como ajuste de exploração e determinado pelo tipo de problema abordado.

4.2 Busca local pelo AOA

A busca local realizada pelo AOA ocorre de maneira análoga à busca global, sendo sua principal característica determinística o valor fornecido por r_3. A equação para atualização das soluções quando o algoritmo realiza a busca local é dada por (9).

$$x_{i,j}(iter+1) = \begin{cases} x_{best}(x_j) - OMP \times \left(\left(UB_j - LB_j\right) \times \mu + LB_j\right), & r_3 < 0{,}5 \\ x_{best}(x_j) + OMP \times \left(\left(UB_j - LB_j\right) \times \mu + LB_j\right), & r_3 \geq 0{,}5 \end{cases} \tag{9}$$

É importante salientar que tanto na busca global quanto na busca local, o valor de OMP é ajustado para que os incrementos da solução corrente sejam proporcionais ao processo iterativo, ou seja, nas primeiras iterações os avanços no espaço de busca são amplos e ao final do processo iterativo esses avanços são menores, intensificando assim a busca por soluções no entorno da melhor solução. Outro detalhe importante, no presente trabalho, é que as equações (7) e (9) foram arredondadas, após suas atualizações, de forma a garantir a integridade das soluções. Ou seja, garantir que as soluções sejam discretas, uma vez que estas correspondem as zonas operativas das unidades termoelétricas de geração.

4.3 Parâmetros de Simulação

Para as simulações aqui realizadas através do AOA foram utilizadas: (i) um conjunto de vinte e cinco soluções; convergência pelo número máximo de iterações, o qual adotou-se cem iterações; (iii) o valor de 0.5 para o parâmetro de ajuste (μ) do processo de busca; (iv) o valor de 1 para o parâmetro de ajuste de exploração (α). Destaca-se, o número reduzido de parâmetros a serem ajustados (apenas μ e α) pelo AOA, o que a priori, se tratando de meta-heurísticas, é um atrativo. Mais a frente, serão apresentados alguns resultados obtidos em relação aos valores iniciais aqui adotados para os parâmetros μ e α.

5. Aspectos Computacionais

O ambiente computacional utilizado para o processamento dos casos foi um processador Intel® CoreTM i7, 2,93 GHz e de 8,00 GB de memória RAM. A meta-heurística baseada em aritmética foi implementada em ambiente MATLAB®.

A meta-heurística é responsável pela indicação de uma possível configuração de operação entre as zonas operativas das unidades termoelétricas de geração e a partir desta configuração é chamada a função FMINCON do MATLAB. Essa função é responsável pela a resolução do problema de otimização não linear e consequentemente, a obtenção do valor da função objetivo (custo de operação do sistema termoelétrico), vide Figura 3. Valor este que retorna à meta-heurística, criando assim um critério de sensibilidade na exploração de região factível de solução.

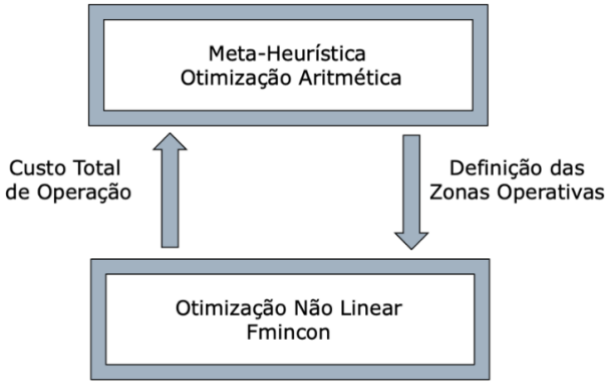


Figura 3. Representação do fluxo de informações na resolução do problema.

6. Estudo de Casos

Como já mencionado anteriormente, a meta-heurística baseada em operações aritméticas [Laith et al.2021] foi empregada no presente trabalho para solucionar o problema do DE considerando as zonas proibitivas de operação. Para tanto, foram utilizados três sistemas termoelétricos de geração distintos de modo a validar a utilização da otimização aritmética frente a outras técnicas empregadas na resolução deste problema. Os arquivos contendo os dados dos sistemas termoelétricos de geração aqui analisados podem ser obtidos através do seguinte link: https://github.com/esogit/SBPO2021.git

6.1 Caso de estudo 1: Sistema com 15 UTEs

Este sistema de geração termoelétrica possui quinze unidades geradoras, sendo estas unidades responsáveis por garantir o atendimento a uma demanda de 2650MW. Das quinze unidades geradoras, quatro possuem zonas proibitivas de operação. Três unidades possuem quatro zonas de operação e uma unidade possui três zonas operativas, vide Tabela I. Ou seja, para este sistema, devido ao número reduzido de unidades com restrições operativas tem-se um total de 192 combinações possíveis de operação. E sendo assim, é possível encontrar a solução ótima através de enumeração exaustiva, vide Tabela II, e posteriormente, comparar com a solução obtida pela otimização aritmética. A Tabela II apresenta as zonas ótimas de operação de cada unidade termoelétrica, sendo o respectivo custo total de operação de aproximadamente R$32.562,00.

TABELA I. ZONAS PROIBITIVAS DE OPERAÇÃO – CASO 1

Unidade Termoelétrica	Zona 1 (MW)	Zona 2 (MW)	Zona 3 (MW)	Zona 4 (MW)
2	[150 185]	[225 305]	[335 420]	[450 455]
5	[150 180]	[200 260]	[335 390]	[420 470]
6	[135 230]	[255 365]	[395 430]	[455 460]
12	[020 030]	[055 065]	[070 080]	x

TABELA II. RESULTADOS – ENUMERAÇÃO EXAUSTIVA- CASO 1- R$ 32.562,00

	Zona 1	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**
Unidades Teromoelétricas	1, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14 e 15	12	2 e 5	6

A otimização aritmética encontrou, para este primeiro caso, a mesma configuração de operação para as quinze unidades termoelétrica obtidas via enumeração exaustiva, vide Tabela II. Ou seja, a otimização aritmética encontrou a solução ótima global para este primeiro caso de estudo. Destaca-se que foram feitas vinte simulações da otimização aritmética e em todas, os resultados foram os mesmos, apresentados na Tabela II, não apesentando assim nenhuma dispersão em relação as soluções obtidas.

6.2 Caso de estudo 2: Sistema com 10 UTEs

Este sistema de geração termoelétrica possui dez unidades geradoras, sendo responsável por garantir o atendimento a uma demanda de 2700MW. Todas as unidades geradoras possuem zonas proibitivas de operação. Das dez unidades geradoras, nove possuem três zonas de operação e uma possui duas zonas de operação vide Tabela III. Ou seja, para este sistema, devido a um maior número de unidades com restrições operativas tem-se um total de 39366 combinações possíveis de operação. Diante desta dimensão, ainda é possível encontrar a solução ótima através de enumeração exaustiva, vide Tabela IV, e posteriormente, comparar com a solução obtida pela otimização aritmética. A Tabela IV apresenta as zonas ótimas de operação de cada unidade termoelétrica, sendo o respectivo custo total de operação de aproximadamente R$653,786.

TABELA III. ZONAS PROIBITIVAS DE OPERAÇÃO – CASO 2

Unidade Termoelétrica	**Zona 1 (MW)**	**Zona 2 (MW)**	**Zona 3 (MW)**
1	[100 196]	[216 250]	x
2	[50 114]	[134 157]	[177 230]
3	[200 332]	[352 388]	[408 500]
4	[99 138]	[158 200]	[220 265]
5	[190 338]	[358 407]	[427 490]
6	[85 138]	[158 200]	[220 265]
7	[200 331]	[351 391]	[411 500]
8	[099 138]	[158 200]	[220 265]
9	[130 213]	[233 370]	[390 440]
10	[200 362]	[382 407]	[427 490]

A otimização aritmética encontrou, para este segundo caso, configuração de operação idêntica a obtida via enumeração exaustiva, vide Tabela IV. Ou seja, a otimização aritmética possibilitou, novamente, a obtenção da solução ótima global para este segundo caso de estudo. Destaca-se que foram feitas vinte simulações da otimização aritmética e em todas, os resultados finais foram os mesmos apresentados na Tabela IV, não apesentando assim nenhuma dispersão em relação as soluções obtidas.

TABELA IV. RESULTADOS – ENUMERAÇÃO EXAUSTIVA - CASO 2- R$ 653,786.

	ZONA 1	**ZONA 2**	**ZONA 3**
Unidade Termoelétrica	1, 3, 5, 7 e 10	x	2, 4, 6, 8 e 9

6.3 Caso de estudo 3: Sistema com 40 UTEs

Este sistema de geração termoelétrica possui quarenta unidades geradoras, sendo responsável por garantir o atendimento a uma demanda de 7000MW. Das quarenta unidades geradoras, vinte e cinco possuem zonas proibitivas de operação. Quatro unidades possuem quatro zonas de operação, dez unidades possuem três zonas de operação e nove unidades possuem duas zonas de operação e as demais unidades apenas uma zona de operação. Sendo assim, para este sistema tem-se milhões de combinações possíveis de operação. Ou seja, devido ao elevado número de combinações fica impossível a utilização da enumeração exaustiva para avaliação da qualidade da solução encontrada pela otimização aritmética. Desta forma, a comparação será feita com outros trabalhos existentes na literatura e que fazem uso do mesmo sistema aqui mencionado [Adhinarayanan e Sydulu 2008] [Oliveira et al. 2015].

Para a simulação via otimização aritmética foram realizadas vinte simulações, onde foram consideradas, a cada iteração, vinte e cinco soluções e um número máximo de cem iterações como critério de convergência. A Figura 4 apresenta as trajetórias de convergência da otimização aritmética para as vinte simulações realizadas referentes ao Caso 3. Percebe-se, no geral, trajetórias suaves, sem estagnações longas até o a convergência do processo. Ou seja, um bom equilíbrio entre a exploração e a intensificação ao percorrer a região de solução.

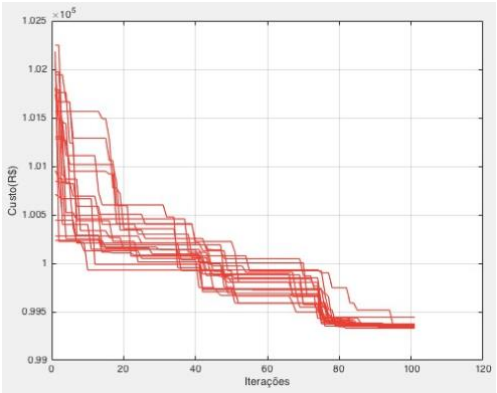


Figura 4. Trajetórias de Convergência - Otimização Aritmética- Caso 3.

Pela Figura 5 é possível fazermos uma análise da distribuição dos resultados alcançados pela otimização aritmética. O valor ótimo encontrado (minimização do custo de operação) foi de R$99.327,13 através da configuração de operação apresentada pela Tabela V. Já o valor máximo de custo obtido (outlier) foi de R$99.423,51 e a mediana de R$99.351,01. Ou seja, podemos verificar a existência de uma pequena dispersão nos resultados (0,1%) e de uma assimetria positiva.

TABELA V. RESULTADOS – OTIMIZAÇÃO ARITMÉTICA- CASO 3- R$ 99.327,13.

	Zona 1	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**
Unidades Teromoelétricas	1,2,4,5,6,7,8,10,11,12,1314,15, 16,17,**21**,28,29,30,31,32,33,34, 35,36,37,38,39 e 40	3,9,18,19,20	22,23,24,25,26 e 27	x

A Tabela VI apresenta um quadro comparativo entre o resultado obtido pela otimização aritmética e dois outros trabalhos encontrados na literatura que fazem uso dos mesmos dados para o sistema de geração aqui abordado. Diante dos resultados é possível verificar que a otimização aritmética obteve um mínimo local de excelente qualidade. Ou seja, a diferença percentual entre os custos totais de operação foi de apenas 0,0043%. Observando as configurações de operação encontradas pela otimização aritmética, Tabela V, esse difere da configuração encontrada na literatura, Tabela VII, apenas pela condição operativa de uma única unidade termoelétrica, termoelétrica de número 21.

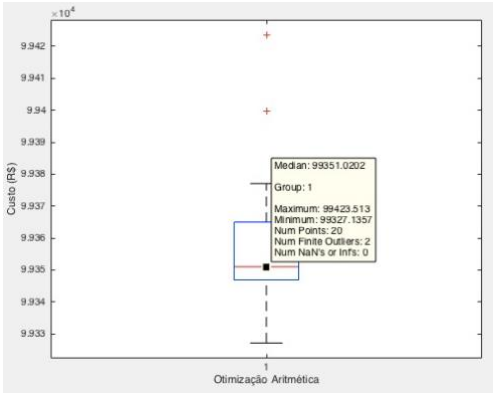


Figura 5. Boxplot dos Custos de Operação via Otimização Aritmética - Caso 3.

TABELA VI - QUADRO COMPARATIVO – CUSTOS OPERACIONAIS - CASO 3

Otimização	**Custo Total de Operação**
[Adhinarayanan e Sydulu 2008]	R$99.322,85
[Oliveira et al. 2015]	R$99.322,85
Otimização Aritmética	R$99.327,13

TABELA VII. RESULTADO DA LITERATURA- CASO 3- R$ 99.322,85.

	Zona 1	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**
Unidades Teromoelétricas	1,2,4,5,6,7,8,10,11,12,1314,15, 16,17,28,29,30,31,32,33,34,35, 36,37,3839 e 40	3,9,18,19,20 e **21**	22,23,24,25,26 e 27	x

6.4 Caso de estudo 4: Variação dos parâmetros inerentes a otimização aritmética

A otimização aritmética possui apenas dois parâmetros que podem ser ajustados: (i) o parâmetro de controle (μ) que ajusta o processo de busca. Esse parâmetro tem como objetivo produzir um valor estocástico a cada iteração, de modo a manter a exploração não apenas durante as iterações iniciais de busca, mas também ao final do processo. Essa estratégia é muito útil para evitar a estagnação em soluções ótimas locais, principalmente nas últimas iterações; (ii) o parâmetro (α) que define a acurácia do processo de exploração durante as iterações.

Diante da apresentação dos parâmetros, o presente estudo de caso tem por objetivo verificar a influência dos mesmos na solução do problema de DE considerando zonas proibitivas de operação. Para tanto, optou-se em utilizar o sistema de 40 UTEs para fazer tal análise, considerando os seguintes cenários, vide Tabela VII. Destaca-se que as simulações até aqui apresentadas fizeram uso do cenário C4, sendo estes mencionados em [Laith et al. 2021] como sendo os que proporcionaram os melhores resultados.

Para cada um dos cenários apresentados, Tabela VII, foram feitas vinte simulações do AOA para o sistema com 40 UTEs, considerou-se um conjunto de vinte e cinco soluções, um número máximo de cem iterações e em todos os cenários, partiu-se o AOA das mesmas soluções iniciais. Os resultados são apresentados através da Tabela VIII.

Diante da Tabela VIII pode-se concluir que a melhor configuração entre os parâmetros (μ e α) foi a apresentada através do cenário 1, C1. Com μ=0.1 e α=1, cenário 1, foi possível a obtenção de melhores resultados (mínimo, média e máximo) e com pequena dispersão quando comparado com a maioria dos cenários considerados. Sendo assim, os casos 1 e 2 foram novamente simulados, com μ=0.1 e α=1, e os resultados anteriormente apresentados se mantiveram inalterados. Ou seja, a solução ótima global se manteve presente em ambos os casos.

TABELA VII. CENÁRIOS DE AJUSTES DOS PARÂMETROS – CASO 4

Cenários	Valores de (μ)	Valores de (α)
C1	0,1	1
C2	0,1	5
C3	0,1	9
C4	0,5	1
C5	0,5	5
C6	0,5	9
C7	0,9	1
C8	0,9	5
C9	0,9	9

TABELA VIII. ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE AJUSTES DOS PARÂMETROS – CASO 4 – CUSTOS OPERACIONAIS

Cenários	Melhor Resultado	Média dos Resultados	Pior Resultado	Desvio Padrão
C1	**R$99.327,13**	**R$99.344,74**	R$99.373,45	R$17,09
C2	R$99.350,47	R$99.415,73	**R$99.860,17**	R$156,54
C3	R$99.361,58	R$99.421,86	R$99.742,28	R$116,23
C4	**R$99.327,13**	R$99.351,02	R$99.423,51	R$25,44
C5	R$99.350,06	R$99.409,08	R$99.781,76	R$131,94
C6	R$99.355,12	R$99.484,43	R$99.742,84	R$168,70
C7	R$99.345,21	R$99.379,13	R$99.452,23	R$32,34
C8	R$99.342,14	R$99.360,78	R$99.383,37	**R$12,49**
C9	R$99.349,14	R$99.406,22	R$99.727,52	R$113,33

7. Conclusões

Neste trabalho foi abordado o problema do despacho econômico de sistemas termoelétricos de geração considerando as restrições de zonas proibitivas de operação. Consideração esta que torna o problema mais realista e consequentemente, de maior dificuldade de resolução. Matematicamente, com a introdução das restrições referentes às zonas proibitivas de operação, o problema passa a ser classificado como sendo de programação não linear descontínua e sendo assim, as meta-heurísticas passam a ser atrativas na resolução do problema.

Diante da dificuldade apresentada, aplicou-se e avaliou-se a qualidade e o desempenho de uma meta-heurística muito recente, denominada de otimização aritmética. Desta forma, para avaliar a performance da otimização aritmética, a mesma foi aplicada ao problema de despacho econômico considerando as restrições de zonas proibitivas de operação. Sendo considerados, três sistemas de geração distintos.

Os resultados obtidos foram considerados competitivos com os divulgados na literatura. Em dois sistemas termoelétricos, a otimização aritmética encontrou a solução ótima global. Sendo estas confirmadas pelo método de enumeração exaustiva. No problema de maior dificuldade, sistema com 40 UTEs, a solução encontrada foi praticamente a mesma divulgada na literatura. Diferença esta, de aproximadamente 0.0043%. Ou seja, pode se considerar que ambas as soluções são iguais economicamente. Sendo assim, conclui-se que, em relação à otimalidade das soluções encontradas, a otimização aritmética se mostrou competitiva e com boa assertividade para os sistemas termoelétricos de geração aqui abordados.

Em relação à otimização aritmética, sendo esta uma meta-heurística, destaca-se, o número reduzido de parâmetros a serem ajustados (apenas μ e α). Entretanto, pode-se observar que as definições dos valores numéricos destes parâmetros são importantes e relevantes na exploração da região de solução e merecem atenção especial.

Com relação aos trabalhos futuros, pretende-se: (i) fazer um estudo de sensibilidade em relação ao número de soluções a serem consideradas e em relação ao número máximo de iterações da otimização aritmética para o problema aqui abordado; (ii) pesquisar a possibilidade da atualização

dos valores dos parâmetros (μ e α) durante o processo iterativo. Ou seja, tornar a definição dos valores numéricos dinâmicos e dependentes, exclusivamente, do processo de convergência do algoritmo; (iii) avaliar sistemas termoelétricos de maior porte.

8. Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPEMIG–Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (PPM-00184-17) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFJF.

Referências

Adhinarayanan, T., & Sydulu, M. (2008). A directional search genetic algorithm to the economic dispatch problem with prohibited operating zones. 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. doi:10.1109/tdc.2008.4517076

Ghosh, B., Chakraborty, A. K., Bhowmik, A. R., & Bhattacharya, A. (2017). Krill Herd algorithm solution for the economic emission load dispatch in power system operations. 2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS). doi:10.1109/icpes.2017.8387387

Kar, A. K. (2016). Bio inspired computing – A review of algorithms and scope of applications. Expert Systems with Applications, 59, 20–32. doi:10.1016/j.eswa.2016.04.018

Laith Abualigah, Ali Diabat, Seyedali Mirjalili, Mohamed Abd Elaziz and Amir H. Gandomi (2021). The Arithmetic Optimization Algorithm. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 376 (2021) 113609

Mansor M. H; Musirin, I; Othman, M.M (2017). Immune Log-Normal Evolutionary Programming (ILNEP) for solving economic dispatch problem with prohibited operating zones. 4th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), IEEE.

Moosavian, S. M., Modiri-Delshad, M., Selvaraj, J., & Abd Rahim, N. (2016). Solution techniques for optimal power dispatch problems - A review. 4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016). doi:10.1049/cp.2016.1274

Oliveira, E.S., Silva, I.C., de Oliveira, L.W., Dias, B.H., and Filgueiras, M. (2015) Despacho Econômico com Zonas de Operação Proibidas através de Otimização Bioinspirada. Sociedade Brasileira de Inteligência Computacional, 2015. doi: 10.21528/ CBIC2015-047

Oliveira, L. M, Oliveira, E. Silva Junior, I. C. Optimal economic dispatch of thermoelectric power units with practical constraints through an enhanced bat algorithm. In: XXIII Congresso Brasileiro de Automática , 2020.

Qin, Q., Cheng, S., Chu, X., Lei, X., and Shi, Y. (2017). Solving non-convex/non-smooth economic load dispatch problems via an enhanced particle swarm optimization. Applied Soft Computing.

Singh, N., Kumar, Y., & Nighoskar, A. (2020). Optimization of Economic Dispatch Using PSO With Time Varying Acceleration Coefficient. 2nd International Conference on Data, Engineering and Applications (IDEA). doi:10.1109/idea49133.2020.9170662

Sulaiman, M. H., Mustaffa, Z., & Aliman, O. (2019). An Application of Barnacles Mating Optimizer for Solving Economic Dispatch Problems. 2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT). doi:10.1109/jeeit.2019.8717377

Wood, A.J. and Wollenberg, B.F. (1996). Power generation, operation, and control. John Wiley & Sons, 2nd ed edition.