

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

DESPACHO ECONÔMICO DINÂMICO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS COM INTEGRAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

AUTORES:

HEITOR HUGO DIAS MANGUEIRA FILHO
Prof. LEONARDO PAUCAR
Prof. RAIMUNDO NONATO DINIZ COSTA FILHO

INSTITUIÇÃO:

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

DESPACHO ECONÔMICO DINÂMICO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS COM INTEGRAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Resumo

A energia elétrica ou eletricidade é uma commodity que é a base da indústria de energia elétrica e dos mercados de eletricidade. Os sistemas de energia elétrica (SEE) atuais são híbridos (SEEH), integrados com uma combinação de tecnologias de geração que incluem usinas termelétricas e usinas com fontes renováveis como as hidrelétricas, parques eólicos e usinas solares, bem como sistemas de armazenamento de energia. Um problema básico dos SEE é o despacho econômico (DE) sendo o objetivo principal determinar a potência ótima dos geradores para atender a demanda de potência com mínimo custo de operação – mínimo custo de combustível – sujeito a diversas restrições dos geradores e do sistema, e envolvendo a correlação conjunta do mercado de energia elétrica, observando um desenvolvimento sustentável, econômico e próspero. Uma extensão do DE é o despacho econômico dinâmico (DED) cujo objetivo é determinar a programação da geração de unidades geradoras para um horizonte de tempo dado, usualmente diário. Para a solução do DE e do DED tem sido aplicados métodos convencionais de otimização linear e não-linear, otimização convexa. As metodologias recentes utilizam técnicas de inteligência artificial como as meta-heurísticas, que incluem os algoritmos genéticos (AG), programação evolutiva, otimização por enxame de partículas, meta-heurísticas híbridas etc. Neste trabalho para resolver o DED propõe-se uma metodologia híbrida de três técnicas de otimização: algoritmos genéticos (AG), programação quadrática sequencial (SQP por *Sequential Quadratic Programming*) e o método de pontos interiores (IPM – *Interior Point Methods*). A metodologia proposta foi aplicada para resolver o DED de um SEEH teste modificado de 10 geradores e os resultados foram competitivos quando comparados com os resultados na literatura.

Palavras-chave: Despacho econômico, meta-heurísticas, otimização, custo, algoritmo.

Abstract

Electrical energy or electricity is a commodity that is the basis of the electric power industry and electricity markets. Current electrical energy systems (EES) are hybrid (SEEH), integrated with a combination of generation technologies that include thermoelectric plants and plants with renewable sources such as hydroelectric plants, wind farms and solar plants, as well as energy storage systems. energy. A basic problem of the SEE is economic dispatch (ED), the main objective being to determine the optimal power of the generators to meet the power demand with minimum operating cost – minimum fuel cost – subject to various restrictions of the generators and the system, and We are jointly studying the electricity market, following sustainable, economic and prosperous development. An extension of DE is dynamic economic dispatch (DED) whose objective is to determine the generation schedule of generating units for a given time horizon, generally daily. To solve the DE and DED, conventional linear and non-linear optimization methods, convex optimization, were applied. Recent methodologies use artificial intelligence techniques such as meta-heuristics, which include genetic algorithms (GA), evolutionary programming, particle swarm optimization, hybrid meta-heuristics, etc. of three optimization techniques: genetic algorithms (GA), sequential quadratic programming (SQP for *Sequential Quadratic Programming*) and internal point method (IPM). The proposed methodology was applied to solve the DED of a modified SEEH test of 10 generators and the results were competitive when compared with the literature results.

Keywords: Economic dispatch, meta-heuristics, optimization, cost, algorithm.

Introdução

Os sistemas de energia elétrica (SEE) atuais são integrados com uma combinação de tecnologias de geração que incluem fontes renováveis como os parques eólicos e usinas solares. Além disso, os sistemas de energia elétrica híbridos (SEEH) estão compostos pela combinação de tecnologias de geração com usinas termelétricas (a carvão, gás, óleo Diesel, nuclear), usinas de fontes renováveis (hidrelétricas, eólicas, solares, termelétricas a biomassa) e sistemas de armazenamento de energia [1]. Um problema básico dos SEE é o despacho econômico (DE) sendo o objetivo principal determinar a potência ótima dos geradores para atender a demanda de potência com mínimo custo de operação – mínimo custo de combustível – e sob diversas restrições dos geradores e do sistema [1, 2, 3]. O despacho de sistemas de energia elétrica práticos em mercados elétricos inclui restrições de segurança energética [6]. O despacho econômico dinâmico (DED) é uma extensão do despacho econômico estático [7, 8] com o objetivo de determinar a programação da geração de unidades geradoras para um horizonte de tempo dado, usualmente diário. Para a solução do despacho econômico e do despacho econômico dinâmico tem sido aplicados métodos convencionais de otimização linear e não-linear, programação dinâmica, relaxação de Lagrange etc. As metodologias mais recentes utilizam métodos e técnicas de inteligência artificial como as meta-heurísticas, que incluem algoritmos genéticos [2], programação evolutiva [8], algoritmos evolutivos [4, 9], otimização por enxame de partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*) [3], meta-heurísticas híbridas [10] etc. A energia elétrica é uma commodity ou mercadoria que é a base da indústria de energia elétrica e dos mercados de eletricidade [Yang]. Desta forma, visando cumprir alguns dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), como o ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), a operação e o despacho econômico dos SEE tornam-se essenciais para um desenvolvimento econômico crescente [11]. Um despacho econômico dinâmico para sistemas de energia elétrica integrados renováveis utilizando técnicas de inteligência artificial é essencial para um desenvolvimento econômico crescente e próspero. Este projeto propõe-se a formular um modelo de despacho econômico dinâmico, levando em conta sistemas integrados de energia elétrica com fontes renováveis, além de aplicar técnicas de inteligência artificial para uma solução eficiente. O estudo e formulação de modelos de despacho econômico multiobjetivo de sistemas de energia elétrica integrados ou híbridos, que consideram diversas fontes de energia renováveis e convencionais, além disso, o sistema de armazenamento de energia, configura um desafio para a operação adequada dos SEEH.

Metodologia

A metodologia para resolver o DED para sistemas elétricos com integração de energias renováveis deste trabalho consiste na aplicação de três métodos de otimização: uma meta-heurística, algoritmos genéticos (GA - *Genetic Algorithms*) e dois métodos de otimização convencionais, programação quadrática sequencial (SQP - *Sequential Quadratic Programming*) e o método de pontos interiores (IPM – *Interior Point Methods*). As meta-heurísticas são métodos de soluções de alto nível que buscam encontrar mínimos globais em um espaço robusto de soluções. GA consiste em um algoritmo estocástico baseado em mutação e cruzamento entre os membros da população, que utiliza uma solução inicial aleatória e por isso aplica-se em primeiro lugar. Logo, aplicam-se SQP e IPM que necessitam de uma solução inicial factível para realizar a otimização. SQP é um método de otimização baseado no gradiente que começa a partir de um único ponto, neste caso serão vários pontos iniciais como será visto mais adiante, e utiliza informações do gradiente para obter uma solução ótima que tem

como base a matriz Hessiana de segundas derivadas da função objetivo que visa minimizar o custo de operação, além de entregar a potência ótima dos geradores dentro dos seus limites de operação.

A proposta metodológica nesta pesquisa é resolver o problema DED com uma metodologia híbrida composta por uma meta-heurística (GA) e dois métodos de otimização convencionais (SQP e IPM), que se pretende demonstrar que será competitiva ou melhor que outras metodologias propostas na literatura que consideram somente um ou dois métodos de otimização.

Com isso, será visto que para resolver o problema utilizando uma meta-heurística evolutiva e usando dois algoritmos determinísticos é melhor do que feita com uma meta-heurística evolutiva e um algoritmo determinística [8] que utiliza a EP (programação evolutiva), que é uma técnica de otimização que se baseia na seleção natural e em mutações, tal qual o indivíduo (solução) mais apto ao ambiente (problema) sobrevive, e a SQP para resolver o problema do DE. Além disso, a sequência de otimização também será discutida, utilizando como parâmetros, a média, mediana, boxplot, que consiste em um gráfico que permite visualizar as estáticas de um conjunto de dados de forma mais rápida, também se tem o melhor resultado da otimização como parâmetro de comparação de cada combinação, que são estas: GA + SQP, GA + IPM, GA + IPM + SQP, GA + SQP + IPM.

• FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O despacho econômico dinâmico é formulado como um problema de otimização em: (1)-(6).

$$\text{Min } F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n F_{it}(P_{it}) \quad (1)$$

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i + c_i + |e_i \sin(f_i(\min P_i - P_i))| \quad (2)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n P_{ij} - P_{dj} = 0 \quad (3)$$

$$\min P_i \leq P_i \leq \max P_i; \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$P_{it} - P_{i(t-1)} \leq UR; \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$P_{i(t-1)} - P_{it} \leq DR; \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

em que i é o número do gerador, t é o período de tempo em horas, $F_{it}(P_{it})$ é o custo total de operação dos geradores durante todo o período do despacho, T é o período total de operação em horas, n é o número total de unidades geradores, P_{ij} é a potência de cada gerador, i , no tempo, j , por fim P_{dj} é a potência de demanda de carga total do sistema durante um período de operação específico. Em (2),

temos a função custo de combustíveis que será usada nesse trabalho, que inclui os efeitos de carregamento de “ponto de válvula” [8], onde é expresso em (2) – (6). Tal que, a_i, b_i, c_i, e_i, f_i , são constantes de (2) que está sujeita a algumas restrições como a restrição do fluxo de potência, como é mostrado em (3). Além dessa restrição, tem-se a restrição do gerador que deve operar dentro de seus limites operacionais, de potência mínima e máxima, como vista em (4). Por fim, temos os limites rampa de cada unidade que são fornecidos pelas equações (5) e (6), tal que são, respectivamente: a taxa de aceleração (UR – *ramp-up*) e taxa de desaceleração (DR – *ramp-down*), que representam os limites dos geradores.

Resultados e Discussão

A metodologia de solução do modelo matemático do DED será aplicada a um sistema teste de 10 unidades geradoras com função de custo de combustíveis não suave que é usada em [8], para efeitos de comparação de resultado, além disso será mostrado o mesmo sistema com o acréscimo de um 11º gerador, que será um gerador de fonte renovável, neste artigo será usado um gerador solar. Além disso, a demanda será dividida em um período de 24 horas e os dados de cada unidade geradora, assim como suas potências e todos os dados da função de custo de combustíveis é encontrada, respectivamente na Tabela 1 e a Tabela 2.

Os resultados representam uma média de 50 simulações realizadas, as simulações foram realizadas usando um computador Dell com um processador Intel i5 de oitava geração. Ademais, os parâmetros utilizados do GA foram: tamanho da população, que é igual a 60 e o número máximo de gerações, que é igual a 30000. Com isso, o DED foi resolvido primeiramente com GA + SQP, depois GA + IP, feito isso, prossegue-se para o método híbrido com uma meta-heurística evolutiva e dois algoritmos determinísticos, onde fez-se utilizando GA + SQP + IP. Por fim, foi feito GA + IP + SQP. Com isso, os resultados podem ser vistos conforme a Figura 3, onde é possível visualizar as boxplots utilizada em cada método. Assim, temos que a melhor combinação é a GA + SQP + IP, pois ela apresenta a melhor boxplot, além disso, na Tabela 3 observa-se que esta sequência de otimização se destaca três vezes com os melhores resultados de média, mediana e desvio padrão, porém o melhor resultado é da GA + SQP, isso por conta de vários pontos discrepantes como mostrar a boxplot da GA + SQP, na Figura 1.

Desta forma, prova-se que ao realizar a otimização com uma meta-heurística evolutiva aliada a dois algoritmos determinísticos é melhor do que uma otimização com uma meta-heurística evolutiva aliada a um algoritmo determinístico. Logo, aplica-se um 11º gerador de fonte renovável, podemos considerar, como por exemplo, um painel solar como fonte renovável, este gerador não entra na função custo, pois seu custo tende a 0, desta forma consideramos como nulo, assim ele fornece apenas potência para o sistema, onde esta potência será constante definida como 200 MW. Como se trata de um painel solar, essa potência será fornecida ao sistema apenas das 6:00 horas até as 16:00 horas. Com isso, os outros geradores que terão sua potência ajustada de acordo com a necessidade do sistema em determinada hora, tal que não exceda os limites de operação de cada gerador.

Tabela 1: Demanda de carga durante as 24 horas.

Hora	Carga (MW)	Hora	Carga (MW)	Hora	Carga (MW)
1	1036	9	1924	17	1480
2	1110	10	2072	18	1628
3	1258	11	2146	19	1776
4	1406	12	2220	20	2072
5	1480	13	2072	21	1924
6	1628	14	1924	22	1628
7	1702	15	1776	23	1332
8	1776	16	1554	24	1184

Fonte: ATTAVIRIYANUPAP, Pathom [8].

Tabela 2: Dados do Sistema-Teste.

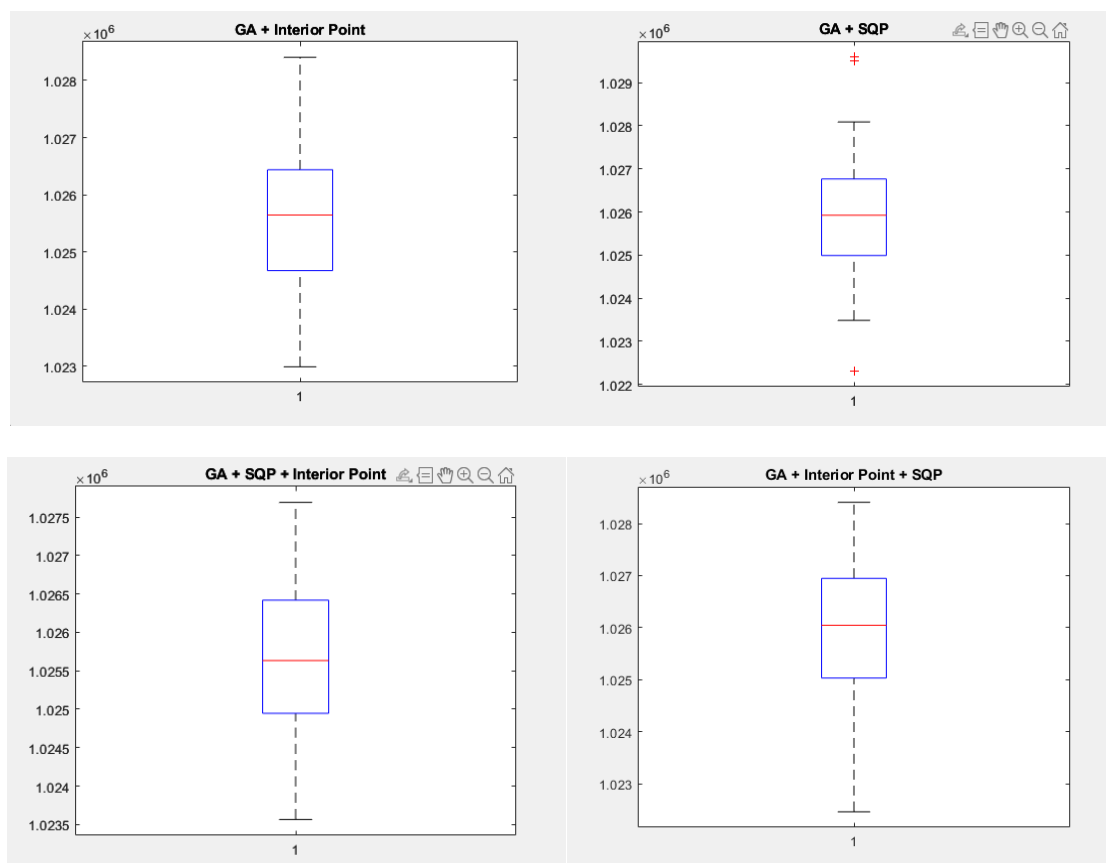
Unidades	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3	Gerador 4	Gerador 5
Pmax (MW)	470	460	340	300	243
Pmin (MW)	150	135	73	60	73
a (\$/MW ² h)	0.00043	0.00063	0.00039	0.00070	0.00079
b (\$/MW ² h)	21.60	21.05	20.81	23.90	21.62
c (\$/h)	958.20	1313.6	604.97	471.60	480.29
e (\$/h)	450	600	320	260	280
f (rad/MW)	0.041	0.036	0.028	0.052	0.063
UR	80	80	80	50	50
DR	80	80	80	50	50
Unidades	Gerador 6	Gerador 7	Gerador 8	Gerador 9	Gerador 10
Pmax (MW)	160	130	120	80	55
Pmin (MW)	57	20	47	20	55
a (\$/MW ² h)	0.00056	0.00211	0.00480	0.10908	0.00951
b (\$/MW ² h)	17.87	16.51	23.23	19.58	22.54
c (\$/h)	601.75	502.70	639.40	455.60	692.40
e (\$/h)	310	300	340	270	380
f (rad/MW)	0.048	0.086	0.082	0.098	0.094
UR	50	30	30	30	30
DR	50	30	30	30	30

Fonte: ATTAVIRIYANUPAP, Pathom [8].

O custo total de operação somente com 10 geradores utilizando a sequência de otimização GA + SQP + IP foi de \$1.025.540,16; enquanto adicionando o gerador de fonte renovável o custo cai para \$974.941,42, desta forma há uma economia significativa e vale ressaltar que o tempo utilizado para o processamento do código realizado no MATLAB foi de 44,88 segundos.

Além disso, na Tabela 3, o sinal de "+" na indica aquele algoritmo híbrido que mais se destacou nas simulações considerando todos os índices analisados (média, desvio, mediana, melhor resultado e boxplot).

Figura 1: Boxplots dos métodos utilizados.



Fonte: Autor.

Tabela 3: Análise dos resultados nas 50 simulações.

PARÂMETROS	GA + SQP	GA + LP	GA + LP + SQP	GA + SQP + LP
Média	-	-	-	+
Mediana	-	-	-	+
Desvio Padrão	-	-	-	+
Melhor Resultado	+	-	-	-
Boxplot	-	-	-	+

Fonte: Autor

Conclusões

Desta forma, o estudo de DED com inclusão de fonte renovável, com o uso da metodologia de solução e com a utilização de um SEEH aliado as técnicas de inteligência artificial para resolver o problema de DED é de tal forma uma abordagem eficiente e promissora para a otimização de sistemas de energia, assim como a operação deles. Além disso, a aplicação do algoritmo genético aliado a dois algoritmos de otimização determinísticos – GA, SQP, IP- mostrou-se mais eficiente do que realizada em [8] que é usada um algoritmo evolutivo e um algoritmo determinístico, tendo como os melhores

resultado a média, o desvio padrão, a mediana e o boxplot. Por fim, a inclusão de um gerador de fonte renovável reduziu de forma significativa o custo total de operação, demonstrando a viabilidade econômica e a contribuição para um desenvolvimento sustentável.

Agradecimentos

Agradecemos ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis (ANP) por meio do Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH/ANP (PRH 54.1 – UFMA)

Referências Bibliográficas

- 1) A. Wood, B. Wollenberg, and G. Sheblé, **Power Generation, Operation and Control**. 3ª ed. John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- 2) D. C. Walters and G. B. Sheble, **Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 3, p. 1325-1332, Aug 1993.
- 3) J.-B. Park, K.-S. Lee, J.-R. Shin, and K. Y. Lee, **A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Nonsmooth Cost Functions**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 1, p. 34-42, Feb. 2005.
- 4) M. A. Abido, **Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 4, p. 1529-1537, Nov. 2003.
- 5) Z. Yang, P. Yong, and M. Xiang, **Revisit power system dispatch: Concepts, models, and solutions**. iEnergy, vol. 2, no. 1, p. 43-62, Mar. 2023.
- 6) Y. Chen et al., **Security-Constrained Unit Commitment for Electricity Market: Modeling, Solution Methods, and Future Challenges**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 38, no. 5, p. 4668-4681, Sep. 2023.
- 7) D. W. Ross and S. Kim, **Dynamic Economic Dispatch of Generation**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 6, p. 2060- 2068, Nov. 1980.
- 8) P. Attaviriyanupap, H. Kita, E. Tanaka, and J. Hasegawa, **A hybrid EP and SQP for dynamic economic dispatch with nonsmooth fuel cost function**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 2, p. 411-416, May 2002.
- 9) M. F. Zaman, S. M. Elsayed, T. Ray, and R. A. Sarker, **Evolutionary Algorithms for Dynamic Economic Dispatch Problems**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 2, p. 1486-1495, Mar. 2016.
- 10) D. Santra, A. Mukherjee, K. Sarker, and S. Mondal, **Dynamic economic dispatch using hybrid metaheuristics**. Journal of Electrical Systems and Information Technology, vol. 3, p. 3726, Feb. 2020.