

Uma análise do desempenho do método evolução diferencial na resolução do problema de despacho econômico com ponto de carregamento de válvula

João Vitor Dias^{ORCID}

Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia, Bauru

✉ joao.dias@unesp.br

Edméa Cássia Baptista^{ORCID}

Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências, Bauru

Edilaine Martins Soler^{ORCID}

Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências, Bauru

✉ edilaine.soler@unesp.br

An analysis of the performance of the differential evolution method in solving the economic dispatch problem with valve point effects

Abstrac

One of the problems found in the area of Electrical Engineering is the problem of economic dispatch (PDE), which aims to reduce the total cost of energy by calculating the generation of each unit linked to the grid. Therefore, the purpose is to generate energy with the lowest possible fuel cost, meeting demand (consumers) and respecting all the restrictions of the generation system. A variant of the PDE is the PDE with valve loading point (PDE-PCV). This is formulated as a restricted, non-convex and non-differentiable optimization problem, and it is not possible to solve it with deterministic methods directly. Therefore, it is proposed in this work, to analyze the performance of the heuristic method Differential Evolution (DE) for the resolution of the PDE-PCV. A computer program was developed in Matlab software and tests with the PDE-PCV associated with electrical systems with 3, 13 and 40 generators were performed.

Key words: Economic Dispatch Problem; Differential Evolution; Optimization; Electrical Engineering.

Resumo

Um dos problemas encontrados na área de Engenharia Elétrica é o problema de despacho econômico (PDE), que visa reduzir o custo total da energia calculando a geração de cada unidade vinculada à rede. Assim, o objetivo é gerar energia com o menor custo de combustível possível, atendendo à demanda e respeitando todas as restrições do sistema de geração. Uma variante do PDE é o PDE com ponto de carga da válvula (PDE-PCV). Este, é formulado como um problema de otimização restrito, não convexo e não diferenciável, não sendo possível resolvê-lo diretamente com métodos determinísticos. Portanto, propõe-se neste trabalho, analisar o desempenho do método heurístico Evolução Diferencial (ED) na resolução do PDE-PCV. Foi desenvolvido um programa de computador em Matlab e realizados testes com o PDE-PCV associado aos sistemas elétricos com 3, 13 e 40 geradores.

Palavras-chave: Problema de Despacho Econômico; Evolução Diferencial; Otimização; Engenharia Elétrica.

1 INTRODUÇÃO

Vários modelos de otimização são explorados na área de Engenharia Elétrica, os quais são difíceis ou mesmo impossíveis de resolver com os métodos clássicos de otimização determinísticos presentes na literatura. O motivo desta dificuldade é a modelagem matemática do problema, a descontinuidade ou não diferenciabilidade e outras características do modelo [1]. Nestes casos, algoritmos bioinspirados são utilizados para resolver esses tipos de problemas. Algoritmos de inspiração biológica utilizam um método de construção para obter uma população inicial composta de possíveis soluções para o problema alvo. Com esta população inicial, são utilizadas técnicas de busca local e global para melhorar as soluções populacionais a fim de encontrar soluções de boa qualidade [1].

Principalmente na Engenharia Elétrica, um dos problemas que apresentam essa complexidade é o problema do despacho econômico (PDE). O objetivo do PDE é estabelecer as saídas das unidades de geração, a fim de atender à demanda de carga com custos operacionais mínimos, atendendo às restrições do sistema [2]. Desde que o PDE foi proposto na literatura, métodos têm sido usados para resolvê-lo, como as técnicas baseadas no gradiente [3], método de pontos interiores [4], entre outros. Uma variante do PDE clássico é o PDE com ponto de carregamento de válvula (PDE-PCV). O efeito de ponto de carregamento de válvula é o momento em que a válvula do grupo gerador é aberta para liberar a pressão e, assim, reduzir a eficiência energética do grupo gerador [5]. Na modelagem matemática, o efeito de ponto de carregamento de válvula é representado por uma função módulo de seno [6], o que torna o modelo matemático não diferenciável.

Como o PDE-PCV é não convexo e não diferenciável, não pode ser resolvido diretamente por métodos clássicos de otimização determinística. Portanto, é adequado a utilização de métodos heurísticos para resolver este problema. Existem muitos estudos na literatura que utilizam métodos heurísticos para resolver o PDE-PCV, como por exemplo, Busca Tabu [7], *Particle Swarm Optimization* [8] e *Simulated Annealing* [9]. Dentre esses métodos, destaca-se o método da Evolução Diferencial (ED) [12, 14]. Variações do método ED têm sido muito utilizadas na literatura para resolução do PDE-PCV [10, 11]. Em uma busca na base de dados *Scopus* realizada em abril de 2021, utilizando o campo “Título de artigo, resumo e palavra-chave”, e os termos: “dispatch economic” AND “valve point effect” AND “evolution differential”, obteve-se em torno de 140 trabalhos publicados desde o ano de 2005 sobre o tema, o que comprova a ampla utilização de abordagens que utilizam o método ED para resolução de problemas de PDE-PCV.

Assim, propomos neste trabalho analisar o desempenho do método ED em sua

forma clássica na resolução do PDE-PCV. Neste trabalho, são comparados os resultados obtidos de alguns métodos encontrados na literatura com os obtidos pelo método ED a fim de mostrar sua eficiência. O PDE-PCV é utilizado em diferentes situações com 3, 13 e 40 unidades geradoras de energia. Os resultados obtidos mostram o bom desempenho da ED e suas soluções promissoras. A robustez do método contrasta com sua simplicidade, o que mostra que este método heurístico é suficiente para explorar efetivamente o espaço de solução relacionado ao problema. Parte deste trabalho foi apresentado durante o X Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional do Rio Grande do Sul que ocorreu de 1 a 3 de dezembro de 2020, promovido pela Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional (SBMAC) [25].

A estrutura do artigo está organizada da seguinte forma. A seção 2 detalha o problema de despacho econômico com os pontos de carregamento. A seção 3 apresenta os princípios básicos do método ED. Na seção 4, são descritos os testes numéricos realizados e a análise dos resultados obtidos. Ao final do artigo, as conclusões são apresentadas na seção 5.

2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE DESPACHO ECONÔMICO COM PONTO DE CARREGAMENTO DE VÁLVULA

No PDE, espera-se encontrar o nível de geração de energia de cada unidade termelétrica de geração que atenda a demanda total do sistema com custo mínimo [1]. Portanto, o PDE pode ser considerado um problema de otimização não linear, no qual se deseja minimizar a função objetivo que determina o custo total de produção de energia. Uma função custo F_e é definida para cada unidade de geração de energia, que é chamada de função econômica, e caracteriza os custos de geração em termos da potência produzida. O custo de produção total é igual ao somatório da função de custo de combustível de cada gerador e é expresso por [14]:

$$F_e = \sum_{i=1}^n F_{e_i}(P_i) = \sum_{i=1}^n a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i, \quad (1)$$

em que:

F_e : é a função econômica;

$F_{e_i}(P_i)$: é a função econômica individual da i -ésima unidade geradora;

a_i, b_i e c_i : parâmetros da função custo de produção da unidade de geração i ;

P_i : é a potência gerada pela unidade geradora i .

O objetivo do PDE-PCV é minimizar a função econômica F_e expressa em (1), atendendo à demanda e respeitando os limites operacionais do sistema como representa-

dos pelas equações (2) e (3):

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D, \quad (2)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}. \quad (3)$$

É representado na expressão (2) a restrição de igualdade do balanço de potência, onde a potência necessária deve atender os balanços de potência, ou seja, a soma das potências das unidades geradores deve atender à demanda total do sistema. A potência demandada é definida por P_D e P_i é a potência gerada pela unidade geradora i . Na expressão (3), são expressas as restrições de desigualdades relacionadas ao limite da capacidade de geração de potência de cada unidade geradora. P_i^{\min} e P_i^{\max} são os limites mínimo e máximo de saída de energia da unidade de geração de energia i , respectivamente.

O efeito de ponto de válvula é o momento em que cada válvula em uma turbina começa a abrir [6], então a função objetivo torna-se não linear, descontínua e pode ser refinada por uma função seno [10]. Logo, a expressão (1) utilizada para calcular o custo total pode ser modificada para considerar o impacto do ponto valvar, de forma que [6]:

$$F_e = \sum_{i=1}^n F_{e_i}(P_i) = \sum_{i=1}^n a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + \sum_{i=1}^n |e_i \sin(f_i(P_i^{\min} - P_i))|, \quad (4)$$

onde e_i e f_i são constantes do efeito do ponto de válvula dos geradores. Consequentemente, o custo mínimo se dará minimizando (4). Assim, tem-se o modelo matemático do PDE-PCV:

$$\text{Min } F_e = \sum_{i=1}^n a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + \sum_{i=1}^n |e_i \sin(f_i(P_i^{\min} - P_i))|, \quad (5)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D, \quad (6)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}. \quad (7)$$

Considerando a complexidade do PDE, utilizaremos o método ED proposto por [15], que será apresentado em detalhes na próxima seção. O motivo da escolha desse método é que, além de sua fácil implementação, apresentou bons resultados mostrando ser muito eficaz.

3 MATERIAL E MÉTODO

A ED é um método de otimização muito eficiente que tem recebido cada vez mais relevância no âmbito da otimização não linear com variáveis contínuas [16]. Em 1995, ocorreu a primeira publicação sobre esse método no relatório técnico de [15]. Esse método tem se apresentado versátil e eficaz em muitas aplicações práticas, desde o projeto de filtros digitais até localização do foco sísmico de terremotos [16].

O objetivo desta seção é apresentar uma visão geral sobre o método ED e seu mecanismo de busca, sustentado no operador de mutação diferencial, que dá nome ao método. Embora o algoritmo deste método seja classificado como um Algoritmo Evolutivo (AE), e se enquadre em um esquema geral de um AE, a mutação diferencial não tem base ou inspiração em nenhum processo natural [16]. O procedimento do método ED é regido pelas seguintes etapas:

- i) gerar a população inicial: gerar de forma aleatória com distribuição normal uma população inicial representada por $P_i = \{P_{g,i} / i = 1, \dots, N\}$ em que N é o tamanho da população, g é o índice da geração corrente e i é o índice do indivíduo na população;
- ii) selecionar indivíduos: um indivíduo $P_{g,i}$ é escolhido de forma aleatória para ser substituído e outros três diferentes indivíduos P_{g,r_1} , P_{g,r_2} e P_{g,r_3} são selecionados aleatoriamente;
- iii) mutação: este processo que resulta o vetor doador $v_{g,i}$ pode ser escrito matematicamente por $v_{g,i} = P_{g,r_3} + F (P_{g,r_1} - P_{g,r_2})$, em que $v_{g,i}$ é a i -ésima solução mutante definidos em ii), F é uma constante real, em $[0, 2]$, que determina o tamanho do passo a ser dado na direção definida pelo vetor da diferença;
- iv) *crossover*: na versão clássica do algoritmo de ED, emprega-se a recombinação discreta com probabilidade $C \in [0, 1]$ (distribuição binomial) $u_{g,i,j} = P_{g,r_3,j} + F (P_{g,r_1,j} - P_{g,r_2,j})$ se $U_{(0,1)} \leq C$ e caso contrário, $u_{g,i,j} = P_{g,i,j}$. O vetor $u_{g,i,j}$ é a solução teste na geração g do indivíduo i na posição j , F é o fator de escala e C é a probabilidade de aceitação de informação da solução mutante;
- v) critério de parada: neste trabalho adotou-se o número máximo de gerações.

Nas inúmeras aplicações, o algoritmo de ED tem se mostrado eficiente, adaptável e versátil. Na próxima seção, mostraremos os resultados deste algoritmo aplicado em um PDE-PCV para 3 casos diferentes e compará-los com os resultados de outros algoritmos encontrados na literatura.

4 TESTES NUMÉRICOS

O algoritmo de ED foi implementado no Matlab versão 2010b e todos os testes foram realizados em um computador com processador Intel® Core™ i3-7100U de 2,40 GHz com 4 GB de memória RAM. Foram realizados testes com o PDE-PV para três sistemas testes: com 3, 13 e 40 geradores. Os dados para os casos com 3 e 40 unidades geradoras foram obtidos em [17]. Já os dados para o sistema com 13 unidades geradoras foram obtidos de [18]. Com o objetivo de verificar a qualidade do método ED proposto, comparou-se os resultados obtidos para os três casos, de 3, 13 e 40 unidades geradoras com os resultados obtidos pelos métodos propostos em [4], [10], [13], [19], [20], [21], [22], [23] e [24].

4.1 Caso 1: 3 unidades geradoras

No caso do PDE-PV com 3 unidades geradoras, foi considerada a potência demandada igual a 850 MW e os coeficientes de custo para cada unidade geradora como na Tabela 1. O critério de parada adotado foi de 300 gerações com uma população de 30 indivíduos. O tempo de execução do método ED foi de 0,53 (s). Os parâmetros adotados foram $F = 0,9$, e $C = 0,7$ determinados por testes numéricos. Foram realizadas 100 simulações e é apresentado o melhor resultado dessas simulações. Os custos obtidos por cada abordagem são apresentados na Tabela 2 e comparados com o da ED para o caso em análise. Analisando a Tabela 2, vemos que o resultado da ED só difere em casas decimais em relação aos outros métodos. A Tabela 3 mostra a melhor solução obtida pelo método ED.

Tabela 1: Dados para o caso 1

Gerador	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a	b	c	e	f
1	100	600	0.001562	7.92	561	300	0.0315
2	50	200	0.004820	7.97	78	150	0.063
3	100	400	0.001940	7.85	310	200	0.042

Fonte: [17]

Tabela 2: Função custo para o caso 1

Método	Custo mínimo (\$)
ED-SQ(1) [10]	8234,070
PDPCBLM [4]	8234,200
SADE [13]	8234,020
ED	8234,080

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 3: Melhor solução da ED para o caso 1

Potência	Geração
P_1	300,2573
P_2	149,7333
P_3	400,0000
$\sum_{i=1}^n P_i$	850,000

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.2 Caso 2: 13 unidades geradoras

No segundo caso estudado neste trabalho, consiste do PDE-PV com 13 unidades geradoras considerando potência demandada igual a 2520 MW e os coeficientes de custo para cada unidade geradora como na Tabela 4. O critério de parada adotado foi de 300 gerações com uma população de 100 indivíduos. O tempo de execução do método ED foi de 2,88 (s). Os parâmetros adotados foram $F = 1$, e $C = 1$ determinados por testes numéricos. Foram realizadas 100 simulações e é apresentado o melhor resultado dessas simulações. Os custos obtidos por cada abordagem são apresentados na Tabela 5 e novamente comparados com o da ED para o caso em análise. A Tabela 5 nos mostra que o resultado da ED é superior ao resultado de [19] e [21] e se mostra competitivo em relação ao método de [20], obtendo uma solução muito próxima. A Tabela 6 mostra a melhor solução obtida pelo método ED.

Tabela 4: Dados para o caso 2

Gerador	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a	b	c	e	f
1	00	680	0.00028	8.10	550	300	0.035
2	00	360	0.00056	8.10	309	200	0.042
3	00	360	0.00056	8.10	307	200	0.042
4	60	180	0.00324	7.74	240	150	0.063
5	60	180	0,00324	7.74	240	150	0.063
6	60	180	0.00324	7.74	240	150	0.063
7	60	180	0.00324	7.74	240	150	0.063
8	60	180	0.00324	7.74	240	150	0.063
9	60	180	0.00324	7.74	240	150	0.063
10	40	120	0.00284	8.6	126	100	0.084

11	40	120	0.00284	8.6	126	100	0.084
12	55	120	0.00284	8.6	126	100	0.084
13	55	120	0.00284	8.6	126	100	0.084

Fonte: [18]

Tabela 5: Função custo para o caso 2

Método	Custo mínimo (\$)
TSA [19]	24184,0550
MCSA [20]	24169,9177
FCASO-SQP [21]	24190,6300
ED	24174,2081

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 6: Função custo para o caso 2

Potência	Geração
P_1	149,6105
P_2	149,6105
P_3	224,5765
P_4	109,9056
P_5	109,9444
P_6	109,8624
P_7	109,9126
P_8	109,8883
P_9	109,9050
P_{10}	40,1837
P_{11}	77,4052
P_{12}	55,0226
P_{13}	55,1896
$\sum_{i=1}^n P_i$	850,000

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.3 Caso 3: 40 unidades geradoras

O terceiro e último caso abordado neste trabalho, consiste em 40 unidades geradoras considerando potência demandada igual a 10500 MW e os coeficientes de custo para cada unidade geradora estão na Tabela 7. O critério de parada adotado foi de 6000 gerações com uma população de 200 indivíduos. O tempo de execução do método ED foi de 8,78 (s). Os parâmetros adotados foram $F = 0,8$, e $C = 0,9$ determinados por testes numéricos. Foram realizadas 100 simulações e é apresentado o melhor resultado dessas simulações. Os custos obtidos por cada abordagem são apresentados na Tabela 8 e novamente comparados com o da ED para o caso em análise. Nota-se pela Tabela 8 que o resultado da ED é superior ao resultado de [22] e [23] e mostra-se competitiva em relação ao resultado de [24], obtendo uma solução muito próxima. A Tabela 9 mostra a melhor solução obtida pelo método ED.

Tabela 7: Dados para o caso 3

Gerador	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a	b	c	e	f
1	36	114	0,00690	6,73	94,705	100	0,084
2	36	114	0,00690	6,73	94,705	100	0,084
3	60	120	0,02028	7,07	309,54	100	0,084
4	80	190	0,00942	8,18	369,03	150	0,063
5	47	97	0,0114	5,35	148,89	120	0,077
6	68	140	0,01142	8,05	222,33	100	0,084
7	110	300	0,00357	8,03	287,71	200	0,042
8	135	300	0,00492	6,99	391,98	200	0,042
9	135	300	0,00573	6,60	455,76	200	0,042
10	130	300	0,00605	12,9	722,82	200	0,042
11	94	375	0,00515	12,9	635,20	200	0,042
12	94	375	0,00569	12,8	654,69	200	0,042
13	125	500	0,00421	12,5	913,40	300	0,035
14	125	500	0,00752	8,84	1760,4	300	0,035
15	125	500	0,00708	9,15	1728,3	300	0,035
16	125	500	0,00708	9,15	1728,3	300	0,035
17	220	500	0,00313	7,97	647,85	300	0,035
18	220	500	0,00313	7,95	649,69	300	0,035

19	242	550	0,00313	7,97	647,83	300	0,035
20	242	550	0,00313	7,97	647,81	300	0,035
21	254	550	0,00298	6,63	785,96	300	0,035
22	254	550	0,00298	6,63	785,96	300	0,035
23	254	550	0,00284	6,66	794,53	300	0,035
24	254	550	0,00284	6,66	794,53	300	0,035
25	254	550	0,00277	7,10	801,32	300	0,035
26	254	150	0,00277	7,10	801,32	300	0,035
27	10	150	0,52124	3,33	1055,1	120	0,077
28	10	150	0,52124	3,33	1055,1	120	0,077
29	10	150	0,52124	3,33	1055,1	120	0,077
30	47	97	0,01140	5,35	148,89	120	0,77
31	60	190	0,00160	6,43	222,92	150	0,063
32	60	190	0,00160	6,43	222,92	150	0,063
33	60	190	0,00160	6,43	222,92	150	0,063
35	90	200	0,001	8,62	116,58	200	0,042
36	90	200	0,001	8,62	116,58	200	0,042
37	25	110	0,0161	5,88	307,45	80	0,098
38	25	110	0,0161	5,88	307,45	80	0,098
39	25	110	0,0161	5,88	307,45	80	0,098
40	242	550	0,00313	7,97	647,83	300	0,035

Fonte: [17]

Tabela 8: Função custo para o caso 3

Método	Custo mínimo (\$)
CTLBO	121553,830
ACO	121532,410
IRDPSO	121506,040
ED	121508,0200

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 9: Melhor solução para o caso 3

Potência	Geração	Potência	Geração
P_1	112,0562	P_{21}	523,5360
P_2	111,9426	P_{22}	523,6274
P_3	98,1340	P_{23}	523,5303
P_4	180,0724	P_{24}	523,6994
P_5	89,6216	P_{25}	523,7123
P_6	105,7954	P_{26}	523,3524
P_7	259,9476	P_{27}	10,3060
P_8	284,9453	P_{28}	10,3536
P_9	284,7581	P_{29}	10,4601
P_{10}	279,5804	P_{30}	89,7392
P_{11}	168,7928	P_{31}	189,6660
P_{12}	169,0082	P_{32}	160,8339
P_{13}	214,5484	P_{33}	189,8313
P_{14}	394,3895	P_{34}	167,5017
P_{15}	304,4559	P_{35}	199,3607
P_{16}	304,7425	P_{36}	164,8133
P_{17}	489,3583	P_{37}	89,8781
P_{18}	489,2255	P_{38}	90,7211
P_{19}	511,3687	P_{39}	109,6478
P_{20}	511,2334	P_{40}	511,4504
$\sum_{i=1}^n P_i$	10.499,998		

Fonte: Elaborada pelos autores.

A ED mostrou-se competitiva em relação aos métodos analisados, conseguindo obter soluções com menor custo em relação a alguns métodos encontrados na literatura para os 3 casos testados. Mesmo com o número de variáveis aumentado, o método não apresentou dificuldades em sua convergência, além de apresentar um erro muito pequeno no somatório das potências.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentada uma breve descrição sobre o método ED para a resolução do PDE-PV. Utilizando os resultados de [4], [10], [13], [19], [20], [21], [22], [23] e [24], pôde-se comparar e concluir que o método implementado é competitivo para a resolução deste tipo de problema, apresentando soluções com menor custo quando comparado com alguns métodos e se aproximando dos resultados de outros, como visto na seção 4.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa de estudos. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ (Processos nº 309780/2017-9 e 314711/2020-1).

REFERÊNCIAS

- [1] A. B. S. Serapião, “Fundamentos de Otimização por Inteligência de Enxames: uma visão geral”, Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica, vol. 20, no. 3, pp. 271-304, 2009.
- [2] M. A. Abido, “A Novel Multiobjective Evolutionary Algorithm for Environmental/Economic Power Dispatch”, Electric Power Systems Research, vol. 65, no. 1, pp. 71-81, 2003.
- [3] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, Power generation, operation, and control, 3ª ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [4] D. N. Silva, “Método Primal-Dual Previsor-Corretor de Pontos Interiores e Exteriores com Estratégias de Correção de Inércia e Suavização Hiperbólica Aplicado ao Problema de Despacho Econômico com Ponto de Carregamento de Válvula e Representação da Transmissão”, Dissertação, Engenharia Elétrica, Bauru, 2014.
- [5] D. C. Jeronymo, “Metaheurísticas Aplicadas ao Problema de Despacho Econômico de Energia Elétrica”, Dissertação, Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- [6] D. C. Walters, G. B. Sheble, “Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 3, pp. 1325-1332, 1993.
- [7] W. Lin, F. Cheng, M. Tsay, “An Improved Tabu Search for Economic Dispatch with Multiple Minima”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 1, pp. 108–112, 2002.
- [8] R. Eberhart, J. Kennedy, “Particle Swarm Optimization”, in Proceedings of ICNN'95- International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995.
- [9] K. P. Wong, Y. W. Wong, “Genetic and Genetic/Simulated-Annealing Approaches to Economic Dispatch”. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 141, no. 5, pp. 507-513, 1994.
- [10] L. S. Coelho, V. C. Mariani, “Evolução Diferencial Híbrida com Programação Quadrática Aplicada ao Problema de Despacho Econômico de Energia Elétrica”, Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática, vol. 17, no. 4, pp. 409-423, 2006.
- [11] G. L. Andrade, “Algoritmo Evolução Diferencial Modificado Aplicado ao Problema do Despacho Econômico de Carga”, Dissertação, Engenharia Elétrica, Alegrete, 2019.
- [12] R. Storn, K. Price, “Differential Evolution– A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization Over Continuous Spaces”, Journal of Global Optimization, vol. 11, no. 4, p. 341-359, 1997.

- [13] D. Zou, S. Li, G. Wang, Z. Li, H. Ouyang, “An Improved Differential Evolution Algorithm for the Economic Load Dispatch Problems with or without Valve-Point Effects”, *Applied Energy*, vol. 181, pp. 375–390, 2016.
- [14] M. Steinberg, T. Smith, “Differential Evolution: Fundamentals and Applications in Electrical Engineering”, New Jersey John Wiley & Sons, 2011.
- [15] R. Storn, “Differential Evolution - A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Spaces”, Technical report, International Computer Science Institute, vol. 11, 1995.
- [16] A. Gaspar-Cunha, R. Takahashi, C. H. Antunes, *Manual de Computação Evolutiva e Metaheurística*. Minas Gerais: Editora da Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- [17] N. Sinha, R. Chakrabarti, R. Chattopadhyay, “Evolutionary Programming Techniques for Economic Load Dispatch”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 7, no. 1, pp. 83–94, 2003.
- [18] M. M. A. Samed, “Um Algoritmo Genético Híbrido Coevolutivo para Resolver Problemas de Despacho”, Tese, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2004.
- [19] S. Khamsawang, S. Jiriwibhakorn, “DPSO-TSA for Economic Dispatch Problem with Non Smooth and Non Continuous Cost Functions”, *Energy Convers Manage* 2010;51(2):365–75.
- [20] J. Zhao, S. Liu, M. Zhou, X. Guo, L. Qi, “Modified Cuckoo Search Algorithm to Solve Economic Power Dispatch Optimization Problems”, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 5, no. 4, pp. 794–806, 2018.
- [21] Cai J, Li Q, Li L, Peng H, Yang Y. A hybrid FCASO-SQP Method For Solving the Economic Dispatch Problems with Valve-Point Effects. *Energy* 2012; 38(1): 346–53.
- [22] X. He. Y. Rao, J. Huang, “A Novel Algorithm for Economic Load Dispatch of Power Systems”, *Neurocomputing*, vol. 171, pp. 1454–1461, 2016.
- [23] S. Pothiya, I. Ngamroo, W. Kongprawechnon, “Ant Colony Optimisation for Economic Dispatch Problem with Non-Smooth Cost Functions”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 478-487, 2010.
- [24] W. T. Elsayed, et al. “Improved Random Drift Particle Swarm Optimization with Self-Adaptive Mechanism for Solving the Power Economic Dispatch Problem”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 3, p. 1017–1026, 2017.
- [25] J. V. Dias, E. C. Baptista, E. M. Soler. Uma Análise do desempenho do método Evolução Diferencial na Resolução do Problema de Despacho Econômico com Ponto de Carregamento de Válvula, *Anais do X Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional do Rio Grande do Sul - ERMAC-RS, EDIPUCRS*, 2020.

BREVE BIOGRAFIA



João Vitor Dias  <https://orcid.org/0000-0001-9029-1080>

Licenciado em Matemática pela Universidade Estadual Paulista – UNESP, campus de Bauru (2018), e mestre em Engenharia Elétrica na Universidade Estadual Paulista – UNESP, campus de Bauru (2021).



Edméa Cássia Baptista  <https://orcid.org/0000-0002-5642-8925>

Licenciada em Matemática pela Universidade Estadual Paulista-UNESP, em 1988, obteve os títulos de mestre em Ciência da Computação e doutora em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo, em 1993 e 2001, respectivamente. Atuou como Professora Associada no Departamento de Matemática da Unesp, em Bauru, até 2019, e como Professora Voluntária neste departamento até junho de 2021. Atuou nas áreas de otimização, programação não linear, fluxo de potência ótimo e planicidade.



Edilaine Martins Soler  <https://orcid.org/0000-0002-7615-5768>

Bacharel e Licenciada em Matemática pela Universidade de São Paulo (2005, 2007), mestre em Ciências da Computação e Matemática Computacional pela Universidade de São Paulo (2008) e doutora em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2011). Atualmente, é Professora Assistente Doutora na Universidade Estadual Paulista - Unesp. Tem experiência na área de otimização, atuando principalmente em problemas relacionados à área de energia elétrica.