ReGeo ISSN: 2177-3246

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA: COLÔNIA DE FORMIGAS APLICADA À ESTIMAÇÃO HARMÔNICA

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN POWER QUALITY: ANT COLONY OPTIMIZATION FOR HARMONIC ESTIMATION

INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA: OPTIMIZACIÓN POR COLONIA DE HORMIGAS APLICADA A LA ESTIMACIÓN ARMÓNICA

https://doi.org/10.56238/revgeov17n7-202

Data de submissão: 08/06/2026 **Data de publicação:** 23/07/2026

Manoel Villas Bôas Júnior
Doutor em Ciência Tecnologia e Inovação em Agropecuária
Instituição: Universidade Estácio de Sá (UNESA) - Niterói
E-mail: Manoel.villas@professores.estacio.br

Rafael Bahiense Brasão
Bacharel em Sistemas de Informação
Instituição: Universidade Estácio de Sá (UNESA) - Niterói
E-mail: rbahiensebraptor@gmail.com

Davi Azeredo Costa
Graduando em Sistemas de Informação
Instituição: Universidade Estácio de Sá (UNESA) - Niterói
E-mail: 202504158634@alunos.estacio.br

Luis Henrique Vieira Lima
Graduando em Ciências da Computação
Instituição: Universidade Estácio de Sá (UNESA) - Niterói
E-mail: 202504158634@alunos.estacio.br

Vinicius Drumond de Gonzaga
Mestre em Ciência e Tecnologia Nucleares
Instituição: Universidade Estácio de Sá (UNESA) - Niterói
E-mail: Vinicius.gonzaga@professores.estacio.br

RESUMO
Investiga-se a Otimização por Colônia de Formigas (ACO) como estratégia de Inteligência Artificial para a estimação de harmônicos em sistemas elétricos de potência, no contexto de Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Parte-se do modelo harmônico com componente contínua (CC) de decaimento exponencial e dos cenários sintéticos de referência da literatura (RABÊLO *et al.*, 2011), tratando o problema como a minimização do erro entre o sinal de referência e o sinal reconstruído. Por se tratar de um espaço de busca contínuo e de alta dimensão (offset CC, constante de decaimento e amplitudes seno/cosseno de cada harmônico), adota-se a variante de ACO para domínios contínuos (ACOR), na qual um arquivo de soluções e kernels gaussianos substituem a matriz de feromônio discreta. O estudo compara a abordagem proposta com a TDF e com o PSO reportado na literatura, avaliando a capacidade de reconstrução do sinal e de estimação da componente CC com decaimento.

Palavras-chave: Qualidade da Energia Elétrica. Distorção Harmônica. Metaheurísticas. ACO. Estimação de Sinais.

ABSTRACT
Ant Colony Optimization (ACO) is investigated as an Artificial Intelligence strategy for harmonic estimation in electrical power systems, within the broader context of Power Quality (PQ). The study is based on a harmonic model with an exponentially decaying DC component and on the synthetic numerical scenarios reported in the literature (RABÊLO *et al.*, 2011), formulating the problem as minimizing the error between the reference signal and its reconstructed counterpart. Because the search space is continuous and high-dimensional (DC offset, decay constant, and sine/cosine amplitudes per harmonic), the continuous-domain ACO variant (ACOR) is adopted, in which a solution archive and Gaussian kernels replace the discrete pheromone matrix. The study compares the proposed approach with DFT and with the PSO baseline reported in the literature, assessing signal reconstruction and recovery of the decaying DC component.

Keywords: Power Quality. Harmonic Distortion. Metaheuristics. Ant Colony Optimization. Signal Estimation.

RESUMEN
Se investiga la Optimización por Colonia de Hormigas (ACO) como una estrategia de Inteligencia Artificial para la estimación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia, en el contexto de Calidad de Energía Eléctrica (QEE). Se parte del modelo armónico con componente continua (CC) de decaimiento exponencial y de los escenarios sintéticos de referencia de la literatura (RABÊLO *et al.*, 2011), tratando el problema como la minimización del error entre la señal de referencia y la señal reconstruida. Debido a que el espacio de búsqueda es continuo y de alta dimensión (offset CC, constante de decaimiento y amplitudes seno/coseno de cada armónico), se adopta la variante de ACO para dominios continuos (ACOR), en la cual un archivo de soluciones y núcleos gaussianos reemplazan la matriz de feromona discreta. El estudio compara el enfoque propuesto con la TDF y con el PSO reportado en la literatura, evaluando la capacidad de reconstrucción de la señal y de estimación de la componente CC con decaimiento.

Palabras clave: Calidad de Energía Eléctrica. Distorsión Armónica. Metaheurísticas. ACO. Estimación de Señales.

1 INTRODUÇÃO

A Qualidade da Energia Elétrica (QEE) é um requisito fundamental em sistemas elétricos modernos, afetando diretamente a confiabilidade, a eficiência e a vida útil de equipamentos. Distorções harmônicas oriundas de cargas não lineares, conversores eletrônicos de potência e cargas industriais impactam parâmetros como a Distorção Harmônica Total (THD), podendo levar a perdas adicionais, aquecimento de transformadores e disparos indevidos de proteções (DUGAN *et al.*, 2003).

Métodos clássicos de análise de harmônicos, como a Transformada Discreta de Fourier (TDF), fornecem uma base consolidada, mas apresentam limitações em cenários com ruído, presença de componente contínua e janelas de observação reduzidas. Em particular, a TDF não modela a componente contínua (CC) com decaimento exponencial típica de fenômenos transitórios: como o decaimento não pertence à base ortogonal de Fourier da janela, sua energia se espalha pelo espectro e enviesa as amplitudes estimadas, sobretudo a da própria CC (RABÊLO *et al.*, 2011). O problema de estimação harmônica, nesse contexto, pode ser formulado como um problema de otimização sobre os parâmetros de um modelo baseado em Série de Fourier, ajustado às amostras do sinal

Metaheurísticas de Inteligência de Enxame têm sido empregadas com sucesso na estimação de parâmetros, inclusive na QEE, oferecendo maior flexibilidade frente a funções-objetivo não lineares e superfícies de erro complexas. RABÊLO *et al.* (2011) aplicaram a Otimização por Enxame de Partículas (PSO) a esse problema e obtiveram erro médio inferior a 0,03% na estimação dos componentes harmônicos de sinais de tensão e corrente, superando claramente a TDF, cujo erro foi da ordem de 7% e se concentrou justamente na componente CC com decaimento. Esse trabalho constitui o baseline direto da presente investigação.

Investiga-se o uso da Otimização por Colônia de Formigas (ACO) como metaheurística principal para a estimação de harmônicos. A ACO, inspirada no comportamento coletivo de formigas, utiliza feromônio e heurística para guiar a construção de soluções, combinando intensificação e exploração (DORIGO, 1992; DORIGO; STÜTZLE, 2004). Como o problema é contínuo e de alta dimensão (offset CC, constante de decaimento e amplitudes seno/cosseno de cada harmônico), adota-se a variante **ACO para domínios contínuos (ACOR)** (SOCHA; DORIGO, 2008), na qual um arquivo de soluções e kernels gaussianos substituem a matriz de feromônio discreta usada em problemas de grade.

O objetivo principal deste artigo é avaliar a ACO na estimação harmônica em sistemas elétricos, replicando cenários de estudos de referência da literatura e comparando o desempenho da ACO com técnicas clássicas de análise harmônica e com uma metaheurística de enxame consolidada, detalhadas na seção de resultados. A contribuição reside em: (i) adaptar uma formulação simples de ACO ao

problema de QEE; (ii) avaliar sistematicamente a ACO sob diferentes níveis de ruído; e (iii) discutir a viabilidade da ACO como componente de apoio à decisão em aplicações de monitoramento de QEE.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 REVISÃO DE LITERATURA

A Qualidade da Energia Elétrica engloba um conjunto de fenômenos relacionados à forma de onda de tensão e corrente, incluindo afundamentos, elevações, flutuações e distorções harmônicas. Diversos trabalhos de referência discutem os impactos dos harmônicos sobre equipamentos e redes, bem como metodologias para sua análise e mitigação (DUGAN *et al.*, 2003).

O sinal periódico de tensão ou corrente pode ser modelado pela expansão em Série de Fourier, decompondo a forma de onda em uma componente contínua e um conjunto de componentes harmônicas. O problema de estimação harmônica consiste em determinar as amplitudes (e, quando aplicável, fases) dessas componentes de modo que o sinal reconstruído se aproxime do sinal medido (WILLIAMS, 1998). Métodos clássicos, como a TDF e variantes de mínimos quadrados, oferecem soluções fechadas em condições ideais, mas sua performance degrada na presença de ruído, variações de frequência fundamental e componentes não estacionárias, em especial a CC com decaimento exponencial (RABÊLO *et al.*, 2011).

2.2 MODELAGEM DO PROBLEMA

2.2.1 Modelo harmônico de referência

Adota-se o modelo harmônico com componente contínua de decaimento exponencial e (N_h) harmônicos:

$$x(t)=x_0 e^{-\lambda t}+\sum_{k=1}^{N_h}\left[a_k \cos(k\,\omega_0 t)+b_k \sin(k\,\omega_0 t)\right] \qquad (1)$$

Em que x_0 é a amplitude da componente contínua (CC); λ é a constante de decaimento da CC; a_k e b_k são as amplitudes associadas aos termos cosseno e seno da k -ésima componente harmônica, e ω_0 é a frequência fundamental do sistema. Considerando-se uma janela de observação com N amostras igualmente espaçadas, obtém-se o vetor de amostras $x(t_n)$, $(n=1,\ldots,N)$, que será usado na estimação dos parâmetros.

2.2.2 Vetor de parâmetros e função-objetivo

A estimação harmônica é formulada como o problema de determinar o conjunto de parâmetros do modelo da Seção 2.2.1. Para um modelo com N_h componentes harmônicas e CC com decaimento, define-se o vetor de parâmetro:

$$\theta = \left[x_0, \lambda, a_1, b_1, a_2, b_2, \ldots, a_{N_h}, b_{N_h} \right] \text{¿} \qquad (2)$$

Esse vetor possui dimensão $2N_h+2$, reunindo a componente contínua, a constante de decaimento e as amplitudes cosseno e seno de cada componente harmônico em ordem intercalada (16 parâmetros para $N_h=7$). Cada solução candidata gerada pela ACO representa uma possível realização desse conjunto de parâmetros. A ordem intercalada é a mesma usada na implementação computacional $\left[x0, \lambda, Ac_1, As_1, \ldots, Ac_H, As_H \right]$. Para avaliar a qualidade de cada solução, utiliza-se como função-objetivo o erro quadrático médio (EQM) entre o sinal medido $x(t_n)$ e o sinal reconstruído $\acute{x}(t_n \mid \theta)$

$$f(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \left[x(t_n) - \acute{x}(t_n \mid \theta) \right]^2 \qquad (3)$$

A ACO busca o vetor θ que minimiza $f(\theta)$. De forma equivalente, pode-se maximizar a função de aptidão do baseline (RABÊLO *et al.*, 2011), $FA = 1/\left(\sqrt{f(\theta)} + \Delta\right)$, com $\Delta = 10^{-5}$ para evitar overflow quando o erro é nulo.

2.2.3 Espaço de busca e restrições

O espaço de busca é determinado pelos limites admissíveis dos parâmetros de θ . Para as amplitudes (CC e harmônicas), adotam-se intervalos da forma:

$$x_0, a_k, b_k \in \left[A_{min}, A_{max} \right], \lambda \in \left[0, \lambda_{max} \right] \qquad (4)$$

Esses limites refletem a faixa dinâmica típica dos sinais de tensão e corrente (em pu), evitando soluções fisicamente implausíveis ou numericamente instáveis; a constante de decaimento é restrita a valores não negativos ($\lambda \geq 0$). A frequência fundamental ω_0 é fixada com base na frequência nominal

do sistema, conforme prática comum em estimação harmônica; sua exclusão do vetor de otimização reduz a dimensionalidade do problema. Para garantir que todas as soluções respeitem o espaço viável, o processo de amostragem da ACO projeta (_clip_) cada parâmetro nos intervalos pré-definidos.

2.3 FORMULAÇÃO ACOR

Diferentemente da ACO em grade, o ACOR opera diretamente no espaço contínuo, substituindo a matriz de feromônio por um arquivo T de k soluções, ordenado por qualidade (menor EQM primeiro). A cada solução de ranking l associa-se um peso gaussiano, e a probabilidade de selecioná-la como guia é:

$$w_l = \frac{1}{q\,k\,\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(l-1)^2}{2q^2k^2}\right), \quad p_l = \frac{w_l}{\sum_{j=1}^{k} w_j}, \qquad (5)$$

Em que q controla a pressão de seleção (localidade da busca). Para gerar uma nova formiga, sorteia-se uma guia $l \sim p_l$ e, para cada dimensão i , amostra-se de uma gaussiana centrada no valor da guia, com desvio proporcional ao espalhamento do arquivo:

$$s^i \sim N\left(\mu_l^i, \sigma_l^i\right), \mu_l^i = T_l^i, \sigma_l^i = \xi \sum_{e=1}^{k} \frac{\left|T_e^i - T_l^i\right|}{k-1}, \qquad (6)$$

em que ξ (análogo à evaporação) controla a velocidade de convergência. A cada iteração geram-se m formigas, que são unidas ao arquivo. Em seguida, as soluções são reordenadas por EQM e mantêm-se as k melhores. Esse mecanismo concentra a amostragem em regiões promissoras do espaço de busca, desempenhando papel análogo ao depósito de feromônio. O processo é repetido até a estabilização, com parada antecipada por estagnação.

2.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

1. Representa-se cada solução candidata (formiga) pelo vetor de parâmetros θ .
2. Inicializa-se o arquivo de soluções uniformemente no espaço de busca.
3. Em cada iteração, amostram-se novas soluções a partir dos kernels gaussianos do arquivo (Seção 2.3).

4. Avalia-se a função-objetivo $f(\theta)$ (EQM) para cada solução.
5. Atualiza-se o arquivo, mantendo as k melhores soluções.

O protocolo replica, tanto quanto possível, os cenários do baseline (RABÊLO *et al.*, 2011): as formas de onda sintéticas de tensão ($V(t)$: $x_0 = 0{,}0550$, $\lambda = 0{,}4$, 7 harmônicos) e corrente ($I(t)$: $x_0 = 0{,}2491$, $\lambda = 0{,}4$, 7 harmônicos), amostradas em uma janela de 1 ciclo com 64 amostras, comparando ACO × TDF × PSO. Esses sinais possuem coeficientes conhecidos e funcionam como benchmark controlado; portanto, os resultados validam a recuperação paramétrica em cenário sintético, não em medições reais de rede. Adicionalmente, avalia-se a robustez sob ruído branco gaussiano em diferentes níveis de SNR.

Tabela 1. Hiperparâmetros do ACOR

Parâmetro	Padrão	Variações (ablação)
Tamanho da memória de soluções (k)	50	—
Formigas por iteração (m)	30	[20; 60]
Pressão de seleção (q)	0,1	[0,05; 0,5]
Velocidade de convergência (ξ)	0,85	[0,7; 0,9]
Iterações máximas	3.000	parada antecipada (patience = 150)
Amostras por janela	64	—
seed	42	—
Tamanho da memória de soluções (k)	50	—

Fonte: Os Autores, 2025

3 RESULTADOS

3.1 MATERIAIS E FERRAMENTAS UTILIZADAS

A execução dos experimentos foi realizada em ambiente local, utilizando um notebook Dell Vostro 15 3000, processador Intel® Core™ i7 e 32 GB de memória RAM.

Os códigos foram desenvolvidos em Python 3.11, com uso das bibliotecas padrão (`numpy`, `matplotlib`, `argparse`, entre outras).

A implementação da ACO e a geração das figuras foram realizadas pelo autor. Os gráficos de convergência e superfícies tridimensionais foram produzidos com o `matplotlib`, baseando-se nos resultados numéricos da execução.

Código-fonte e artefatos deste estudo estão disponíveis em: GitHub — https://github.com/RafaelBahiense/aco-resource-optimization

3.2 CENÁRIOS DE TESTE E MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO

Os cenários de teste foram gerados diretamente a partir das Equações 7 e 8 de RABÊLO *et al.* (2011), que definem sinais sintéticos de tensão e corrente com coeficientes harmônicos conhecidos. A implementação usa tempo normalizado: uma janela de 1 ciclo corresponde a $t \in$ ¿ , com fundamental $\cos(2\pi t)$. Essa convenção torna a constante $\lambda = 0,4$ identificável na janela analisada e deve ser considerada ao comparar os resultados locais com os valores publicados no baseline.

A comparação considera três referências: (i) ACOR proposto, executado sobre os mesmos sinais sintéticos; (ii) PSO publicado por RABÊLO *et al.* (2011), usado como baseline bibliográfico; e (iii) TDF local, implementada por projeção seno/cosseno na janela normalizada. Como a TDF local não modela a componente CC com decaimento, λ não é estimado e a CC é aproximada pela média do sinal. Os valores de TDF publicados no artigo de 2011 são mantidos separadamente nas tabelas para evitar confundir baseline bibliográfico com a implementação local.

As métricas usadas são RMSE final da reconstrução, erro percentual por parâmetro $E_j(\%) = \frac{|\acute{\theta}_j - \theta_j|}{|\theta_j|} \times 100$ e erro médio dos parâmetros estimáveis. Nos cenários com ruído, a média percentual deve ser interpretada com cautela, pois coeficientes harmônicos de pequena amplitude podem dominar a métrica; nesses casos, RMSE e erro absoluto por componente são indicadores mais estáveis.

3.3 ESTIMAÇÃO HARMÔNICA COM ACO, PSO E TDF

O ACOR apresentou convergência estável ao longo das 3.000 iterações avaliadas, reconstruindo os sinais com erro reduzido e recuperando a componente CC (x_0) e a constante de decaimento (λ), parâmetros não estimados diretamente pela TDF local.

Tabela 2. Desempenho na forma de onda de tensão

Método	Erro médio (%)	RMSE	Observação
ACOR (proposto)	0,0002	$2,27 \times 10^{-8}$	recupera x_0 e λ
PSO (Rabêlo et al., 2011)	0,0290	—	valor publicado
TDF (Rabêlo et al., 2011)	7,0475	—	valor publicado
TDF local	7,02	—	tempo normalizado; λ não estimável

Fonte: Os Autores, 2025

Tabela 3. Desempenho na forma de onda de corrente

Método	Erro médio (%)	RMSE	Observação
ACOR (proposto)	0,0000	$1,21 \times 10^{-8}$	recupera x_0 e λ
PSO (Rabêlo et al., 2011)	0,0290	—	valor publicado
TDF (Rabêlo et al., 2011)	7,1101	—	valor publicado

TDF local	9,86	—	tempo normalizado; λ não estimável

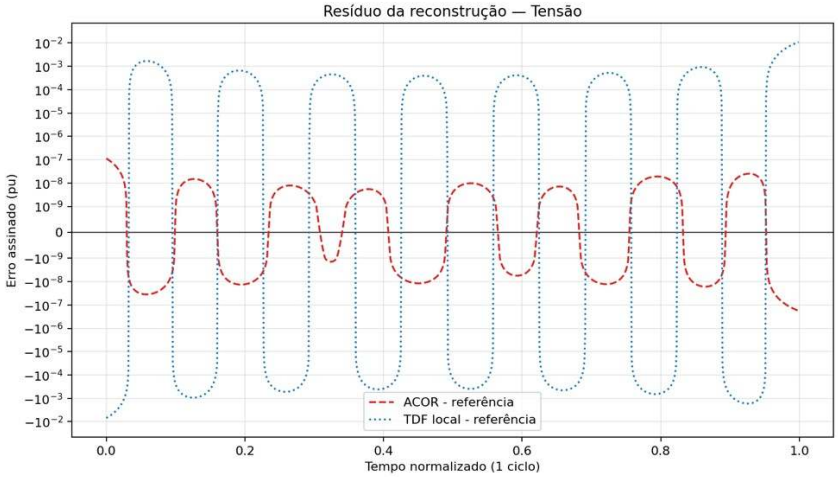
Fonte: Os Autores, 2025

Embora as curvas de referência, ACOR e TDF local tendam a se sobrepor visualmente na escala da forma de onda, a diferença entre os métodos é evidenciada pela análise do resíduo de reconstrução:

$$r(t)=\acute{x}(t)-x(t), \qquad (7)$$

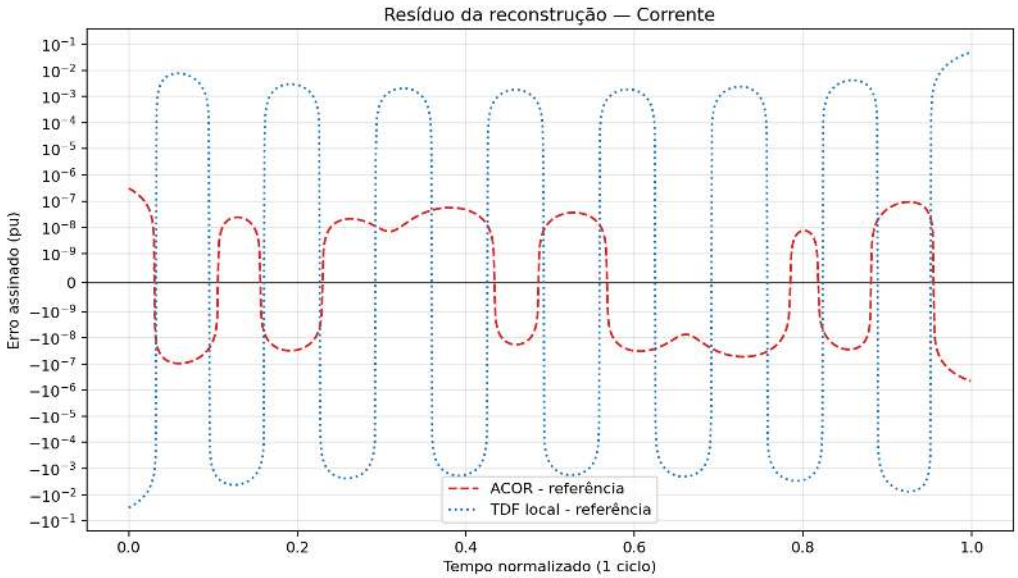
Em que $x(t)$ é o sinal de referência e $\acute{x}(t)$ é o sinal reconstruído pelo método avaliado. Essa transformação remove a forma de onda principal e evidencia apenas o erro remanescente. Nas Figuras 1 e 2, o eixo vertical usa escala simétrica logarítmica *(symlog*), preservando o sinal positivo ou negativo do erro e permitindo comparar valores de ordens de grandeza distintas.

Figura 1. Resíduo de reconstrução para a forma de onda de tensão



Fonte: Os Autores, 2026

Figura 2. Resíduo de reconstrução para a forma de onda de corrente



Fonte: Os Autores, 2026

3.4 DISCUSSÃO COMPARATIVA

Os resultados indicam que a formulação ACOR recupera com alta precisão os parâmetros dos sinais de tensão e corrente definidos por Rabêlo *et al.* (2011). O ganho em relação à TDF está associado à modelagem explícita da componente contínua com decaimento, representada por x_0 e λ . Como a TDF local não estima λ , a componente CC é aproximada pela média do sinal, o que introduz erro na reconstrução e nas amplitudes harmônicas.

A análise visual direta da forma de onda não é suficiente para evidenciar esse ganho, pois tanto o ACOR quanto a TDF local produzem curvas aparentemente próximas à referência quando observadas na escala total do sinal. Por esse motivo, inclui-se a análise residual $r(t)=\dot{x}(t)-x(t)$. Nessa representação, a curva do ACOR permanece próxima de zero, enquanto a TDF local apresenta desvios de maior magnitude ao longo da janela. Assim, o gráfico de resíduos explicita uma diferença que permanece pouco perceptível na sobreposição das formas de onda.

Na forma de onda de tensão, a TDF implementada localmente apresentou erro médio de 7,0247%, valor compatível com o erro de 7,0475% reportado por Rabêlo *et al.* (2011). Essa proximidade indica que a implementação local reproduz adequadamente o comportamento do baseline clássico para esse caso. A pequena diferença decorre da implementação local e da convenção de tempo normalizado adotada neste trabalho.

Deve-se distinguir, portanto, quatro referências na leitura dos resultados: o ACOR proposto, calculado pelo código deste trabalho; a TDF local, também calculada pelo código; a TDF publicada por Rabêlo *et al.* (2011); e o PSO publicado por Rabêlo *et al.* (2011). O PSO não foi reimplementado neste

estudo, sendo usado como referência bibliográfica. Já a TDF local foi mantida para verificar se o comportamento do método clássico é coerente com o baseline publicado.

Os resultados também devem ser interpretados dentro da limitação experimental do estudo: os sinais usados são formas de onda simuladas, com coeficientes conhecidos, e não medições reais de campo. Assim, a comparação demonstra a capacidade do ACOR de recuperar parâmetros em um benchmark controlado. Etapas futuras devem incluir sinais com ruído realista, medições reais, variação da frequência fundamental e análise de sensibilidade dos hiperparâmetros k , m , q e ξ .

4 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a Otimização por Colônia de Formigas em domínio contínuo (ACOR) como alternativa para a estimação harmônica em sinais de qualidade da energia elétrica. A formulação adotada representou cada solução candidata por um vetor de parâmetros composto pela componente contínua inicial, pela constante de decaimento exponencial e pelas amplitudes seno/cosseno dos harmônicos. Dessa forma, o problema foi tratado como uma minimização do erro de reconstrução entre o sinal de referência e o sinal estimado.

Nos cenários sintéticos de tensão e corrente derivados de Rabêlo *et al.* (2011), o ACOR apresentou convergência estável e recuperou com alta precisão os parâmetros do modelo, incluindo x_0 e λ . Esse resultado é relevante porque a TDF local, embora útil como método clássico de decomposição harmônica, não estima diretamente a constante de decaimento da componente contínua. A análise residual reforçou essa diferença: mesmo quando as formas de onda reconstruídas parecem visualmente sobrepostas à referência, os resíduos mostram que o erro do ACOR permanece substancialmente menor que o da TDF local.

A comparação com o PSO deve ser interpretada como bibliográfica, uma vez que o algoritmo de Rabêlo *et al.* (2011) não foi reimplementado neste trabalho. Ainda assim, os resultados obtidos indicam que a formulação ACOR é competitiva no benchmark analisado e constitui uma alternativa viável para problemas de estimação harmônica com espaço de busca contínuo. O uso de um arquivo de soluções e de kernels gaussianos mostrou-se adequado para substituir a matriz de feromônio discreta da ACO tradicional, preservando o princípio de intensificação em torno das melhores soluções e mantendo capacidade de exploração.

Como limitação, destaca-se que os experimentos foram realizados com sinais simulados de coeficientes conhecidos, e não com medições reais de rede elétrica. Portanto, os resultados validam a recuperação paramétrica em um cenário controlado, mas não encerram a avaliação da técnica em condições operacionais reais. Além disso, o desempenho observado depende da convenção de tempo

normalizado, dos limites adotados para o espaço de busca e dos hiperparâmetros do ACOR, especialmente o tamanho do arquivo k , o número de formigas por iteração m , a pressão de seleção q e o fator de espalhamento ξ .

Trabalhos futuros devem considerar sinais medidos em campo, ruído realista, variações da frequência fundamental, janelas de observação distintas e análise sistemática de sensibilidade dos hiperparâmetros. Também se recomenda investigar versões híbridas, como combinações ACOR–PSO, e estratégias adaptativas para ajustar automaticamente os limites de busca e os parâmetros de amostragem. Essas extensões podem aproximar a abordagem de aplicações práticas em monitoramento de qualidade da energia elétrica e em sistemas de apoio à decisão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Estácio (Universidade Estácio de Sá) pelo apoio institucional, incluindo acesso às instalações, recursos tecnológicos e suporte administrativo, que foram essenciais para a execução das atividades de pesquisa e para a finalização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

DORIGO, M. **Optimization, learning and natural algorithms**. 1992. Tese (Doutorado) — Politecnico di Milano, Milão, 1992.

DORIGO, M.; STÜTZLE, T. **Ant colony optimization**. Cambridge, MA: MIT Press, 2004.

DUGAN, R. C.; SANTOSO, S.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

HAYKIN, S. **Adaptive filter theory**. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. Particle swarm optimization. In: **Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks**. Perth: IEEE, 1995. v. 4, p. 1942–1948.

MADISETTI, V. K.; WILLIAMS, D. B. (ed.). **The digital signal processing handbook**. Boca Raton: CRC Press, 1998.

RABÊLO, R. de A. L.; BARBOSA, D.; SILVA, I. N. da; OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V. **Uma aplicação de PSO na qualidade da energia elétrica**. Artigo de conferência, 2011.

SOCHA, K.; DORIGO, M. Ant colony optimization for continuous domains. **European Journal of Operational Research**, v. 185, n. 3, p. 1155–1173, 2008.

STOICA, P.; MOSES, R. **Spectral analysis of signals**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2005.