

## Uma abordagem por enxame de partículas para identificação dos parâmetros de um modelo de histerese

### A particle swarm approach for Identify the parameters of a hysteresis model

#### RESUMO

**Eduardo dos Santos Junior**  
[edujun@alunos.utfpr.edu.br](mailto:edujun@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

**Filomena Barbosa Rodrigues Mendes**  
[filomena@utfpr.edu.br](mailto:filomena@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

**Jean Viane Leite**  
[jean.viane@ufsc.br](mailto:jean.viane@ufsc.br)  
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

**Nelson Jhoe Batistela**  
[jhoe.batistela@ufsc.br](mailto:jhoe.batistela@ufsc.br)  
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

Visto a necessidade de se desenvolver máquinas elétricas mais eficientes, diversos estudos são feitos para caracterizar materiais ferromagnéticos utilizados nos núcleos das mesmas, possibilitando um melhor entendimento sobre perdas de energia. O fenômeno de histerese, que são perdas de energia no núcleo das máquinas, afeta diretamente seu rendimento. Uma modelagem deste fenômeno foi desenvolvida por Jiles-Atherton e são utilizados cinco parâmetros para caracterizar o material, sendo eles,  $\alpha$ ,  $a$ ,  $m_s$ ,  $k$  e  $c$ . Neste trabalho é utilizado um algoritmo de otimização, baseado no comportamento coletivo de sistemas auto organizado e descentralizado, para identificar os parâmetros usados no modelo escalar inverso de Jiles-Atherton. Com a identificação dos parâmetros do modelo é possível descrever a relação entre o campo magnético e a indução magnética, construindo assim, a curva característica do fenômeno, a curva  $B-H$ . A validade da abordagem por enxame de partículas é visível na concordância da curva  $B-H$  calculada com a curva  $B-H$  medida.

**PALAVRAS-CHAVE:** Materiais magnéticos. Modelo de histerese de Jiles-Atherton. Inteligência de enxame. Otimização combinatória.

#### ABSTRACT

GIVEN THE NEED TO DEVELOP MORE EFFICIENT ELETRIC MACHINES, SEVERAL STUDIES ARE DONE TO REPRESENT FERROMAGNETIC MATERIALS USED IN THEIR CORES, ALLOWING A BETTER UNDERSTANDING OF ENERGY LOSSES. THE HYSTERESIS PHENOMENON, WHICH ARE ENERGY LOSSES AT THE CORE OF THE MACHINES, DIRECTLY AFFECTS ITS EFFICIENCY. A MODELING OF THIS PHENOMENON WAS DEVELOPED BY JILES-ATHERTON AND FIVE PARAMETERS ARE USED TO REPRESENT THE MATERIAL, CALLED  $\alpha$ ,  $a$ ,  $m_s$ ,  $k$  e  $c$ . IN THIS PAPER AN OPTIMIZATION ALGORITHM BASED ON THE COLLECTIVE BEHAVIOR OF SELF-OGANIZED AND DECENTRALIZED SYSTEMS IS USED TO IDENTIFY THE PARAMETERS USED IN JILES-ATHERTON MODIFIED SCALAR MODEL. WITH THE IDENTIFICATION OF MODEL PARAMETERS IT IS POSSIBLE TO DESCRIBE THE RELATIONSHIP BETWEEN THE MAGNETIC FIELD AND THE MAGNETIC INDUCTION, THUS SET UP THE CHARACTERISTIC CURVE OF THE PHENOMENON, THE  $B-H$  CURVE. THE VALIDITY OF THE PARTICLE SWARM APPROACH IS VISIBLE BECAUSE THE CALCULATED  $B-H$  CURVE IS IN ACCORDANCE WITH THE MEASURED  $B-H$  CURVE.

**KEYWORDS:** Magnetic materials. Jiles-Atherton hysteresis model. Swarm intelligence. Combinational optimization.

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Atualmente existem alguns modelos para representar a histerese magnética, dentre estes, o modelo escalar de Jiles-Atherton (J-A) tem se destacado, este modelo utiliza cinco parâmetros para representar o material em estudo sendo eles,  $\alpha$ ,  $a$ ,  $m_s$ ,  $k$  e  $c$ . Para efeitos de cálculo, no modelo de J-A a variável independente é o campo magnético e a variável dependente é a indução magnética, em contrapartida, no modelo inverso de J-A, a variável independente é a indução magnética e a variável dependente é o campo magnético. Com esta alteração para o modelo inverso, é possível calcular os parâmetros do modelo utilizando métodos de Elementos Finitos com formulação em potencial vetor magnético.

O material Aço-Silício de Grão Orientado foi ensaiado no teste de Epstein para obter o campo magnético experimental ( $H_{exp}$ ) e a indução magnética experimental ( $B_{exp}$ ).  $B_{exp}$  foi mantida senoidal com a frequência de 1 Hz.

## MODELO INVERSO DE JILES-ATHERTON

No passado, algumas hipóteses para explicar o fenômeno da histerese ferromagnética foram levantadas, estas ideias podem ser divididas em quatro categorias [1]. Das quatro abordagens sobre o fenômeno de histerese, a ideia que é utilizada por J-A é a dos pontos de grampeamento nos defeitos da estrutura cristalina do material ferromagnético. Os conceitos de paredes de domínio e pontos de grampeamento são apresentados em [1] e [2]. A modelagem matemática de J-A descreve a relação entre o campo magnético  $H$  e a indução magnética  $B$ , gerando o laço de histerese em forma de uma sigmoide, que é conhecido como curva  $B-H$ . Este modelo considera a energia média necessária tanto para movimentar as paredes de domínio magnético quanto para as paredes de domínio se libertarem dos pontos de grampeamento, que são causados por imperfeições no material.

No modelo inverso de J-A o campo magnético  $H$  é calculado a partir da indução magnética  $B$ . Para calcular o campo magnético são necessários cinco parâmetros para caracterizar o material ferromagnético, sendo eles  $\alpha$ ,  $a$ ,  $m_s$ ,  $k$  e  $c$ . O modelo que utiliza os parâmetros de J-A é apresentado em [1]. O parâmetro  $\alpha$  representa o acoplamento inter domínios e afeta diretamente o campo magnético efetivo. Por sua vez, os parâmetros  $a$  e  $m_s$  representam a forma de magnetização anisterética e a magnetização de saturação, respectivamente. As imperfeições do material são representadas pelo parâmetro  $k$ . Por último, o parâmetro  $c$  representa o coeficiente de proporcionalidade entre a diferença da magnetização anisterética e magnetização.

O conjunto dos cinco parâmetros dão característica ao material ferromagnético, e com estes valores, é possível calcular o campo magnético  $H$  e por sua vez obter a curva  $B-H$ . Por ser um modelo que considera a energia de grampeamento média, existem infinitos conjuntos de valores para representar as perdas nos materiais. Os valores dos parâmetros podem ser obtidos através de métodos computacionais como algoritmos genéticos, método dos mínimos quadrados não linear, método de evolução diferencial, entre outros. O método a ser empregado neste trabalho é um método computacional de Otimização, utilizando o algoritmo de Enxame de Partículas [3].

## OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

A Otimização é uma área científica que busca uma solução ótima para um problema modelado matematicamente, esta solução depende de vários critérios, dependendo do problema e do usuário. Esta área científica abrange tanto problemas com apenas uma solução quanto problemas com infinitas soluções.

A função a ser minimizada ou maximizada é chamada de função objetivo, esta, é a que dá origem à solução do problema. A função objetivo pode ter restrições ou não, em seu domínio, sendo este, com suas restrições, chamado de espaço de busca. Suas soluções são chamadas de solução global quando é detectado apenas uma solução ótima entre todas as soluções viáveis ou solução local quando é detectado uma solução ótima em uma vizinhança. A solução global e a solução local são representadas na Figura 1.

A inteligência de enxame é um ramo da inteligência artificial que estuda o comportamento coletivo de sistemas auto organizados e com estrutura social descentralizada, cada membro do enxame, mesmo que seja muito limitado em suas ações, tem influência no comportamento de todo o grupo. Esta área teve como inspiração a natureza, como por exemplo, um cardume de peixe, bando de pássaros, colônia de formigas e rebanho de animais. Todos estes possuem capacidade de se auto organizarem e para descrever o comportamento coletivo não basta simplesmente agregar o comportamento de cada indivíduo [3].

A otimização por enxame de partículas (OEP) segue cinco princípios básicos [3]. O primeiro é a capacidade de se realizarem cálculos de espaço e tempo, fazendo com que seja possível determinar o quão próximo o outro indivíduo está. O segundo é a qualidade, capacidade de responder a fatores de qualidade ambiental. O terceiro é a capacidade de produzir uma grande quantidade de respostas diferentes. O quarto é a capacidade de reter comportamentos robustos sob mudanças moderadas, tornando-o estável. E o quinto princípio é a capacidade de adaptar o comportamento de acordo com fatores externos.

Com base nos cinco princípios foram desenvolvidos alguns conceitos para desenvolver um algoritmo capaz de resolver um problema matematicamente. A otimização por enxame de partículas possui uma população base, que são as possíveis soluções do problema, esta população base é chamada de enxame e cada membro dessa população é chamado de indivíduo ou partícula.

Em uma linguagem matemática,  $A \subset \mathcal{R}^n$ , sendo  $A$  o espaço de busca e  $f: A \rightarrow Y \subseteq \mathcal{R}$ , sendo  $Y$  a função objetivo. O enxame é definido matematicamente como um conjunto  $S$ .  $S = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$ , sendo  $N$  o número de partículas e é definido como:  $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}\} \in A$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ .

Cada partícula se move iterativamente pelo espaço de busca, para que o indivíduo consiga se mover, para que seja possível esse movimento, existe a função velocidade, e é definida como:  $v_i = \{v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{in}\}$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ .

Assim como a partícula, a velocidade também é atualizada iterativamente, sendo  $t$  o número de iterações. Não necessariamente há uma melhora na posição

da partícula após uma iteração, por esse motivo, há um conjunto em que é guardada a melhor posição que a partícula já esteve, este conjunto é chamado de melhor posição, fazendo com que a convergência para a minimização seja mais rápida. O conjunto melhor posição é definido como:

$$P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_N\}, p_i = \{p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{in}\} \in A, i = 1, 2, 3, \dots, N.$$

E essa melhor posição é definida como:  $p_i = \arg \min f_i(t)$ . Outra variável da equação é a posição mais próxima do mínimo que todas as partículas já estiveram, esta posição é chamada de melhor posição global, e é definida como:  $p_g = \arg \min f_i(p_i(t))$  sendo  $t$  o contador de iterações.  $R_1$  e  $R_2$  são variáveis randômicas que podem assumir valores entre 0 e 1. Já as constantes  $c_1$  e  $c_2$ , que são chamadas de coeficiente cognitivo e social, respectivamente, representam a aceleração da partícula e oferecem um melhor controle do algoritmo, podendo evidenciar o comportamento do indivíduo ou do líder do bando.

Algumas restrições precisam ser feitas para que após ser atualizada a nova posição não se extrapolem os valores do espaço de busca, sendo assim, a nova posição assumirá o valor do limite inferior ou superior se caso for menor ou maior, respectivamente. Outra forma de prevenção é restringir a velocidade, estes limites são determinados pelos limites do espaço de busca, sendo  $a_i$  o limite inferior e  $b_i$  o limite superior. A constante  $K$  representa a diversidade do enxame e quanto maior o valor de  $K$  menor é a diversidade. Uma comparação entre diferentes valores de  $K$  é apresentado em [3].

Outro conceito é o peso de inércia  $w$ , este fator diminui iterativamente a influência da velocidade nos cálculos, variando de um limite superior a um limite inferior,  $w_{up}$  e  $w_{low}$  respectivamente. Sendo  $T_{max}$  o número máximo de iterações.

$$v_{\max} = \frac{\min\{b_i - a_i\}}{K}, w(t) = w_{up} - (w_{up} - w_{low}) \frac{t}{T_{\max}}.$$

Por fim, as equações para representar tanto a velocidade quanto a posição são:

$$v_{ij}(t+1) = w(t)v_{ij}(t) + c_1R_1(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2R_2(p_{gj}(t) - x_{ij}(t)),$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), i = 1, 2, 3, \dots, N, j = 1, 2, 3, \dots, n.$$

## RESULTADOS, DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

A função a ser minimizada é o módulo da diferença entre o campo magnético calculado  $H_{calc}$  e o campo magnético experimental  $H_{ex}$ .

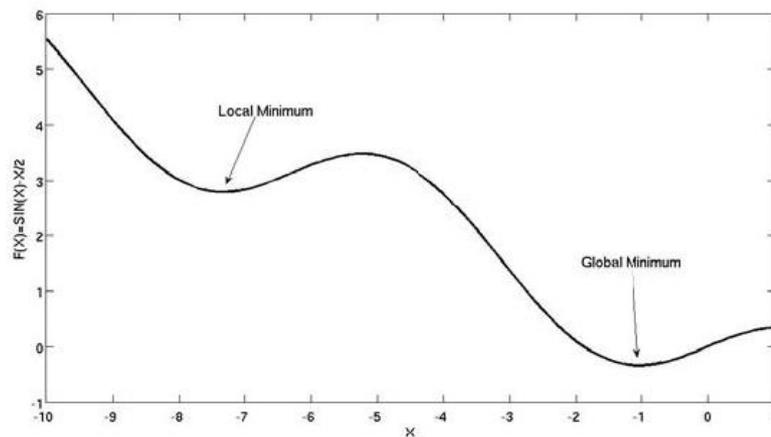
$$MédiaErro = |H_{calc} - H_{ex}|$$

A população foi inicializada com mil indivíduos. A posição inicial de cada partícula ou parâmetro foi determinada randomicamente e está apresentada com o índice zero ( $m_{so}, \alpha_0, a_0, k_0, c_0$ ) nas Figuras 2 e 3. Os parâmetros identificados ( $m_s, \alpha, a, k, c$ ), o erro quadrático médio da curva calculada e o tempo de processamento também podem ser observados nas Figuras 2 e 3. Na Figura 2 as curvas  $B-H$  calculada e medida estão sobrepostas comprovando a validade do método de

identificação dos parâmetros apresentado. Por ser um método que utiliza elementos estocásticos na inicialização, a minimização pode ser mais efetiva se as posições iniciais das partículas estiverem mais próximas do mínimo local, com isso, nota-se a diferença no percentual do erro quadrático médio entre as duas curvas.

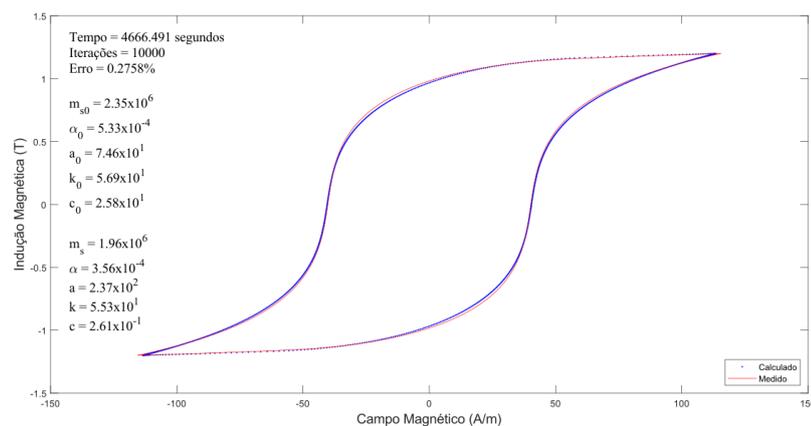
Para a iniciação científica o acadêmico estudou o modelo de J-A e o método de otimização nuvem de partículas que saem do escopo de um curso de graduação. Como o modelo de J-A foi desenvolvido para descrever curvas sigmoides suaves o resultado apresentado na Figura 2 apresenta melhor concordância quando comparado com o resultado apresentado na Figura 3 (não sigmoide). Nas bibliografias consultadas os métodos não forneceram melhor concordância para casos não sigmoides. Devido à falta de equipamentos de teste, as curvas experimentais utilizadas neste trabalho são as mesmas apresentadas em [1] mas em [1] não é aplicada a abordagem nuvem de partículas, foco do presente artigo.

Figura 1 – Soluções local e global da função  $f(x) = \text{sen}(x) - x/2$ ; com  $x$  variando de -10 a 1.



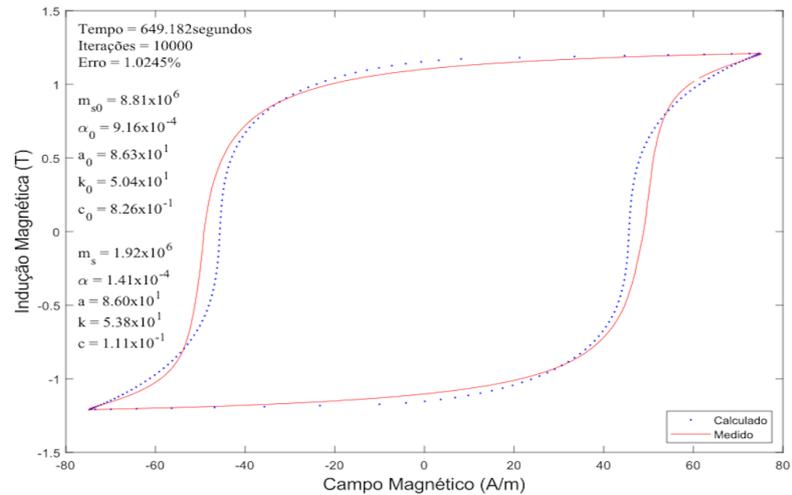
Fonte: Konstantinos E. Parsopoulos & Michael N. Vrahatis.

Figura 2 – Curva  $B-H$  utilizando 1001 pontos experimentais.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 3 – Curva  $B-H$  utilizando 200 pontos experimentais.



Fonte: Autoria própria (2019).

## REFERÊNCIAS

- [1] MENDES, Filomena B. R. **Uma contribuição para identificação dos parâmetros do modelo escalar de histerese de Jiles-Atherton**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- [2] JILES, D.C.; ATHERTON, D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 61, 1986.
- [3] PARSOPOULOS, K. E.; VRAHATIS, M. N. **Particle swarm optimization and intelligence: advances and applications**. New York: Hershey.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pois sem esse apoio não seria possível a realização deste trabalho de IC-PIVICT. À professora Dr<sup>a</sup>. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes, pela orientação, suporte e compreensão para a realização deste trabalho.