

# Aplicação de Algoritmos Genéticos no projeto de transformadores

*Leonel Augusto Calliari Poltosi*<sup>1</sup>

*Ney Lemke*<sup>2</sup>

## Resumo

O presente trabalho apresenta, através da utilização de Algoritmos Genéticos (AGs), um método para realizar projeto de transformadores. Ao contrário do método convencional de projetos, as etapas de otimização das características de viabilidade física e financeira são efetuadas simultaneamente. Para realizar o projeto do transformador foi empregado um modelo analítico baseado nas relações estabelecidas pela equação geral das máquinas elétricas. A otimização é obtida pelo estabelecimento de relações de equilíbrio no custo do material das partes constituídas de cobre e ferro. O aumento de temperatura decorrente da perda no núcleo de ferro e nos enrolamentos, bem como o rendimento energético e a possibilidade de execução são tratados como restrições. O emprego do Algoritmo Genético obteve resultados melhores em termos de custo e desempenho que os métodos convencionais, obtendo-se redução de custo de até 10% quando comparado à sistemática de projeto comumente empregada.

**Palavras-chave:** Algoritmo Genético. Transformadores. Otimização.

## Abstract

*A method to design electric transformers using Genetic Algorithms (GA) is described in this work. Opposite to the traditional procedure, the physical and economical analyses are both done at the same time. In the transformer design, the analytical sample we have used is based on the relation established by the general equation of electric machines. The optimization is achieved when the material cost of the pieces made of copper and iron is balanced. The increases of temperature due to the iron core and winding losses, the energy efficiency and the performing possibility are deal with restriction. We verified that the Genetic Algorithms (GA) method reaches 10% lower prices and better performance than the conventional design method.*

**Keywords:** Genetic Algorithms. Transformers. Optimization;

<sup>1</sup> Mestre em Ciência da Computação, Engenheiro da Travelbit Projetos e Soluções. E-mail: <lpoltosi@gmail.com>

<sup>2</sup> Doutor em Física, professor da Universidade Estadual Paulista, São Paulo, SP. E-mail: <ney.lemke@pq.cnpq.br>

Recebido em 29/05/09, aceito em 01/09/09.

## 1 Introdução

Problemas de dimensionamento na área de engenharia são caracterizados pelo compromisso em relação à viabilidade física e à viabilidade econômica.

Do estudo de viabilidade física resultam conjuntos de soluções de implementação plausíveis. Este estudo detalha cada elemento do projeto levando em consideração a conformidade com suas propriedades físicas, com a disponibilidade comercial e com as técnicas construtivas disponíveis que visam atender aos requisitos legais (legislação e normas técnicas) e aos especificados pelos clientes (aplicação).

A viabilidade econômica, por sua vez, contempla os fatores ligados ao impacto dos custos do próprio projeto, bem como os custos relativos à implementação do objeto em referência, como mão de obra, matéria-prima, depreciação de máquinas e associados à aquisição de novas tecnologias (BACK, 1983).

Nos problemas reais de dimensionamento, os fatores chamados de variáveis de projeto e as especificações são inter-relacionados através de expressões matemáticas. Entende-se por especificações os valores definidos pelo usuário (cliente) e pela legislação ou normas industriais pertinentes (como ABNT, IEC, DIN entre outras) no tocante ao desempenho do objeto. Como exemplos, citam-se potência de um transformador, tensão de isolamento, temperaturas máximas admissíveis, etc. (BAXTER, 1998). As variáveis de projeto podem assumir uma série de valores numéricos contínuos ou discretos dentro de uma determinada faixa, também chamado *range*, onde podem ser implementadas. Um exemplo é a dimensão do diâmetro externo do anel de ferrite de um alto-falante que pode assumir qualquer valor dentro da faixa contínua entre 32 a 220 milímetros. Por outro lado, a seção do fio de cobre deste mesmo transformador pode assumir apenas um dentre os 40 valores comerciais determinados pela escala AWG – *American Wire Gauge*, ou seja, apenas um valor discreto distribuído numa escala logarítmica.

Os problemas de dimensionamento em Engenharia são problemas de otimização multi-

dimensional em que o custo ou desempenho de um determinado componente deve ser otimizado em função das variáveis de projeto. Uma técnica muito utilizada para resolver problemas de otimização são os algoritmos genéticos.

## 2 Algoritmo Genético

Um Algoritmo Genético (AG) é um método heurístico inspirado na evolução genética. Ao contrário do *Simulated Annealing* e *Tabu Search*, o Algoritmo Genético utiliza uma coleção (ou população) de soluções, a qual, submetida à reprodução seletiva e estratégias de recombinação, permite encontrar soluções melhores. Operadores genéticos como *crossover* e mutação são utilizados para construir novas soluções utilizando soluções já pesquisadas (HARTMANN, 2002).

Os candidatos à solução são relacionados pelo valor de aptidão (*fitness*), isto é, o valor que possuem na função objetivo – custo, por exemplo (GOLDBERG, 1989).

A seguir, a descrição do Algoritmo Genético:

- formar a população com pontos aleatórios no espaço de busca ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ),
- calcular o *fitness* de cada ponto da população  $fit(x_i)$ , enquanto (critério de parada não atendido):
  - ordenar a população pelo valor do *fitness*,
  - selecionar pontos dando preferência aos com bom *fitness*,
  - criar outros pontos utilizando operador *crossover* e mutação,
  - calcular o *fitness* de cada ponto novo  $fit(x_i)$ ,
  - substituir na população original os novos pontos gerados.

Até o critério de parada ser atendido, cada iteração feita é denominada de “geração”. Devido à sua característica de efetuar busca simultânea em várias regiões do espaço de busca, os AGs têm sido empregados em problemas complexos de otimização em que, muitas vezes, os métodos de Hill Climbing falham (LACERDA; CARVALHO, 1999).

Uma série de trabalhos comparando o desempenho dos algoritmos apresentados tem sido publicada, entre os quais: Alotto *et al.* (1996), Azar, Reynolds, Narayanan (1999), Behler, Lunatschek (1998), Carneiro, Leite, Carvalho (1998), Diaz, Suárez (2001), Knowles, Watson, Corne (2001), Rayward-Smith *et al.* (1996). Em relação ao Algoritmo Genético, as investigações concluem quanto ao bom desempenho não apenas nos problemas clássicos da área de Pesquisa Operacional, mas também nos do mundo real.

A escolha do AG como método de otimização é baseada nas seguintes vantagens (BARRETO, 2001; FORREST, 1996; MITCHELL, 1998):

- trabalham tanto com variáveis contínuas como discretas ou uma combinação delas;
- realizam busca simultânea em várias regiões do espaço de busca;
- utilizam informações de custos ou recompensas e não suas derivadas;
- não exigem por parte do usuário um conhecimento matemático aprofundado;
- podem trabalhar com um grande número de variáveis;
- adaptam-se bem ao processamento paralelo;
- trabalham com variáveis codificadas;
- fornecem uma lista de boas soluções (mínimos ou máximos locais);
- trabalham com dados gerados experimentalmente e são tolerantes a ruídos e dados incompletos;
- são modulares e portáteis, os mecanismos de evolução podem ser transferidos de uma aplicação a outra;
- são flexíveis para trabalhar com restrições arbitrárias e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes;
- podem ser implementados em conjunto com outras técnicas, formando sistemas híbridos.

Neste trabalho, a ênfase da aplicação de Algoritmos Genéticos é dada aos problemas reais de engenharia, onde restrições empíricas utilizadas nos métodos convencionais de projeto serão eliminadas, visando estender o espaço de busca.

### 3 Projeto do transformador monofásico

O transformador monofásico participa de um mercado competitivo de produção em larga escala, embora o apelo por inovações tecnológicas seja pequeno. O custo, refletido em termos de preço ao consumidor final, é o maior fator de sucesso comercial (BAXTER, 1998). Desta forma, a otimização é uma questão básica. Apesar de utilizar um modelo clássico para dimensionamento, não existem, para este problema, referências a ferramentas de otimização que envolvam a viabilidade física e econômica simultaneamente.

Ao problema de dimensionamento do transformador monofásico é incorporada a análise financeira e, simultaneamente, a análise física. Busca-se verificar a aplicabilidade do AG e se este oferece maior flexibilidade em relação à variação de custos, quando comparada com a metodologia tradicional.

Um enrolamento de um condutor formado por  $n_1$  espiras induz, quando submetido a uma tensão elétrica alternada  $V_1$ , um campo de origem eletromagnético. Se este mesmo campo é compartilhado por um segundo enrolamento formado por  $n_2$  espiras, é induzido neste último uma tensão  $V_2$ .

Esta relação é formalizada pela equação geral das máquinas elétricas (Kosow, 1997), onde:

$$n_{1,2} = V_{1,2} \cdot 10^8 / (4,44 \cdot S_m \cdot \beta \cdot f) \quad (1)$$

-  $n_{1,2}$  é o número de espiras do enrolamento;

-  $V_{1,2}$  é a tensão eficaz aplicada na espira em Volts;

-  $S_m$  é seção magnética, ou área da seção do enrolamento realmente percorrida pelo fluxo magnético, em  $\text{cm}^2$ ;

-  $\beta$  é a densidade de fluxo na seção magnética em Gauss;

-  $S_m \cdot \beta$  é o fluxo magnético em Maxwell;

-  $f$  é a frequência da tensão em corrente alternada em Hertz.

O princípio de indução eletromagnética mútua entre dois enrolamentos é a base para

a definição do transformador de potência. Nele, podemos conceber dois circuitos eletricamente isolados, mas magneticamente acoplados. Para que a ligação magnética entre os dois circuitos mencionados – agora referenciados como primário (índice<sub>1</sub> em suas variáveis) e secundário (índice<sub>2</sub>) – seja a mais perfeita possível, é necessário que estes estejam dispostos sobre um núcleo magnético que possibilite a presença de elevados fluxos magnéticos e um melhor acoplamento.

Esta composição de números de espiras em condutores elétricos, materiais com características magnéticas e dimensões determinadas, possibilita que sejam obtidos o acoplamento e a transferência de potência entre os dois circuitos (MCLYMAN, 1994). Desta forma, não apenas uma tensão deverá ser aplicada no enrolamento primário, para que outra se apresente no secundário, mas uma corrente elétrica também circulará no enrolamento primário para que outra também possa circular no enrolamento secundário. O produto da tensão e corrente do primário é definido como potência nominal do transformador, na unidade Volt.Ampères (ou VA).

Para o projeto de um transformador, devem-se definir as dimensões de um núcleo de material com boa permeabilidade magnética e, sobre ele, detalhar a montagem dos enrolamentos do circuito primário e secundário na forma de condutores elétricos. Estes necessitam de uma seção condutora ( $S_1$  e  $S_2$ ) que permite a passagem da corrente elétrica definida pela potência nominal e pelo número de espiras estabelecidas pela tensão aplicada.

Com estas informações preliminares, já é possível entender que o problema do dimensionamento de transformadores é encontrar o equilíbrio entre a parte de propósito inteiramente elétrico (enrolamentos de cobre no primário e secundário) e a parte de natureza magnética (núcleo).

Em parte, este equilíbrio pode ser entendido na equação 1: um transformador com um núcleo de elevadas dimensões, elevado  $S_m$ , necessitará de um número de espiras  $n_1$  e  $n_2$  pequeno. A relação inversa é da mesma forma verdadeira (FLANAGAN, 1992).

O núcleo tem a função de prover uma alta permeabilidade magnética, isto é, permitir que a densidade de fluxo magnético  $\beta$  alcance valores elevados na equação 1. Na construção do núcleo, são empregadas chapas metálicas laminadas. Muitas são as opções de montagem do núcleo, a mais comum está representada na figura 1.

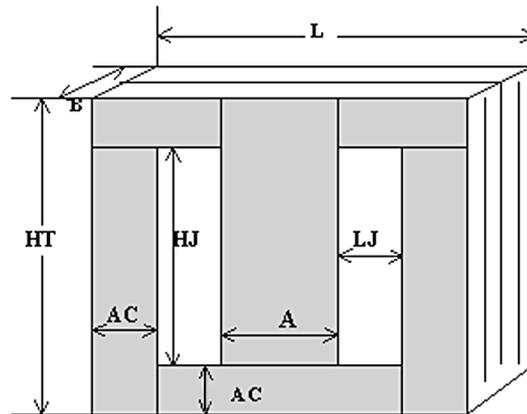


Figura 1 – Disposição de tiras de Ferro-Silício para montagem de um transformador monofásico

O material mais empregado para construção de núcleo de transformadores é uma liga metálica denominada “Ferro-Silício”. Apesar de permitir a passagem de elevadas densidades de fluxo magnético  $\beta$ , ele apresenta duas características indesejadas: as perdas por corrente parasitas e as perdas por histerese magnética. Construtivamente procura-se limitar o percurso destas correntes, montando o núcleo com lâminas metálicas, isoladas entre si por uma camada de óxido natural ou verniz de silicone. Atualmente dois tipos de Ferro-Silício são mais largamente disponibilizados e empregados. Trata-se do tipo GO – grão orientado e do tipo GNO – grão não orientado.

A diferença fundamental entre os dois tipos é a aplicação de um campo magnético no decorrer do processo de laminação da chapa metálica do tipo GO. Este campo orienta a formação da estrutura molecular do material, fazendo com que no GO seja possível atingir níveis de densidade de fluxo magnéticos superiores e com perdas menores que o GNO (MARTIGNONI, 1983).

Além desses fatores, o projeto de transformadores monofásicos também deve levar

em conta outras especificações e restrições que, por falta de espaço, não poderão ser tratadas aqui, ainda que tenham sido consideradas para o desenvolvimento deste trabalho. As características consideradas são:

- possibilidade de execução (Posex);
- temperatura do núcleo (classe de isolamento);
- potência do transformador (Pot);
- rendimento (□%).

No decorrer do projeto de um transformador monofásico, de acordo com a literatura pesquisada, não é feita nenhuma consideração sobre o custo comprometido com a implementação, principalmente no tocante aos materiais empregados. A diferença de custo relativo entre o peso do núcleo de Ferro-Silício e o fio de cobre é grande, normalmente numa razão de quatro para dez, respectivamente.

O custo é o critério final para escolha da melhor configuração, selecionada a partir do conjunto de soluções previamente encontradas.

Para otimização do custo de um transformador, é irrelevante a parcela devida aos materiais auxiliares de montagem, como bornes, fixadores e vernizes de impregnação, pois estes são elementos comuns a todas as soluções encontradas. O custo é simplificado ao material destinado à construção do núcleo (ferro-silício) e aos enrolamentos do primário e secundário (cobre). Desta forma:

$$\text{\$trafo} = \text{Pfe} \cdot \text{\$fe} + \text{Pcu} \cdot \text{\$cu} \quad (2)$$

onde:

- $\text{\$trafo}$  é o custo transformador a ser otimizado, em valor monetário (\$);
- $\text{Pfe}$  é o peso total do núcleo do transformador em Kg;
- $\text{\$fe}$  é o custo do ferro-silício (\$/Kg), dependendo se tipo do ferro (GO ou GNO);

-  $\text{Pcu}$  é o peso total do enrolamento primário e secundário;

-  $\text{\$cu}$  é o custo do cobre (\$/Kg) dependente da classe de temperatura.

### 4 Implementação do algoritmo

O algoritmo foi implementado na seguinte forma:

```

Início;
/****** entrada de dados
fPot, F, Vn, Vc, classe_isolacao, Posex, Q%; /*** especificações transformador
fN, N, Pm, Pcj; /*** parâmetros do AG
fPfe, $cu; /*** custo matéria prima

/****** define estrutura do cromossomo
Xi = {A[i], B[i], L[i], H[i], tipo de ferro[i], S_f[i], S_s[i]};

/****** define população inicial de forma aleatória utilizando operador de mutação
De i=1 até n
A[i] = qualquer valor na faixa de dimensão A;
B[i] = qualquer valor na faixa de dimensão B;
L[i] = qualquer valor na faixa de dimensão L;
H[i] = qualquer valor na faixa de dimensão H;
Tipo de ferro[i] = GO ou GNO;
S_f[i] = qualquer bilola de fio de cobre de label AWG;
S_s[i] = qualquer bilola de fio de cobre de label AWG;
Próximo i;

/****** definir o fitness (custo do transformado) para toda a população
Fit(x) = $trafo(x);
Se houve restrição de especificação Fit(x) = $trafo(x) + multa; /*** aplicar penalidade pelo não
atendimento de restrições de projeto

t= 0; /*** zera o contador de gerações

/****** rotina de desenvolvimento do AG
Fazer enquanto (t < T); /*** T = número máximo de gerações
Mostra_genoma; /*** exibe população na tela
Faz seleção (N); /*** amostragem universal estocástica para população
intermediária
Faz crossover (Pc); /*** aplica interseção em elementos na probabilidade Pc
Faz mutação (Pm); /*** altera variável elemento escolhido na probabilidade Pm
Fit(x, N); /*** calcula fitness de nova população intermediária e aplica multa
População < População Intermediária; /*** faz substituição geracional
Ordene a população pelo fitness;
t = t + 1;

/****** exibe resultados
Mostra população resultante
Mostra melhor resultado obtido.

Fim.
    
```

### 5 Resultados obtidos

Para sintonia dos parâmetros do Algoritmo Genético e comparação de resultados das técnicas experimentadas, é definido um conjunto de especificações (dados de entrada) de transformadores comumente empregados. Estas especificações são listadas na tabela 1.

A investigação visa melhor compreensão da forma da superfície de busca da função objetivo. Este entendimento propiciará melhor avaliação da dinâmica do AG auxiliando no ajuste de seus parâmetros e na compreensão dos resultados. Para isto são estimados, prelimi-

Tabela 1 – Instâncias para otimização de transformadores

Tipos	Potência (VA)	Frequência (Hz)	Tensão Primário (Volts)	Tensão Secundário (Volts)	Classe Isolação (°C)	Rendimento (%)	Posex
TR1	1000	60	220	110	105	85	2,5
TR2	5000	60	220	110	130	90	3
TR3	10000	50	220	110	155	95	3,5

narmente, valores dos parâmetros do AG para aplicação no conjunto de especificações arbitradas da tabela 2. Desta forma, será possível identificar a existência de mínimos locais e determinar se a função de aptidão é unimodal ou multimodal. O melhores resultados obtidos aplicando o método AG para a instância de problema TR1, limitados na formação de 5000 gerações, são exibidos abaixo.

Os resultados obtidos pelo GA foram comparados ao método convencional de projeto na tabela 3.

Tabela 2 – Soluções encontradas para TR1(\*)

A (cm)	B (cm)	LJ (cm)	HJ (cm)	Fe	S1 (AWG)	S2 (AWG)	Custo (R\$)
4	8	3	14	GNO	15	12	51,70
5	7	2	12	GNO	15	12	50,53
3	5	3	14	GO	15	11	55,07
3	5	5	25	GNO	15	12	56,36
3	5	5	10	GO	14	10	59,59
4	6	3	15	GO	15	11	53,89
4	8	4	22	GNO	17	14	53,73
4	8	3	17	GNO	16	13	50,27
4	8	4	20	GNO	17	13	53,26
4	8	3	11	GNO	15	11	51,18

(\*) N = 30; NI = 10; p<sub>c</sub> = 90%; p<sub>m</sub> = 20%; crossover extrapolação; substituição geracional com elitismo

Para executar a comparação com o método tradicional de projeto, tomou-se o melhor resultado obtido em dez aplicações do AG – por exemplo, a tabela 2 – e comparou-se com 10 soluções encontradas por um projetista. Para os tipos TR1, TR2 e TR3, o AG forneceu resultados com custo, aproximadamente, 10% inferior ao método convencional.

## 6 Conclusões

Nos resultados representados na tabela 3 para as soluções encontradas nas três instâncias onde o método de otimização por AG e o método convencional foram comparados, conclui-se que uma nova orientação de relação de variáveis de projeto pode ser agregada ao conhecimento empírico.

A técnica convencional assume que as dimensões A (largura da coluna central) e B (empilhamento) do transformador sejam iguais. Esta relação estabelece que o perímetro do fio de cobre em torno do núcleo seja minimizado para uma determinada seção magnética (A x B) empregada. Com um menor perímetro e determinadas seções S<sub>1</sub> e S<sub>2</sub> dos enrolamentos do primário e secundário, o peso do material é o mínimo. Consequentemente, seu custo é o mínimo.

Já os resultados obtidos pelo AG, com custos sensivelmente menores que os gerados pelo método convencional, indicam, em todas as avaliações, um valor da dimensão B superior a A. Esta relação buscou minimizar o volume do núcleo, consequentemente diminuiu seu peso e seu custo. Como a procura do valor mínimo de custo se faz de forma global, o mecanismo de busca encontrou a situação de equilíbrio que favorece a relação de A e B ótimas para cada caso.

Quando comparado com o método convencional de projeto, o AG mostrou-se mais adaptado que o primeiro quanto a oscilações de custos de insumos pois, sem as relações

Tabela 3 – Comparação do método tradicional e AG(\*)

Tipo	Método	A(cm)	B(cm)	LJ(cm)	HJ(cm)	Fe	S1(AWG)	S2(AWG)	R\$
TR1	Tradicional	5	5	3	15	GNO	15	11	56,21
	AG(*)	4	8	3	17	GNO	16	13	50,27
TR2	Tradicional	8	8	4	24	GNO	8	5	196,45
	AG(*)	7	12	4	22	GNO	9	5	179,48
TR3	Tradicional	10	10	5	30	GNO	4	2	382,15
	AG(*)	9	13	6	22	GNO	5	1	352,43

(\*) N = 30; NI = 10; p<sub>c</sub> = 90%; p<sub>m</sub> = 20%; 5000 gerações; crossover extrapolação; substituição geracional com elitismo

empíricas, o AG tira proveito da liberdade de estabelecer novos pontos de equilíbrio no peso do cobre e do ferro.

Pelo fato do AG possibilitar a exploração de espaços muito próximos aos limites determinados pelas restrições, os resultados obtidos observados são consideravelmente melhores que os do método convencional.

## 7 Referências

- ALOTTO, P.; KUNTSEVITCH, A.V.; MAGELE, Ch.; MOLINARI, G.; PAUL, C.; PREIS, K.; REPETTO, M.; RICHTER, K.R. Multi-objective optimization in magnetostatic: a proposal for benchmark problems. **IEEE Transaction on Magnetics**, Berlin, v. 32, n. 3, p. 1238-1241, may 1996.
- AZAR, Shapour; REYNOLDS, Brian J.; NARAYANAN, Sanjay. Comparison of two multiobjective optimization techniques with and within Genetic Algorithms. *In: ASME DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCES*, 1999, Las Vegas. **Proceedings**, 1999. Las Vegas: setembro de 1999. Disponível em: <<http://citeseer.ist.psu.edu>>.
- BACK, Nelson. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1983.
- BARRETO, Jorge M. **Inteligência artificial, no limiar do século XXI**. 3. ed. Florianópolis: UFSC, 2001.
- BAXTER, Mike. **Projeto de produto – guia prático para desenvolvimento de novos produtos**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1998.
- BEHLER, Gottfried K., LUNATSCHEK, Roger. Loudspeaker design software including optimization a Algorithms for acoustical and electrical networks. *In: AES AUDIO ENGINEERING SOCIETY CONVENTION, Preprint*, 105, São Francisco, 1998. São Francisco: AES, 1998. Disponível em: <<http://www.aes.org/e-lib/>>
- BENTLEY, Peter J.; WAKEFIELD, Jonathan P. An analysis of multiobjective optimization within genetic algorithms. **Technical Report ENGPJB96**, Huddersfield, University of Huddersfield, v. 23, 1996.
- CARNEIRO, Adriano F. M.; LEITE, Patrícia T.; CARVALHO, André C. P. L. F., A genetic algorithm approach to optimize the operation planning of hydrothermal system Scheduling. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES NEURAS 5*, 1998, Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte, IEEE, 1998.
- DIAZ, Renio; SUÁREZ, Alexandro R. A study of the capacity of the stochastic hill climbing to solve multi-objective problems. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADAPTATIVE SYSTEM*, 3., 2001, Habana. **Proceedings...** Habana, Institute of Cybernetics, Mathematics and Physic, 2001. p. 37-40. Disponível em: <<http://citeseer.ist.psu.edu/old/450372.html>>.
- ESQUIVEL, Suzana C.; LEIVA, Héctor A.; GALLARD, Raúl H. Multiplicity in genetic algorithms to face multicriteria optimization. *In: CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, 1999, **Proceedings...** Washington, DC: IEEE Service Center, Jul. 1999. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org>>.
- FORREST, Stephanie. Genetic algorithm. **ACM Computing Survey**, v. 28, n. 1, p. 77-80, março de 1996.
- FLANAGAN, William M. **Handbook of transformer, design & applications**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1992.
- HARTMANN, A.K.; Rieger, H.; **Optimization algorithms in physics**. Berlin: Wiley-VCH, 2002.
- KNOWLES, Joshua D.; WATSON, Richard A.; CORNE, David W. Reducing local optima in single-objective problems by multi-objectivization. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY MULTI-CRITERION OPTIMIZATION*, 1, 2001, Zurich. **Proceedings...** Berlin: Springer-Verlag, 2001. Disponível em: <<http://citeseer.ist.psu.edu>>.
- KOSOW, Irving L. **Máquinas elétricas e transformadores**. Porto Alegre: Editora Globo, 1997.

LARCEDA, E.G.M.; CARVALHO, A. C. P.L. F. de. Introdução aos algoritmos genéticos. *In*: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, 19, 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Computação, 1999.

MARTIGNONI, Alfonso. **Transformadores**, 6. ed. Porto Alegre: Globo 1983.

McLYMAN, Colonel W. M. **Transformer and inductor design handbook** New York: Marcel Dekker Inc, 1994.

MITCHELL, Melanie. **An introduction to genetic algorithms**. Cambridge: MIT PRESS, 1998.

RAYWARD-SMITH, V.J.; OSMAN, I.H.; REEVEK, C.R.; SMITH, G.R. **Modern heuristic search methods**. Londres: Wiley, 1996.