

## ABORDAGEM DE ALGORITMO COMPETITIVO IMPERIALISTA APLICADA À PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

LEONARDO DALLEGRAVE AFONSO<sup>1</sup>, DIEGO LUIS DE ANDRADE BERNERT<sup>2</sup> E LEANDRO DOS SANTOS COELHO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Graduação em Engenharia Mecatrônica (Controle e Automação)*

<sup>2</sup> *Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, PPGEPS*

*Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Rua Imaculada Conceição 1155, 80215-901 Curitiba, PR, Brasil*

*E-mails: l3onardo4fonso@hotmail.com, dbernert@gmail.com,  
leandro.coelho@pupr.br*

**Abstract**— The paper presents an imperialist competitive algorithm (ICA) to solve optimization problems in reliability engineering field. ICA is a novel global search metaheuristic that uses imperialism and imperialistic competition process as a source of inspiration. ICA approach is validated in a mixed-integer programming problem in reliability-redundancy allocation for an overspeed protection system for a gas turbine. Simulation results obtained by the ICA are compared with the results presented in recent literature. In this context, the results obtained by the ICA approach outperformed the previously best-known solutions available for the benchmark of an overspeed protection system for a gas turbine.

**Keywords**— Optimization, Imperialist competitive algorithm, Reliability Engineering.

**Resumo**— Este artigo apresenta uma algoritmo competitivo imperialista (*imperialist competitive algorithm*, ICA) para resolver problemas de otimização na área de engenharia de confiabilidade. O ICA é uma nova metaheurística de busca global que utiliza o imperialismo e o processo de competição imperialista como uma fonte de inspiração. A abordagem ICA é validada em um problema de programação inteira-mista de alocação de confiabilidade-redundância para um sistema de proteção a sobre-velocidade de uma turbina a gás. Os resultados de simulação obtidos pelo ICA são comparados com os resultados apresentados na literatura recente. Neste contexto, os resultados obtidos pela abordagem ICA superam as melhores soluções avaliadas na literatura para o problema teste (*benchmark*) proteção a sobre-velocidade de uma turbina a gás.

**Palavras-chave**— Otimização, Algoritmo competitivo imperialista, Engenharia de confiabilidade.

### 1 Introdução

As engenharias de confiabilidade e de manutenibilidade configuram-se como importantes áreas do conhecimento e se inserem no contexto da engenharia de sistemas, a qual é responsável pela integração das duas primeiras a outras disciplinas como suporte logístico integrado, segurança, produção/operação, testes/verificação e garantia da qualidade. A engenharia de confiabilidade desenvolve e executa programas com foco na modelagem e análise, predição e otimização de confiabilidade, considerando aspectos ambientais e operacionais (Salgado, 2008).

O termo de confiabilidade refere-se à probabilidade de um sistema não falhar dentro de um intervalo de tempo e condições operacionais específicas. Neste contexto, o problema de confiabilidade-redundância é um bem conhecido problema de otimização que envolve a seleção de elementos e níveis de redundância para maximizar a confiabilidade do sistema sujeito as restrições do sistema. Os problemas de otimização de confiabilidade-redundância podem envolver a seleção de componentes com escolhas múltiplas e níveis de redundância que produzem o máximo de benefícios e estão sujeitos a restrições de custo, peso e volume. Muitos métodos matemáticos clássicos têm falhado em lidar com características de não-convexidade e não-suavidade em problemas de otimização de

confiabilidade-redundância. Como uma alternativa as abordagens clássicas de otimização (Kuo e Wan, 2007), as meta-heurísticas, tais como abordagens da computação evolutiva (Salgado, 2007; Gen e Yun, 2006), inteligência de enxames (Nascimento *et al.*, 2008) e sistemas imunológicos (Chen, 2006), têm ganhado atenção de diversos pesquisadores devido à habilidade destas técnicas em determinar boas soluções globais.

Recentemente, na literatura foi proposta uma nova meta-heurística, o algoritmo competitivo imperialista (*imperialist competitive algorithm*, ICA) (Atashpaz-Gargari e Lucas, 2007; Rajabioun *et al.*, 2008). O ICA foi concebido inspirado na ação de países imperialistas na conquista de novas colônias.

A contribuição deste artigo é apresentar os fundamentos do ICA como ferramenta para otimização na área de confiabilidade de sistemas. Para tanto, a abordagem ICA é avaliada em um problema de alocação de confiabilidade-redundância para um sistema de proteção à sobre-velocidade de uma turbina a gás. Além disso, os resultados de simulação obtidos pelo ICA são comparados com os resultados apresentados na literatura recente.

O restante do artigo é organizado da seguinte forma. Na seção 2 é descrito o problema de alocação de redundância-confiabilidade de sistemas. Na seção 3 são apresentados os fundamentos do ICA. Na seção 4 são apresentados e discutidos os resultados. Finalizando, a seção 5 apresenta a conclusão do artigo.

## 2 Redundância-Confiabilidade de Sistemas

Com a dependência, cada vez maior, de sistemas cujas conseqüências de possíveis falhas serem graves ou até mesmo irreparáveis foi gerada uma preocupação crescente e justificada em relação à confiabilidade dos mesmos. A fim de prever e evitar essas possíveis falhas, é que foi concebida a área de engenharia de confiabilidade, a qual está vinculada ao estudo, análise e projeto de metodologias para a previsão e o aumento da confiabilidade de sistemas, visando à obtenção de uma faixa de operação aceitável para sistemas, principalmente presentes no meio industrial. Em termos gerais, a confiabilidade de um sistema tem natureza estocástica. Entretanto, o tratamento de incertezas por meio das ferramentas de probabilidade e estatística pode permitir a concepção de um modelo matemático que seja apto ao auxílio à tomada de decisão.

Quando um projetista de sistemas é convidado a desenvolver um sistema altamente confiável, dois caminhos podem ser tomados para melhorar a confiabilidade do sistema: (i) adicionando componentes redundantes, e (ii) aumentando a confiabilidade dos componentes. Ambos os caminhos geralmente aumentam os recursos (custo, volume, peso, entre outros). Desta forma, na fase de desenvolvimento de um sistema, um importante problema pode ser como conseguir o equilíbrio entre confiabilidade e os recursos disponíveis (Hikita *et al.*, 1992). A seguir é descrito o estudo de caso de otimização, avaliado neste artigo, de um sistema de proteção à sobre-velocidade de uma turbina a gás.

### 2.1 Descrição do Estudo de Caso

Este estudo de caso refere-se a um sistema de proteção a sobre-velocidade de uma turbina a gás. O sistema é formado por quatro válvulas responsáveis por alimentar uma turbina a gás com combustível. Caso a turbina exceda o seu limite de velocidade, as válvulas devem ser fechadas, de forma a interromper o fluxo de combustível. A figura 1 apresenta um esquema deste sistema.

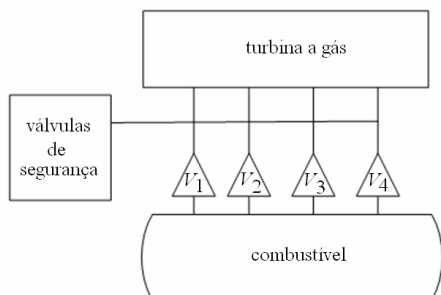


Figura 1. Esquema de um sistema de proteção a sobre-velocidade de uma turbina a gás.

Os mecanismos de abertura e fechamento das válvulas são feitos por componentes elétricos e mecânicos, os quais possuem um coeficiente de falha constante. O problema de otimização de redundância-confiabilidade é modelado pelas equações da função objetivo a ser maximizada e suas restrições, tal que:

$$f(r, n) = \prod_{i=1}^m R_i(r_i, n_i) \quad (1)$$

sujeito as seguintes restrições:

$$h_1(r, n) = \sum_{i=1}^m v_i n_i^2 \leq V, \quad (2)$$

$$h_2(r, n) = \sum_{i=1}^m C(r_i) \cdot [n_i + \exp(n_i / 4)] \leq C, \quad (3)$$

$$h_3(r, n) = \sum_{i=1}^m w_i n_i \exp(n_i / 4) \leq W, \quad (4)$$

$$C(r_i) = \alpha_i (-T / \ln r_i)^{\beta_i} \quad (5)$$

onde  $h_1$ ,  $h_2$  e  $h_3$  são as restrições,  $0,5 \leq r_i \leq 1 - 10^{-6}$ ,  $n_i \in \mathbb{Z}^+$  (números inteiros positivos), tal que  $1 \leq i \leq m$ ;  $\alpha_i, \beta_i \in \mathbb{R}$  representam as características físicas dos componentes dos subsistemas;  $1 \leq n_i \leq 10$ ,  $T$  é o tempo de operação em que o componente não pode falhar (adotado  $T = 1000$  h). A descrição das variáveis apresentadas nas equações (1) a (5) é dada na Tabela 1. Na Tabela 2 são apresentados os dados do problema de otimização.

Tabela 1. Definição das variáveis do estudo de caso.

Parâmetro	Descrição
$M$	número de subsistemas de um sistema
$n_i$	número de componentes no subsistema $i$ , $1 \leq i \leq m$
$N$	$(n_1, n_2, \dots, n_m)$ , é o vetor de alocação redundância do sistema
$r_i$	confiabilidade de cada componente do subsistema $i$ , $1 \leq i \leq m$
$R$	$(r_1, r_2, \dots, r_m)$ , é o vetor de confiabilidade do componente para o sistema
$q_i$	$1 - r_i$ , a probabilidade de falha de cada componente no subsistema $i$ , $1 \leq i \leq m$
$R_i(n_i)$	$1 - q_i^{n_i}$ , a confiabilidade do subsistema $i$ , $1 \leq i \leq m$
$R_s$	confiabilidade do sistema
$h_i$	$i$ -ésima função de restrição
$w_i$	peso de cada componente no subsistema $i$ , $1 \leq i \leq m$
$v_i$	volume de cada componente no subsistema $i$ , $1 \leq i \leq m$
$c_i$	custo de cada componente no subsistema $i$ , $1 \leq i \leq m$
$V$	limite superior da soma dos produtos do volume e peso dos subsistemas
$C$	limite superior do custo do sistema
$W$	limite superior do peso do sistema

Tabela 2. Dados do problema de otimização.

Estágio	$10^5 \cdot \alpha_i$	$\beta_i$	$v_i$	$w_i$	$V$	$C$	$W$
1	1,0	1,5	1	6	250	400	500
2	2,3	1,5	2	6			
3	0,3	1,5	3	8			
4	2,3	1,5	2	7			

### 3 Algoritmo Competitivo Imperialista

O algoritmo ICA foi concebido inspirado na disputa de colônias por países imperialistas. O imperialismo é a política de estender o poder de um governo além de seus limites territoriais. Esta expansão se dá pelo domínio de outros territórios denominados colônias, as quais se dirigem em direção ao seu imperialista. Quanto mais forte o país imperialista, mais chances ele tem de adquirir mais colônias, enquanto que os imperialistas mais fracos tendem a perder suas colônias.

Um país imperialista juntamente com suas colônias forma um império, cujo poder total é a soma do poder do país imperialista com o poder de suas colônias. Desta forma os impérios com maior poder tendem a conquistar os impérios com menor poder, os quais são extintos durante o processo, fazendo com que o conjunto de países convirja para um único império. É possível também que uma colônia tome o lugar do seu imperialista, caso esta adquira um poder maior do que o dele.

O fluxograma apresentado na figura 2 representa o funcionamento do ICA, o qual é explicado em detalhes na seqüência.

Ao comparar-se um algoritmo genético clássico com o ICA, tem-se que os países assumem o papel dos cromossomos, ou seja, eles representam as possíveis soluções dentro do espaço de busca. Os países são representados por uma *string* de dimensão  $1 \times N_{var}$ , tal que

$$países = [p_1, p_2, \dots, p_{N_{var}}] \quad (6)$$

onde  $N_{var}$  é o número de variáveis do problema.

Inicialmente, uma população de países é gerada aleatoriamente, os quais serão divididos entre imperialistas e colônias. Os imperialistas serão os países com os menores custos – pois o algoritmo é de minimização.

O custo de um país é dado pelo cálculo da função objetivo através de suas variáveis. Como os problemas propostos neste artigo são de maximização, o custo de um país é dado pelo inverso da função objetivo aplicada naquele país:

$$custo = f(país) = \frac{1}{f([p_1, p_2, \dots, p_{N_{var}}])} \quad (7)$$

As colônias por sua vez, serão distribuídas entre os imperialistas de acordo com os seus respectivos poderes. Para tanto é definido um custo normalizado pela expressão:

$$C_n = c_n - \max_i(c_i) \quad (8)$$

onde  $c_n$  é o custo do  $n$ -ésimo imperialista e  $C_n$  é o seu custo normalizado. A partir do custo normalizado, é definido o poder normalizado  $p_n$  de um imperialista por:

$$p_n = \frac{|c_n|}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} c_i} \quad (9)$$

O poder normalizado de um imperialista representa a quantidade de colônias iniciais que irá possuir, sendo este número definido por:

$$N \cdot C_n = arredondamento(p_n \cdot N_{col}) \quad (10)$$

onde  $N \cdot C_n$  é o número de colônias iniciais que o  $i$ -ésimo imperialista irá possuir, a operação *arredondamento* atribui o valor inteiro mais próximo e  $N_{col}$  o número total de colônias a serem distribuídas de forma aleatória.

Os impérios então são formados a partir de um imperialista com suas respectivas colônias. Seguindo o fluxo do algoritmo, o próximo passo é movimentar as colônias em relação aos seus respectivos imperialistas. Essa é a operação principal do algoritmo de busca por novas soluções. A movimentação se dá através de uma componente constante definida pelo usuário e por uma componente aleatória. A equação (11) define a movimentação é descrita a seguir:

$$Pos_{i+1} = Pos_i + \gamma \cdot \delta \cdot d \quad (11)$$

onde  $Pos_i$  é o vetor de posições das colônias na iteração  $i$ ,  $\gamma$  é uma constante com valor maior que 1 definida pelo usuário,  $\delta$  é um numero aleatório entre 0 e 1 e  $d$  é o vetor com as distancias entre as colônias de seus imperialistas.

Através da revolução é ainda possível que uma colônia mude para uma nova posição que é gerada aleatoriamente. A probabilidade de isso acontecer se deve a um parâmetro ajustável denominado taxa de revolução. No final das movimentações, caso uma colônia se torne mais poderosa que seu imperialista – ou seja, com uma solução melhor – ela se torna o novo imperialista, o qual se torna uma colônia.

O custo total de um império é dado pelo custo do imperialista mais uma porcentagem do custo de suas colônias:

$$T \cdot C_n = Custa(Imperialista) + \varepsilon \cdot média\{custa(Colôniasdoimperialista_n)\} \quad (12)$$

onde  $T \cdot C_n$  é o custo total do império e  $\varepsilon$  é uma constante com valores entre 0 e 1. Quanto maior o  $\varepsilon$ , menos importante é o custo do imperialista.

O próximo passo é promover a competição imperialista. A colônia com pior desempenho do império mais fraco é selecionada para ser conquistada pelo império com maiores chances de adquiri-la. Para isso, é definido o custo normalizado dos impérios por:

$$N \cdot T \cdot C_n = T \cdot C_n - \max_i(T \cdot C_i) \quad (13)$$

onde  $N \cdot T \cdot C_n$  é o custo normalizado do  $n$ -ésimo império e  $\max_i(T \cdot C_i)$  é o custo total do império com o maior custo total de todos. Com isto, a probabilidade de posse  $p_{p_n}$  para cada império é dada por:

$$p_{p_n} = \frac{|N \cdot T \cdot C_n|}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} N \cdot T \cdot C_i} \quad (14)$$

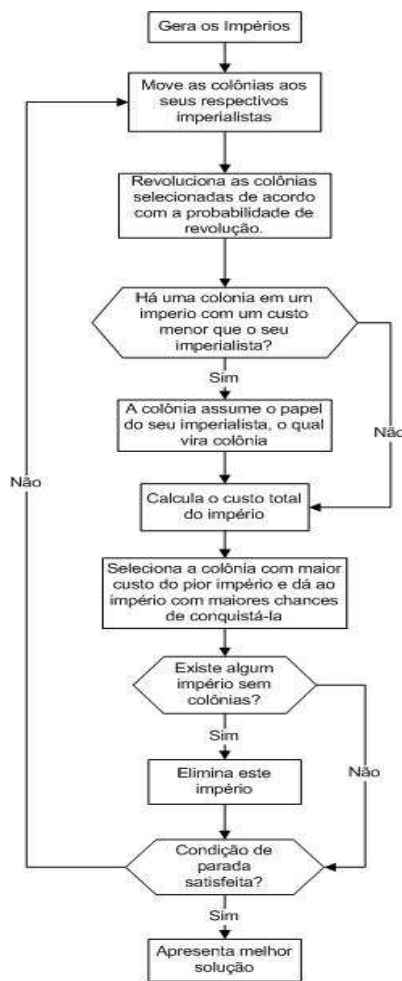


Figura 2. Fluxograma do algoritmo ICA.

São definidos também o vetor  $\mathbf{P}$ , com as probabilidades de posse de cada império, e o vetor  $\mathbf{R}$ , do tamanho de  $\mathbf{P}$ , com números aleatórios distribuídos uniformemente entre 0 e 1, tal que:

$$\mathbf{P} = [p_{p_1}, p_{p_2}, \dots, p_{p_{N_{imp}}}]$$

$$\mathbf{R} = [r_1, r_2, \dots, r_n]$$

É definido  $\mathbf{D}$  pela subtração de  $\mathbf{P}$  por  $\mathbf{R}$ :

$$\mathbf{D} = \mathbf{P} - \mathbf{R} = [D_1, D_2, \dots, D_{N_{imp}}] \quad (15)$$

O império escolhido a possuir a colônia será aquele com o índice do maior valor de  $\mathbf{D}$ . Em seguida, o algoritmo analisa se há algum império sem colônias, se houver, o império é eliminado. A partir de um número de iterações, todos os impérios serão eliminados, com exceção do mais forte, o qual terá todas as colônias sob seu domínio e todas as colônias estarão na mesma posição que a do imperialista. Neste novo mundo, não há diferenças entre imperialistas e colônias, o que leva ao fim a competição imperialista.

### 3.1 Tratamento de restrições

Conforme mencionado na seção 2, o aumento da confiabilidade de um sistema está sujeito às restrições de custo, peso e volume. Para que as soluções dadas pelo algoritmo estejam na região

praticável, ou seja, dentro das restrições, é aplicada uma penalização no valor da função objetivo que é proporcional a distância que a solução se encontra da região praticável. Para cada país o valor da violação de uma restrição  $V_j$ , para o país  $j$  é definida por:

$$V_j = \begin{cases} h(r, n) - b, & \text{se } h(r, n) > b \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (16)$$

A penalização é aplicada ao custo (função objetivo) de cada país (problema de maximização) pela seguinte forma:

$$Custo = \frac{R_s}{1 + \sum_{j=1}^k V_j} \quad (17)$$

onde  $k$  é a quantidade de restrições do problema. Note que a confiabilidade do sistema diminui a medida que a violação aumenta.

## 4 Resultados de Simulação

Para validação do algoritmo ICA, em relação ao estudo de caso, foram efetuadas 100 simulações com cada algoritmo de otimização. Foi utilizado número máximo de décadas igual a 180 (ICA-1) e 800 (ICA-2) e população com 15 países imperialistas e 75 colônias.

A tabela 3 mostra estatísticas de simulação obtidas com os resultados das 100 simulações de cada método proposto, para efeito de análise de robustez e desempenho. Nota-se por esta tabela que o ICA-2 com 67128 avaliações da função objetivo obteve melhor desempenho que o ICA-1, este com um total de 15544 avaliações da função objetivo por simulação.

Tabela 3. Resumo dos resultados para 100 simulações.

$f(r, n)$	ICA-1	ICA-2
mínimo	0,99995250	0,99985012
máximo	0,99967645	0,99995463
média	0,99991463	0,99992947
desvio padrão	0,00003786	0,00002600

Os gráficos de convergência média de (100 simulações) para o ICA-1 e ICA-2 são apresentados nas figuras 2 e 3. A tabela 4 mostra um comparativo de resultados obtidos para o sistema de proteção à sobre-velocidade de uma turbina a gás. Neste contexto, os resultados obtidos pelo ICA-2 foram superiores aos obtidos em Dhingara *et al.* (1997), Yokota *et al.* (1996) e Coelho (2009), em termos do melhor valor de função objetivo obtido. No entanto, o ICA-1 também apresentou resultado promissor com um valor de função custo próximo aos obtidos em Dhingara *et al.* (1997), Yokota *et al.* (1996) e Coelho (2009).

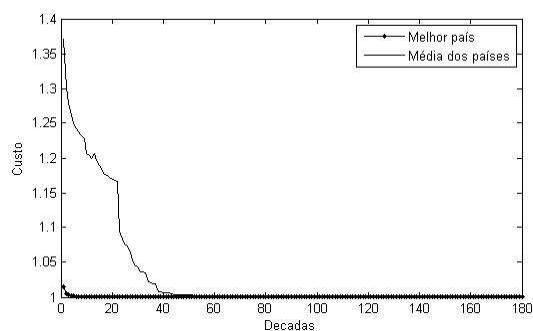


Figura 2. Convergência média do ICA-1.

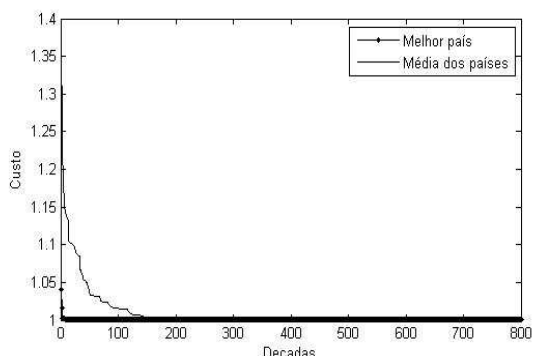


Figura 3. Convergência média do ICA-2.

## 5 Conclusão

Neste artigo, a abordagem ICA com duas configurações diferentes (ICA-1 e ICA-2) foi validada em um problema de alocação de redundância-confiabilidade de um sistema de proteção à sobre-velocidade de uma turbina a gás.

Neste contexto, foi obtida uma boa convergência ao analisar os respectivos desvios padrões dos países analisados no ICA-1 e ICA-2 (ver tabela 3) e a rapidez com que a média do custo da população se aproxima do custo do melhor indivíduo (ver resultados apresentados nas figuras 2 e 3).

## Referências Bibliográficas

- Atashpaz-Gargari, E. e Lucas, C. (2007). Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Singapore, p. 4661-4667.
- Chen, T. C. (2006). IAs based approach for reliability redundancy allocation problems, *Applied*

*Mathematics and Computation*, **182**(2): 1556-1567.

Coelho, L. (2009). An efficient particle swarm approach for mixed-integer programming in reliability-redundancy optimization applications, *Reliability Engineering and System Safety*, **94**(4): 830-837.

Dhingra, A. K. (1992). Optimal apportionment of reliability & redundancy in series systems under multiple objectives, *IEEE Transactions on Reliability*, **41**(4): 576-582.

Gen, M. e Yun, Y. S. (2006). Soft computing approach for reliability optimization: state-of-the-art survey, *Reliability Engineering and System Safety*, **91**(9): 1008-1026.

Hikita, M., Nakagawa, Y. e Harihisa, H. (1992). Reliability optimization of systems by a surrogate constraints algorithm, *IEEE Transactions on Reliability*, **41**(3): 473-480.

Kuo, W. e Wan, R. (2007). Recent advances in optimal reliability allocation, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, **37**(2): 143-156.

Nascimento, F. A. F., Guerra, F. A. e Coelho, L. S. (2008). Abordagem de enxame de partículas aplicada à engenharia de confiabilidade, *Anais da VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais (Induscon)*, Poços de Caldas, MG.

Rajabioun R., Hashemzadeh, F., Atashpaz-Gargari, E., Mesgari, B. e Salmasi, F. R. (2008). Identification of a MIMO evaporator and its decentralized PID Controller tuning using colonial competitive algorithm, *Proceedings of IFAC World Congress*, Seoul, Korea.

Salgado, M. F. P. (2008). Aplicação de técnicas de otimização à engenharia de confiabilidade, *Dissertação de mestrado*, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

Salgado, M. F. P., Lisboa, A. C., Saldanha, R. R., Caminhas, W. M. e Menezes, B. R. (2007). Aplicação da computação evolucionária na otimização da confiabilidade de sistemas, *Anais do I Simpósio Brasileiro de Inteligência Computacional (SBIC)*, Florianópolis, SC.

Yokota, T., Gen, M. e Li, H. H. (1996). Genetic algorithm for nonlinear mixed-integer programming problems and its application, *Computers and Industrial Engineering*, **30**(4): 905-917.

Tabela 4. Comparativo de resultados para o estudo de caso.

Parameter	Dhingra (1992)	Yokota et al. (1996)	Coelho (2009)	ICA-1	ICA-2
$f(\mathbf{r}, \mathbf{n})$	0,99961	0,999468	0,999953	0,999952	0,999955
$n_1$	6	3	5	5	5
$n_2$	6	6	6	6	6
$n_3$	3	3	4	4	4
$n_5$	5	5	5	5	5
$r_1$	0,81604	0,965593	0,902231	0,900501	0,902234
$r_2$	0,80309	0,760592	0,856325	0,839418	0,848969
$r_3$	0,98364	0,972646	0,948145	0,947852	0,949026
$r_4$	0,80373	0,804660	0,883156	0,894286	0,887752