

ANÁLISE DO ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL APLICADO AO DESIGN CONSTRUCTAL DE UMA CAVIDADE EM FORMA DE DUPLO-T

Gill V. Gonzales^{1,2}

Liércio A. Isold²

Luiz A. Oliveira Rocha³

Elizaldo D. dos Santo⁴

Antônio J. Silva Neto⁵

Resumo: Neste trabalho é investigado o desempenho do algoritmo de Evolução Diferencial aplicado à otimização geométrica de um problema de transferência de calor. O problema consiste em uma cavidade em forma de Duplo-T inserida em um sólido com geração de calor constante e uniforme. As laterais do sólido estão em condições adiabáticas e o calor gerado só pode ser removido pela cavidade, a qual é mantida a uma temperatura prescrita. Portanto, a geometria da cavidade influencia diretamente a performance térmica do problema. A definição dos graus de liberdade e restrições do problema é realizada através do método de Constructal Design. A otimização geométrica é realizada através do algoritmo de Evolução Diferencial. Neste estudo, são avaliados os parâmetros do algoritmo, tais como o operador de mutação, taxa de cruzamento, fator de amplificação do cálculo diferencial e número de iterações ou avaliação da função objetivo. O número de iteração está relacionado aos parâmetros que configuram o número de gerações e quantidade de indivíduos na população. O objetivo principal do trabalho é avaliar os parâmetros do algoritmo de Evolução Diferencial e qual a influência na correta reprodução dos efeitos dos graus de liberdade estudados sobre a geometria ótima e performance térmica do problema. Os resultados indicam como mais adequadas as configuração dos parâmetros de taxa de cruzamento e fator de amplificação respectivamente com os seguintes valores 0,7 e 1,5. Estes parâmetros, em conjunto com operador de mutação identificado como de/rand/1/bin, tornaram os resultados do algoritmo mais robustos e necessitando de um menor número de avaliações da função objetivo para a obtenção das geometrias ótimas. A principal contribuição do trabalho é a recomendação de um conjunto de parâmetros adequados que adaptem o algoritmo de Evolução Diferencial ao problema estudado, tornando o algoritmo mais efetivo e robusto para a otimização geométrica do problema estudado.

Palavras-chave: Otimização Geométrica. Transferência de Calor. Constructal Design. Evolução Diferencial.

¹Mestre, Instituto Federal Sul-Rio-Grandense - Campus Santana do Livramento, RS, Brazil, gillgonzales@ifsul.edu.br.

²Doutor, Universidade Federal do Rio Grande - PPG em Modelagem Computacional, Rio Grande, RS, Brazil, liercioisoldi@furg.br.

³Doutor, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - PPG em Engenharia Mecânica – São Leopoldo, RS, Brazil luizor@unisinos.br.

⁴Doutor, Universidade Federal do Rio Grande - PPG em Modelagem Computacional, Rio Grande, RS, Brazil, elizaldosantos@furg.br.

⁵Doutor, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Nova Friburgo, RJ, Brazil, ajsneto@iprj.uerj.br.

1 Introdução

A pesquisa em cavidades resfriadoras têm início no trabalho de Biserni, Rocha, and Bejan (2004), onde são propostas as formas elementares C e T. Neste trabalho (Biserni et al., 2004), o método de Constructal Design é aplicado para a definição do problema de otimização, assim como a avaliação da influência da geometria sobre a minimização da resistência térmica entre a cavidade e o sólido. O método Constructal Design é baseado na Teoria Constructal (Bejan, 1997), a qual defende que um princípio físico, a Lei Constructal, determina as formas e estruturas presentes na natureza, sendo a geometria o resultado da otimização da passagem do fluxo em sistemas de escoamento. A Lei Constructal afirma que "Para um sistema de escoamento, animado ou inanimado, evoluir no tempo (sobreviver) é preciso que sua forma e estrutura também evoluam de forma a facilitar a passagem do fluxo"(Bejan, 1997). Portanto, a geometria é o resultado de um processo de otimização da passagem do escoamento. É importante salientar que o método de Constructal Design (CD) não é o método de otimização. O CD determina os graus de liberdade, restrições e espaço de busca do problema para a avaliação da geometria. Para a otimização geométrica são aplicados métodos de otimização como a Busca Exaustiva ou métodos heurísticos como o Algoritmos Genéticos (AG) e Recozimento Simulado (RS) (Lorenzini et al., 2014; G. Gonzales et al., 2015).

Biserni et al. (2004) concluiu que a cavidade em forma de T é mais eficiente que a primeira forma elementar em C, pois consegue adentrar melhor no domínio computacional investigado. A partir desta observação, formas mais complexas são investigadas na literatura recente (Biserni, Rocha, Stanescu, & Lorenzini, 2007; Lorenzini, Biserni, Isoldi, dos Santos, & Rocha, 2011; Lorenzini et al., 2014; Biserni, Dalpiaz, Fagundes, & Rocha, 2017; Xie, Chen, & Sun, 2010). Por exemplo, no trabalho de Lorenzini et al. (2011) a cavidade proposta em forma de Y, foi até 66% mais eficiente que a forma elementar T. Portanto, na literatura recente, é possível constatar que formas mais complexas possuem um maior desempenho na minimização da resistência térmica entre o sólido e a cavidade, para o mesmo tipo de problema e mantendo as mesmas restrições. Entretanto, quanto maior a complexidade da cavidade maior é esforço computacional necessário no processo de otimização geométrica, principalmente quando o método de otimização empregado é o método de Busca Exaustiva (BE), quando todas as possibilidades são simuladas. Neste sentido, com a proposta de minimização do esforço computacional e possibilidade de investigar outras características do problema, métodos heurísticos são utilizados no processo de otimização (Lorenzini et al., 2014; G. Gonzales et al., 2015; G. V. Gonzales et al., 2017;

Biserni et al., 2017).

O uso de métodos heurísticos requer a configuração de parâmetros que controlam o comportamento destes métodos durante o processo de busca pela solução ótima. No trabalho de G. Gonzales et al. (2015) foi empregado o algoritmo de Recozimento Simulado (RS) para a otimização geométrica da cavidade em forma de Y. Este estudo mostrou como um parâmetro de configuração do método pode influenciar os resultados. O parâmetro analisado foi a função que controla o decaimento da temperatura do RS durante as iterações do algoritmo. Diferentes parâmetros foram investigados e identificados aqueles que levaram ao melhor ou pior desempenho. O parâmetro identificado como *Fast*, por exemplo, apresentou os piores resultados e influenciaria negativamente a avaliação geométrica caso seus resultados fossem utilizados.

No trabalho de (G. V. Gonzales et al., 2017) foram comparadas duas diferentes meta-heurísticas, RS e Luus-Jakoola (LJ), e também diferentes versões destes métodos, variando seus parâmetros. Este estudo compara estatisticamente o desempenho dos algoritmos em encontrar a geometria ótima na otimização da cavidade em forma de Duplo-T. Neste estudo, o algoritmo RS, com a função de decaimento de temperatura híbrida identificada como *BoltzExp*, apresenta os melhores resultados entre os métodos investigados. No entanto, no trabalho de G. V. Gonzales, dos Santos, and Neto (2018), a mesma análise estatística em encontrar a geometria ótima para o mesmo problema investigado em (G. V. Gonzales et al., 2017), foi realizada entre os algoritmos de Evolução Diferencial (ED) e RS. Neste estudo, os resultados do algoritmo ED foram superiores aos resultados do algoritmo RS.

Neste artigo, será investigada a aplicação do algoritmo de ED na otimização geométrica da cavidade em forma de Duplo-T. Serão comparados os resultados de diferentes versões do algoritmo ED, configurados com diferentes parâmetros, assim como com diferentes avaliações da função objetivo.

2 Modelagem Matemática e Numérica

A Figura 1 apresenta o sólido em um domínio bidimensional, com a terceira dimensão W , perpendicular ao plano da figura. O domínio sólido é representado pela região cinza na Fig. 1, a qual possui uma geração de calor interna constante e uniforme a uma taxa volumétrica dada por $q''' (Wm^{-3})$. O sólido possui uma condutividade térmica constante k . As superfícies externas do sólido estão perfeitamente isoladas (adiabática). Neste caso, o calor só pode ser removido através da cavidade em forma de Duplo-T, que está mantida a uma temperatura mínima (θ_{min}). A temperatura mínima da cavidade

The diagram shows a rectangular domain of width L and height H . A central vertical slot of width L_0 and height H_0 is centered. Two horizontal slots are located at heights H_1 and H_2 from the bottom, with widths L_1 and L_2 respectively. The material properties are k, q''' . The coordinate system has x from $-L/2$ to $L/2$ and y from 0 to H . The origin $(0,0)$ is at the bottom center of the vertical slot. The distance from the bottom to the center of the horizontal slots is S_1 . The minimum angle θ_{\min} is indicated at the bottom of the vertical slot.

O objetivo da análise é determinar a geometria ótima (H/L , H_0/L_0 , H_1/L_1 , H_2/L_2 e S_1/H_0) que minimiza a máxima temperatura em excesso adimensional. $(\theta_{max} - \theta_{min})/(q''' A)$. De acordo com o CD esta otimização deve ser submetida as restrições de área total e cavidade, representadas, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$A_c = A_0 + 2A_1 + 2A_2 \quad (2)$$

$$\phi_c = A_c/A \quad (3)$$
$$\frac{\partial \theta}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{y}^2} + 1 = 0 \quad (4)$$

onde as variáveis adimensionais são dadas por:

$$\tilde{\theta} = \frac{\theta - \theta_{min}}{q''' \cdot \frac{A}{k}} \quad (5)$$

$$\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{H}_0, \tilde{H}_1, \tilde{H}_2, \tilde{L}_0, \tilde{L}_1, \tilde{L}_2, \tilde{H}, \tilde{L}, \tilde{S}_1 = \frac{x, y, H_0, H_1, H_2, L_0, L_1, L_2, H, L, S_1}{A^{1/2}} \quad (6)$$

Por razões de brevidade, as equações das condições de contorno de fluxo nulo nas superfícies externas ao sólido, bem como, as equações de condições de contorno de temperatura mínima nas paredes da cavidade não são apresentadas, podendo ser vistas no trabalho de (? , ?).

A forma adimensional das Eqs. 1-2 são representadas pelas seguintes equações:

$$1 = \tilde{H}\tilde{L} \quad (7)$$

$$\phi_c = \tilde{H}_0\tilde{L}_0 + 2\phi_1 + 2\phi_2 \quad (8)$$

$$\phi_1 = \tilde{H}_1\tilde{L}_1 \quad (9)$$

$$\phi_2 = \tilde{H}_2\tilde{L}_2 \quad (10)$$

O objetivo é minimizar o máximo excesso de temperatura representado pela seguinte equação:

$$\tilde{\theta}_{max} = \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{q''' \cdot \frac{A}{k}} \quad (11)$$

Para a determinação da $\tilde{\theta}_{max}$ é necessário a otimização de cinco graus de liberdade (H/L , H_0/L_0 , H_1/L_1 , H_2/L_2 e S_1/H_0) submetidos as restrições de área da cavidade (ϕ_c, ϕ_1 and ϕ_2) e de área total do sólido. Neste artigo, serão otimizados apenas quatro graus de liberdade (H/L , H_0/L_0 , H_1/L_1 , H_2/L_2 e S_1/H_0). Em todos os casos a razão H/L será mantida constante ($H/L = 1,0$).

A função representada pela Eq. 11 é resolvida numericamente através da resolução da Eq. 4 para a determinação dos os campos de temperatura em todo o domínio computacional para diferentes configurações de (H/L , H_0/L_0 , H_1/L_1 , H_2/L_2 e S_1/H_0) e calculando o $\tilde{\theta}_{max}$ para minimizar o seu valor através da variação da configuração geométrica. A solução numérica é dada pela aplicação do método de Elementos Finitos (FEM), baseado em elementos triangulares, desenvolvido no ambiente MATLAB, com o pacote PDE (partial-differential-equations) toolbox ? (? , ?). A malha é não-uniforme

em ambos eixos x e y , e varia de uma geometria para outra. O tamanho apropriado da malha é determinado por sucessivos refinamentos de malha (h-adaptativo), aumentando o número de elementos quatro vezes a cada refinamento. Por questões de simplicidade, o teste de malha independente pode ser verificado no trabalho de (? , ?)..

3 Otimização Geométrica

A otimização geométrica...

3.1 Constructal Design

A otimização geométrica...

3.2 Evolução Diferencial

A otimização geométrica...

4 Resultados

A otimização geométrica...

5 Conclusão

A otimização geométrica...

Agradecimentos

Agradecimentos e outras seções não numeradas são criadas pela utilização de um asterisco posterior ao comando, `\section*{Agradecimentos}`.

OBS: Parte dos textos utilizados neste modelo para exemplificar seções, quadros, tabelas, etc., foram gentilmente cedidos pela Revista Mundi⁶, do IFPR.

⁶<http://periodicos.ifpr.edu.br>

Referências

- Bejan, A. (1997). Constructal-theory network of conducting path for cooling a heat generating volume. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40, 799-816.
- Biserni, C., Dalpiaz, F. L., Fagundes, T. M., & Rocha, L. A. (2017). Constructal design of T-shaped morphing fins coupled with a trapezoidal basement: A numerical investigation by means of Exhaustive Search and Genetic Algorithm. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 73–81.
- Biserni, C., Rocha, L. A., & Bejan, A. (2004). Inverted fins: Geometric optimization of the intrusion into a conducting wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(12-13), 2577–2586.
- Biserni, C., Rocha, L. A., Stanescu, G., & Lorenzini, E. (2007). Constructal H-shaped cavities according to Bejan's theory. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(11-12), 2132–2138.
- Gonzales, G., Estrada, E. d. S., Emmendorfer, L., Isoldi, L., Xie, G., Rocha, L., & dos Santos, E. (2015). A comparison of simulated annealing schedules for constructal design of complex cavities intruded into conductive walls with internal heat generation. *Energy*, 93, 372–382.
- Gonzales, G. V., dos Santos, E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., Silva Neto, A. J., & Telles, W. R. (2017). Constructal design of double-T shaped cavity with stochastic methods Luus-Jaakola and Simulated Annealing. *Defect and Diffusion Forum*, 370.
- Gonzales, G. V., dos Santos, E. D., & Neto, A. J. S. (2018). Uma Comparação Entre Os Algoritmos De Evolução Diferencial E Recozimento Simulado Associados Ao Design Construtal Para A Otimização Geométrica De Uma Cavidade Em Forma De Duplo-T. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, 3(2), 85–104.
- Lorenzini, G., Biserni, C., Estrada, E. D., Isoldi, L. A., dos Santos, E. D., & Rocha, L. A. O. (2014). Constructal design of convective Y-shaped cavities by means of Genetic Algorithm. *Journal of Heat Transfer*, 136(7), 071702.
- Lorenzini, G., Biserni, C., Isoldi, L. A., dos Santos, E. D., & Rocha, L. A. O. (2011). Constructal Design Applied to the Geometric Optimization of Y-shaped Cavities Embedded in a Conducting Medium. *Journal of Electronic Packaging*, 133(4), 041008.
- Xie, Z., Chen, L., & Sun, F. (2010). Geometry optimization of T-shaped cavities according to constructal theory. *Mathematical and Computer Modelling*, 52(9-10), 1538–1546.