

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

EVOLUÇÃO DIFERENCIAL QUASE-OPOSICIONAL APLICADA NA OTIMIZAÇÃO DE UM TROCADOR DE CALOR CASCO-TUBO

Leonardo Cavaleiro Martinez, leonardo.cmartinez@live.com¹

Emerson Hochsteiner de Vasconcelos Segundo, e.hochsteiner@gmail.com²

Viviana Cocco Mariani, viviana.mariani@pucpr.br²

Leandro dos Santos Coelho, leandro.coelho@pucpr.br²

¹ Universidade Federal do Paraná – UFPR – Av.Cel. Francisco Heráclito dos Santos, Curitiba – PR, Brasil.

² Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR – R. Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – PR, Brasil.

Resumo: Trocadores de calor casco-tubo são os tipos mais comuns de trocadores de calor e podem ser encontrados em diversas aplicações industriais. A redução dos custos de investimento e de operação deste equipamento é um dos principais objetivos de projetistas e empresários do ramo. Com o intuito de reduzir os custos totais de um trocador de calor casco-tubo, como proposto por CAPUTO et al. (2008), utilizou-se neste estudo a técnica de otimização denominada Evolução Diferencial (ED) e Evolução Diferencial Quase-Oposicional (EDQO), que consiste, basicamente, em um mecanismo de cálculo, sustentado nos operadores de “cruzamento” e “mutação” diferencial, através de argumentos matemáticos e heurísticos que indicam sua adequabilidade para a otimização de funções. Este estudo é definido como um problema de otimização mono-objetivo, sendo o custo total de um trocador de calor casco-tubo a função objetivo do mesmo. Para isso, tomou-se como variáveis de projeto o diâmetro interno do tubo, o diâmetro externo do casco e o espaçamento entre os as chicanas ou defletores. Os resultados obtidos neste trabalho foram comparados com o mesmo problema quando utilizado AG (Algoritmos Genéticos), PSO (Particle Swarm Optimization), QPSO (Quantum Particle Swarm Optimization) e QPSOZ (Quantum Particle Swarm Optimization by Zaslavskii). Com relação à literatura, o capital em investimento no trocador de calor, ao aplicar a ED reduziu o correspondente a 15,2% e, por consequência, o custo de depreciação do equipamento caiu em, aproximadamente, 12,5%. Além disso, ao aplicar a EDQO, a redução em investimento e depreciação do equipamento foi da ordem de 15,1% e 13,4%, respectivamente. De maneira geral, o custo total do trocador de calor casco-tubo em análise, tanto ao aplicar ED quanto EDQO, apresentou uma redução da ordem de 15%, mostrando o potencial destes métodos aplicados neste trabalho, ou seja, as técnicas ED e EDQO.

Palavras-Chave: Otimização, Trocadores de Calor Casco-Tubo, Evolução Diferencial e Evolução Diferencial Quase-Oposicional.

1. INTRODUÇÃO

Trocadores de calor são equipamentos projetados com o intuito de realizar o processo de troca térmica entre dois sistemas, fluido quente e fluido frio, segundo as Leis da Termodinâmica e, portanto, proporcionar o reaproveitamento de energia térmica presente nos fluidos quentes. Dessa forma, ao conservar a energia, os trocadores de calor tornam-se importantes ferramentas para a preservação do meio ambiente e manutenção da matriz energética. Este equipamento é amplamente utilizado em diversos setores da engenharia como, por exemplo, aquecedores, refrigeradores, condicionadores de ar, recuperadores de calor, usinas de geração de energia, plantas químicas, plantas petroquímicas, refinarias de petróleo, processamento de gás natural e tratamento de águas residuais. São poucos os trocadores de calor em que os fluidos estão em contato direto um com o outro. Na maioria deles, a transferência de calor se dá através de uma superfície de separação na qual o calor escoa de um fluido ao outro (Shah e Sekulic, 2003). Além disso, dentre os diversos tipos de trocadores, o trocador de calor casco-tubo se destaca pelas suas inúmeras aplicabilidades e, por isso, talvez seja o trocador com maior índice de aplicação no ramo industrial.

Após uma detalhada investigação na literatura, é possível verificar que a aplicação de diversos métodos numéricos para solução de inúmeros problemas de otimização é muito utilizada no meio científico. Com o foco em trocadores de calor, verificou-se que, de maneira geral, a maioria dos trabalhos englobam a utilização de funções objetivo que visam

otimizar o consumo de energia e suas características geométricas, além dos custos de operação, funcionamento e investimento deste equipamento. Um dos primeiros trabalhos da literatura sobre o tema é o de Sun *et al.* (1993). Os autores propuseram um modelo de otimização de energia para trocadores de calor casco-tubo onde a função objetivo utilizada foi definida como sendo a taxa de geração de entropia total (TGET) do sistema. Além disso, foram realizados ensaios experimentais em trocadores de calor casco-tubo mostrando que os valores obtidos estavam de acordo com o modelo matemático utilizado, confirmando a eficácia do processo de otimização. Muralikrishna e Shenoy (2000) propuseram uma metodologia de análise, baseada no método de Kern e em técnicas determinísticas de otimização, para obter as melhores condições geométricas e de custo para trocadores de calor casco-tubo, além de avaliar a distribuição da perda de carga nestes equipamentos. Selbas *et al.* (2006) aplicaram Algoritmos Genéticos (AG's) para encontrar as configurações ótimas relacionadas ao diâmetro dos tubos, número de passes e dimensões do casco. Além disso, usaram o método da média logarítmica das diferenças de temperaturas (MTDL) para determinar a área de transferência de calor de trocadores casco-tubo. Babu e Munawar (2007) foram um dos primeiros autores a utilizar técnicas de Evolução Diferencial (PRICE e STORN, 1997) para solução das configurações ótimas de trocadores de calor casco-tubo. Além disso, para efeitos de comparação dos resultados, os autores também aplicaram AG's e verificaram que a ED possui velocidade de cálculo excepcionalmente mais rápida que os AG's, mesmo analisando uma ampla gama de parâmetros físicos envolvendo trocadores de calor casco-tubo. Caputo *et al.* (2008) também utilizaram AG's para minimizar o custo total de um trocador de calor casco-tubo, incluindo o custo de investimento do equipamento, bem como os gastos energéticos relacionados ao funcionamento do mesmo. Patel e Rao (2010) estudaram o mesmo problema analisado por Caputo *et al.* (2008), porém utilizando a técnica de otimização PSO (*Particle Swarm Optimization*). Ao aplicar esta técnica e analisar os resultados, os autores verificaram uma redução tanto em custo de investimento quanto de operação. Dentre os quatro casos de estudos que foram analisados por Patel e Rao (2010), a redução no capital de investimento variou entre 2,9 e 6,6% e, no custo de operação, essa variação se comportou de maneira menos abrangente, dependendo do caso em análise, com seus resultados oscilando entre 14,1% e 15,9%. Em 2012, Mariani *et al.* (2012) deram continuidade aos trabalhos de Caputo *et al.* (2008) e Patel e Rao (2010). Dessa vez, os autores utilizaram os métodos de otimização QPSO (*Quantum Particle Swarm Optimization*) e QPSOZ (*Quantum Particle Swarm Optimization combined with Zaslavskii Chaotic Map Sequences*) e os resultados se mostraram, novamente, satisfatórios. De maneira geral, os custos apresentaram uma redução média significativa em comparação com os demais trabalhos. Dando continuidade aos trabalhos citados previamente, neste trabalho propõem-se o estudo e a aplicação do método de otimização ED para otimizar o trocador de calor casco-tubo investigado em Caputo *et al.* (2008), Patel e Rao (2010) e Mariani *et al.* (2012).

2. EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

O algoritmo de Evolução Diferencial (ED), desenvolvido por Storn e Price (1997), é um eficiente algoritmo estocástico de otimização que tem recebido destaque no âmbito da otimização não linear com variáveis contínuas. Ele se baseia em um mecanismo de cálculo, sustentado nos operadores de “cruzamento” e “mutação” diferencial, através de argumentos matemáticos e heurísticos que indicam sua adequabilidade para a otimização de funções. Por ser um método baseado em população, a ED mantém um conjunto de soluções que evolui ao longo de um processo através da geração de novas soluções e eventual substituição de soluções da população por novas soluções que se mostrem melhores ou mais promissoras. A geração de novas soluções é feita através de um operador de mutação que realiza combinação linear entre três soluções da população e um operador de cruzamento (*crossover*) que mistura coordenadas do vetor gerado pela operação de mutação e uma quarta solução da população (seleção de cruzamento). Esta última solução competirá com a nova solução gerada pela permanência na população. Se a nova solução obtida for melhor que a solução de cruzamento de acordo com algum critério de seleção pré-estabelecido, então a solução de cruzamento será substituída pela nova solução gerada (Melo *et al.*, 2008).

2.1. Operadores de Evolução Diferencial

Seja uma população de possíveis soluções para um problema, representado por $X_t = \{x_{t,i}; i = 1, 2, 3, \dots, N\}$, em que t é o índice da geração corrente e i é o índice de um indivíduo nesta população. Cada indivíduo na população corrente pode ser representado pelo seguinte vetor coluna:

$$x_{t,i} = \begin{bmatrix} x_{t,i,1} \\ \vdots \\ x_{t,i,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

dessa forma, o terceiro índice representa uma entre as n variáveis do problema a ser otimizado.

O mecanismo de busca do algoritmo de ED utiliza vetores diferenciais criados a partir de pares de vetores da própria população. Dois indivíduos são selecionados aleatoriamente da população corrente, criando-se um vetor diferencial, ou seja, a diferença entre estes dois indivíduos. Este vetor é somado a um terceiro indivíduo, também selecionado aleatoriamente, produzindo uma nova solução mutante. A nova solução mutante é, portanto, o resultado de uma perturbação em algum indivíduo da população. Matematicamente, define-se como:

$$\mathbf{v}_{t,i} = \mathbf{x}_{t,r_1} + F(\mathbf{x}_{t,r_2} - \mathbf{x}_{t,r_3}) \text{ com } r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (2)$$

onde $\mathbf{v}_{t,i}$ representa a i – ésima solução mutante e F é um fator de escala aplicado ao vetor diferencial e parâmetro do algoritmo de ED, denominado fator de mutação. O vetor $\mathbf{x}_{t,r_1}$ é denominado vetor base.

Com este procedimento, é possível obter uma população mutante $V_t = \{\mathbf{v}_{t,i}; i = 1, 2, \dots, N\}$ e, após isso, os indivíduos da população corrente X_t são recombinais discretamente e com probabilidade CR com os indivíduos da população mutante, produzindo a descendência ou população de soluções teste U_t .

$$\mathbf{u}_{t,i,j} = \begin{cases} \mathbf{v}_{t,i,j} & U_{[0,1]} \leq CR \\ \mathbf{x}_{t,i,j} & \text{Caso Contrário} \end{cases} \quad (3)$$

em que $U_{[0,1]}$ representa uma amostragem aleatória de uma variável com distribuição uniforme no intervalo $[0,1]$. O parâmetro CR controla a fração de valores $\mathbf{u}_{t,i}$ que serão copiados do vetor mutante $\mathbf{v}_{t,i}$. Quanto mais próximo de 1,0 for o valor de CR, maior a chance de que a solução teste contenha muitos valores herdados do vetor mutante e, quando $CR = 1$, o vetor teste é igual ao vetor mutante. O procedimento de Evolução Diferencial é ilustrado na Figura 1.

Por fim, o valor da função-objetivo é avaliado em $\mathbf{u}_{t,i}$ e cada solução teste é comparada com o correspondente na população corrente $\mathbf{x}_{t,i}$. Se a solução teste é melhor que a solução corrente $\mathbf{x}_{t,i}$, elimina-se a solução corrente e seu lugar passa a ser ocupado por $\mathbf{u}_{t,i}$. Caso contrário, a solução teste é descartada e a solução corrente sobrevive, permanecendo na população da próxima geração, representada por X_{t+1} . O procedimento iterativo é repetido até que algum critério de parada (ou convergência) seja satisfeito. O critério para a sobrevivência de uma solução pode ser descrita por:

$$\mathbf{x}_{t+1,i} = \begin{cases} \mathbf{u}_{t,i} & f(\mathbf{u}_{t,i}) \leq f(\mathbf{x}_{t,i}) \\ \mathbf{x}_{t,i} & \text{Caso Contrário} \end{cases} \quad (4)$$

desde que o problema seja de minimização da função-objetivo.

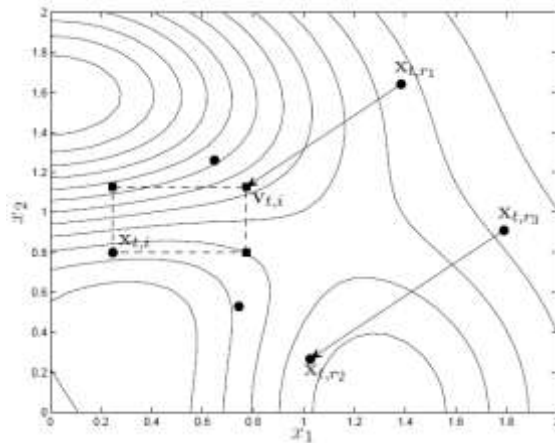


Figura 1. Ilustração do Procedimento de Geração de uma Solução Mutante. Fonte: Rocha e Saramago, 2011.

2.2. Estratégias e Parâmetros de Evolução Diferencial

As estratégias da ED variam com o tipo de indivíduo a ser modificado na formação do vetor, com o número de indivíduos considerados para a perturbação e com o tipo de cruzamento a ser utilizado. Podem ser escritas como ED/ α / β / ξ (ROCHA e SARAMAGO, 2011), onde:

- “ α ” especifica o vetor a ser perturbado, podendo ser “**rand**” (vetor da população aleatório) ou “**best**” (vetor de menor custo da população);
- “ β ” determina o número de diferenças ponderadas usadas para a perturbação de “ α ”;
- “ ξ ” denota o tipo de cruzamento, podendo ser “**exp**” (exponencial) ou “**bin**” (binomial).

Estas convenções definem dez estratégias diferentes para a evolução diferencial. São elas:

Tabela 1. Representação das Estratégias de Evolução Diferencial.

Estratégia	Descrição da Estratégia Diferencial	Notação
1	$\mathbf{v}_{t,i} = \mathbf{x}_{\text{best}} + F(\mathbf{x}_{t,r_2} - \mathbf{x}_{t,r_3})$	ED/best/1/exp
2	$\mathbf{v}_{t,i} = \mathbf{x}_{\text{best}} + F(\mathbf{x}_{t,r_2} - \mathbf{x}_{t,r_3})$	ED/rand/1/exp

3	$\mathbf{v}_{t,i} = \mathbf{x}_{old} + F(\mathbf{x}_{best} - \mathbf{x}_{old} + \mathbf{x}_{t,r_3} - \mathbf{x}_{t,r_4})$	ED/rand-to-best/2/exp
4	$\mathbf{v}_{t,i} = \mathbf{x}_{best} + F(\mathbf{x}_{t,r_1} - \mathbf{x}_{t,r_2} + \mathbf{x}_{t,r_3} - \mathbf{x}_{t,r_4})$	ED/best/2/exp
5	$\mathbf{v}_{t,i} = \mathbf{x}_{t,r_1} + F(\mathbf{x}_{t,r_3} - \mathbf{x}_{t,r_2} + \mathbf{x}_{t,r_3} - \mathbf{x}_{t,r_4})$	ED/rand/2/exp
6	$\mathbf{v}_{t,i} = \mathbf{x}_{best} + F(\mathbf{x}_{t,r_2} - \mathbf{x}_{t,r_3})$	ED/best/1/bin
7	$\mathbf{v}_{t,i} = \mathbf{x}_{t,r_1} + F(\mathbf{x}_{t,r_2} - \mathbf{x}_{t,r_3})$	ED/rand/1/bin
8	$\mathbf{v}_{t,i} = \mathbf{x}_{old} + F(\mathbf{x}_{best} - \mathbf{x}_{old} + \mathbf{x}_{t,r_3} - \mathbf{x}_{t,r_4})$	ED/rand-to-best/2/bin
9	$\mathbf{v}_{t,i} = \mathbf{x}_{best} + F(\mathbf{x}_{t,r_1} - \mathbf{x}_{t,r_2} + \mathbf{x}_{t,r_3} - \mathbf{x}_{t,r_4})$	ED/best/2/bin
10	$\mathbf{v}_{t,i} = \mathbf{x}_{t,r_1} + F(\mathbf{x}_{t,r_3} - \mathbf{x}_{t,r_2} + \mathbf{x}_{t,r_3} - \mathbf{x}_{t,r_4})$	ED/rand/2/bin

Fonte: Rocha e Saramago, 2011.

Por conseguinte, analisam-se quais as estratégias e qual algoritmo retorna a melhor solução para o problema. Para a solução deste trabalho, a melhor estratégia a ser utilizada é a “ED/rand/1/bin”, ou seja, a estratégia 7.

A ED é um método estocástico de otimização que utiliza três parâmetros que precisam ser ajustados em seu algoritmo. São eles: tamanho da população (N), fator de mutação (F) e probabilidade de cruzamento (CR). Desde a criação do método, muitas pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de verificar a região de maior adequabilidade destes parâmetros. De acordo com Storn e Price (1997), na maioria das vezes o CR $\in [0,1]$, mas se, entretanto, a convergência não for alcançada, é recomendável utilizar um intervalo entre 0,8 e 1,0. Em diversas aplicações, o tamanho adequado da população é de $N = 10 \cdot D$, sendo que D é a quantidade das variáveis de projeto.

Já o fator de mutação é usualmente definido no intervalo $F \in [0,5,1]$. Além disso, os autores mencionam que, quanto maior for o número da população escolhida, menor deve ser o fator de mutação. Gamperle *et al.* (2002) trabalharam com a escolha dos valores destes parâmetros e afirmaram que bons resultados são obtidos através de tentativas de várias configurações distintas destes parâmetros e que a velocidade de convergência e o comportamento da otimização global depende destas configurações. Os autores ainda sugeriram que o fator de mutação a ser escolhido não seja menor que o estipulado por Storn e Price (1997) para evitar convergência prematura, conduzindo a uma maior probabilidade de fugir de um ótimo local. Os parâmetros de ED a ser utilizados neste trabalho estão apresentados na Tabela 2 respeitando os intervalos recomendados na literatura.

Tabela 2. Parâmetros de Evolução Diferencial.

Parâmetro	Valor
F	0,5
CR	0,8
N	30
iter _{máx}	1000

Fonte: Os Autores, 2016.

O termo iter_{máx} refere-se ao número máximo de iterações para a geração da população.

2.3. Evolução Diferencial Quase-Oposicional

Admitindo $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, com $x_i \in [lb_i, ub_i]$ e $i \in 1, 2, \dots, n$, como sendo um ponto candidato da solução de um problema de otimização no domínio n – dimensional e, além disso, assume-se f como sendo uma função objetivo utilizada para mensurar estes pontos candidatos. De acordo com a definição, um ponto Quase-Oposicional pode ser definido como:

$$X_{QO} = (x_{QO1}, x_{QO2}, \dots, x_{QON}) \text{ com } x_{QOi} = \text{rand} \left[\left(\frac{lb_i - ub_i}{2} \right), (lb_i + ub_i - x_i) \right] \quad (5)$$

Este ponto é considerado o quase-oposto de $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Dessa forma, se $f(X_{QO}) < f(X)$, em um problema de minimização da função objetivo, então o ponto X pode ser substituído por X_{QO} ; caso contrário, o valor de X prepondera. Isso faz com que o ponto candidato, X, e o seu ponto quase-oposto candidato, X_{QO} , seja avaliado simultaneamente, com o intuito de acelerar o processo de convergência para o ponto de ótimo da função objetivo.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM TROCADOR DE CALOR CASCO-TUBO

A taxa de transferência de calor, Q [W], para um trocador de calor casco-tubo pode ser definida de acordo com (CAPUTO *et al.*, 2008):

$$dQ = U \cdot F \cdot dA \cdot \Delta T_{ML} \quad (6)$$

Porém, a determinação exata da área de transferência de calor, A [m^2], tratando-se de projetos de trocadores, é um problema. Para calcular tal área, capaz de promover a troca térmica entre os fluidos em um determinado intervalo de tempo, é necessário integrar a Eq. 7 ao longo da taxa total de transferência de calor do trocador, como:

$$A = \int_0^Q \frac{dQ}{U \cdot F \cdot \Delta T_{ML}} = \frac{Q}{U \cdot F \cdot \Delta T_{ML}} \quad (7)$$

sendo U [$W/m^2 \cdot K$] é o coeficiente global de transferência de calor, F [-] é um fator de correção da diferença de temperatura para tubos não concêntricos e ΔT_{ML} [-] é a média logarítmica das diferenças de temperatura, descrita por:

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{is} - T_{ot}) - (T_{os} - T_{it})}{\ln \left(\frac{T_{is} - T_{ot}}{T_{os} - T_{it}} \right)} \quad (8)$$

sendo T_{is} [K] e T_{it} [K] são as temperaturas do fluido no lado interno do casco e do tubo e T_{os} [K] e T_{it} [K] são as temperaturas do fluido no lado externo do casco e do tubo, respectivamente.

O fator de correção, F , pode ser calculado por meio de uma correlação empírica em função das temperaturas que estão envolvidas no escoamento dos fluidos no trocador de calor, proposto por Fraas (1989).

$$F = \frac{\sqrt{R^2 + 1}}{R - 1} \cdot \frac{\ln \left(\frac{1 - P}{1 - P \cdot R} \right)}{\ln \left(\frac{2 - P \cdot R - P + P \cdot \sqrt{R^2 + 1}}{2 - P \cdot R - P - P \cdot \sqrt{R^2 + 1}} \right)} \quad (9)$$

Sendo que P e R são coeficientes de correção, definidos por meio de:

$$P = \frac{T_{ot} - T_{it}}{T_{is} - T_{it}} \quad (10)$$

$$R = \frac{T_{is} - T_{os}}{T_{ot} - T_{it}} \quad (11)$$

Para um processo em que há transferência de calor sensível no trocador de calor, a taxa de transferência de calor é definida por:

$$Q = \dot{m}_s \cdot c_{ps} \cdot (T_{is} - T_{os}) = \dot{m}_t \cdot c_{pt} \cdot (T_{ot} - T_{it}) \quad (12)$$

em que $\dot{m}_s$ [kg/s] e $\dot{m}_t$ [kg/s] são as vazões mássicas de escoamento do fluido no lado do casco e do tubo e c_{ps} [J/kg · K] e c_{pt} [J/kg · K] são o calor específico do fluido no lado do casco e do tubo, respectivamente.

Em geral, o desenvolvimento do projeto de trocadores de calor casco-tubo depende de uma análise em ambos os lados do equipamento, ou seja, é preciso analisar o casco e o tubo individualmente. Neste trabalho, todas as equações que estão descritas com o subscrito "t" refere-se ao lado do tubo e as que estão com o subscrito "s" são relacionadas com o lado do casco.

O coeficiente global de transferência de calor, U , depende do coeficiente de transferência de calor por convecção, h [$W/m^2 \cdot K$], e da resistência térmica de condução, R_f [$m^2 \cdot K/W$], do casco e do tubo, calculado por:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_s} + R_{fs} + \left(\frac{d_o}{d_i} \right) \cdot \left(R_{ft} + \frac{1}{h_t} \right)} \quad (13)$$

onde d_o [m] e d_i [m] são os diâmetros, externo e interno, do tubo, respectivamente. Dessa forma, neste trabalho $d_i = 0,84 d_o$. É importante ressaltar que d_o é uma das variáveis de projeto deste trabalho e que suas dimensões estão restritas ao intervalo $0,01 \leq d_o \leq 0,032$.

O coeficiente de transferência de calor no casco, h_s [$W/m^2 \cdot K$], proposto por Kern (1950) pode ser calculado por:

$$h_s = 0,36 \cdot \frac{k_s}{d_e} \cdot Re_s^{0,55} \cdot Pr_s^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_{ws}} \right)^{0,14} \quad (14)$$

onde μ_s [Pa · s] e μ_{ws} [Pa · s] são as viscosidades dinâmicas do fluido presente no casco e na parede do mesmo, respectivamente, k_s [$W/m \cdot K$] é a condutividade térmica do material do casco, Pr_s (Eq. 15) e Re_s (Eq. 16) referem-se aos números de Prandtl e Reynolds no lado do casco e d_e [m] é o diâmetro equivalente do casco (Eq. 18).

Os números de Prandtl e Reynolds podem ser calculados, respectivamente, por:

$$Pr_s = \frac{\mu_s \cdot c_{ps}}{k_s} \quad (15)$$

$$Re_s = \frac{\dot{m}_s \cdot d_e}{A_s \cdot \mu_s} \quad (16)$$

sendo A_s [m²] é a área de seção transversal do casco e normal à direção de escoamento do fluido calculada por:

$$A_s = D_s \cdot B \cdot \left(1 - \frac{d_o}{S_t}\right) \quad (17)$$

onde os termos D_s e B são as variáveis de otimização deste trabalho e referem-se, respectivamente, ao diâmetro interno do casco [m] e o espaçamento dos defletores do trocador de calor [m]. Suas restrições de otimização pertencem aos intervalos de $0,15 \leq D_s \leq 1,2$ e $0,2 \leq B \leq 0,45$.

O diâmetro equivalente do casco, d_e , utilizado na Eq. 13, é calculado por:

$$d_e = \frac{4 \cdot \left(0,43 \cdot S_t^2 - 0,5 \cdot \pi \cdot \frac{d_o^2}{4}\right)}{0,5 \cdot \pi \cdot d_o} \quad (18)$$

A Figura 2 ilustra a relação geométrica entre os parâmetros S_t e d_o . Neste trabalho, a relação entre os dois parâmetros equivale a $S_t = 1,25 \cdot d_o$. Já o coeficiente de transferência de calor no tubo, h_t , pode ser calculado a partir das seguintes correlações empíricas:

Se $Re_t < 10000$:

$$h_t = \frac{k_t}{d_i} \cdot \left[\frac{\frac{f_t}{2} \cdot (Re_t - 1000) \cdot Pr_t}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{f_t}{2}} \cdot (Pr_t^{\frac{2}{3}} - 1)} \right] \quad (19)$$

Senão:

$$h_t = 0,027 \cdot \frac{k_t}{d_i} \cdot Re_t^{0,8} \cdot Pr_t^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu_{wt}}\right)^{0,14} \quad (20)$$

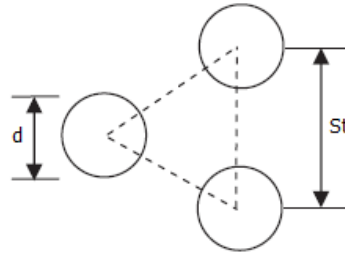


Figura 2. Arranjo Triangular dos Tubos no Trocador de Calor. Fonte: CAPUTO *et al.* (2008).

As equações acima são dependentes do número de Prandtl, Pr_t , Reynolds, Re_t , e do fator de atrito de Darcy, f_t , ambos para o lado dos tubos.

$$Pr_t = \mu_t \cdot c_{pt} \cdot k_t^{-1} \quad (21)$$

$$f_t = (1,82 \cdot \log Re_t - 1,64)^{-2} \quad (22)$$

$$Re_t = \rho_t \cdot V_t \cdot d_i \cdot \mu_t^{-1} \quad (23)$$

onde a velocidade de escoamento do fluido no tubo, V_t , é dado por:

$$V_t = \frac{\dot{m}_t}{\frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \cdot \rho_t} \left(\frac{n}{N_t}\right) \quad (24)$$

sendo que n é o número de passos no tubo (Tabela 3) e N_t o número de tubos, calculado por:

$$N_t = C \cdot \left(\frac{D_s}{d_o}\right)^{n_1} \quad (25)$$

C e n_1 são constantes numéricas definidas na Tabela 3.

Tabela 3. Valores dos Coeficientes C e n_1 .

"n"	C	n_1
1	0,3190	2,142
2	0,2490	2,207
4	0,1750	2,285
6	0,0743	2,499
8	0,0365	2,675

Fonte: Caputo et al. (2008).

Com isso, baseado no cálculo da área total de transferência de calor, A , é possível determinar o comprimento dos tubos do trocador de calor, através de:

$$L = \frac{A}{\pi \cdot d_o \cdot N_t} \quad (26)$$

3.1. Perda de Carga

Nos trocadores de calor casco-tubo, a perda de carga total no lado dos tubos é calculada através da soma da perda de carga distribuída ao longo do comprimento dos tubos com a perda de carga localizada nos cotovelos e bocais, de entrada e saída. Com isso, a perda de carga total no lado dos tubos, ΔP_t , pode ser definida de acordo com:

$$\Delta P_t = \Delta P_{\text{Distribuída}} + \Delta P_{\text{Localizada}} = \frac{\rho_t \cdot V_t^2}{2} \left(\frac{L}{d_i} \cdot f_t + p \right) \cdot n \quad (27)$$

onde p é o coeficiente de perda, que difere de valores de acordo com cada autor. Neste trabalho, adotou-se $p = 4$, como proposto por Kern (1950).

Já a perda de carga total no lado do casco é definida como:

$$\Delta P_s = f_s \cdot \left(\frac{\rho_s \cdot V_s^2}{2} \right) \frac{L}{B} \cdot \frac{D_s}{d_e} \quad (28)$$

sendo que f_s é o fator de atrito no casco, calculado por:

$$f_s = 2 \cdot b_o \cdot Re_s^{-0,15} \quad (29)$$

e $b_o = 0,72$, válido para $Re_s < 40000$, de acordo com Peters e Timmerhaus (1991).

3.2. Função Objetivo

O custo total do trocador de calor, C_{tot} , é a função objetivo deste trabalho. Esse custo inclui o capital de investimento, C_i , o custo de energia, C_e , o custo anual de operação do equipamento, C_o , e o custo total de depreciação operacional, C_{od} (CAPUTO et al., 2008).

$$C_{\text{tot}} = C_i + C_{od} \quad (30)$$

Adotando a correlação de Hall (TAAL et al., 2003), o capital de investimento, C_i , é calculado em função da área total de transferência de calor, A , dado por $C_i = a_1 + a_2 \cdot A^{a_3}$, onde a_1, a_2 e a_3 são constantes relacionadas ao material de fabricação do trocador de calor. Neste trabalho, foi selecionado que os tubos e o casco são de aço inoxidável e, por isso, $a_1 = 8000$, $a_2 = 259,2$ e $a_3 = 0,91$. O custo total de depreciação das operações é calculado através de:

$$C_{od} = \sum_{j=1}^{ny} \frac{C_o}{(1+i)^j} \quad (31)$$

sendo que n_y representa a vida útil do equipamento, em anos. Neste trabalho, adotou-se $n_y = 10$ anos.

O custo de operação, C_o , é definido por:

$$C_o = P_1 \cdot C_e \cdot H \quad (32)$$

sendo $C_e = 0,12 \text{ €/kWh} = 0,00012$, o tempo anual de operação do equipamento, $H = 7000 \text{ h/ano}$ e a taxa de depreciação anual, $i = 10\% = 0,1$.

O termo P_1 representa a potência de bombeamento no trocador de calor, com eficiência de 80%, ou seja, $\eta = 0,8$, e é calculada como:

$$P_1 = \frac{1}{\eta} \left(\frac{\dot{m}_t}{\rho_t} \cdot \Delta P_t + \frac{\dot{m}_s}{\rho_s} \cdot \Delta P_s \right) \quad (33)$$

O problema a ser estudado apresenta algumas características de construção e operação, importantes para o desenvolvimento do trabalho (CAPUTO *et al.*, 2008). Estes dados encontram-se detalhados a seguir.

- Fluido no Casco: Metanol
- Fluido nos Tubos: Água do Mar
- Número de Passe no Casco: 01
- Número de Passes nos Tubos("n"): 02

E para finalizar, as propriedades termofluidodinâmicas dos fluidos que percorrerão o trocador de calor estão mostradas na Tabela 4.

Tabela 4. Propriedades Termofísicas dos Fluidos no Casco e nos Tubos.

	Casco – Metanol	Tubos – Água do Mar
Velocidade do Escoamento [kg/s]	27,80	68,90
T_i (°C)	95	25
T_o (°C)	40	40
ρ (kg/m ³)	750	995
c_p (J/kg. K)	2840	4200
μ (Pa. s)	0,00034	0,00080
μ_w (Pa. s)	0,00038	0,00052
k (W/m. K)	0,19	0,59
R_f (m ² . K/W)	0,00033	0,00020

Fonte: Caputo *et al.* (2008).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo principal deste trabalho é a verificação da eficácia da ED e da EDQO em comparação com outros métodos de otimização, aplicada na solução ótima de um trocador de calor casco-tubo, com dois passes nos tubos e um passe no casco, já analisado anteriormente na literatura por Caputo *et al.* (2008), usando AG, Patel e Rao (2010), com o método PSO, e Mariani *et al.* (2012), através do QPSO e QPSOZ. A Tabela 5 mostra os valores obtidos com a ED e com a EDQO e os compara com as demais abordagens de otimização. Toda a análise dos resultados será feita em relação aos valores de Caputo *et al.* (2008) e comparada com a ED e com a EDQO.

Tabela 5. Projeto Ótimo de Trocadores de Calor Casco-Tubo usando diferentes Métodos de Otimização.

		AG (1)	PSO (2)	QPSO (3)	QPSOZ (4)	ED (5)	EDQO (6)
d_o	[m]	0,0160	0,0150	0,0150	0,0150	0,0100	0,0100
B	[m]	0,5000	0,4240	0,3850	0,3830	0,4500	0,4500
D_s	[m]	0,8300	0,8100	0,8290	0,8290	0,8430	0,8454
N_t	[–]	1.517	1.658	1.745	1.745	4.431	4.459
V_t	[m/s]	0,64	0,67	0,64	0,64	0,56	0,56
Re_t	[–]	10.759	10.503	9.979	9.979	5.895	5.859
f_t	[–]	0,031	0,031	0,032	0,032	0,037	0,037
Pr_t	[–]	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7

d_e	[m]	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,007
Pr_s	[–]	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
Re_s	[–]	11.219	12.709	13.676	13.747	7.671	7.649
h_s	[W/m ² K]	1.716	1.960	2.041	2.046	2.227	2.224
h_t	[W/m ² K]	3.779	3.954	8.389	8.389	7.530	7.482
U	[W/m ² K]	682	724	833	834	850	850
V_s	[m/s]	0,45	0,54	0,58	0,58	0,49	0,49
A	[m ²]	254,6	239,6	208,4	208,2	204,1	204,4
L	[m]	3,340	3,068	2,536	2,533	1,467	1,460
f_s	[–]	0,36	0,35	0,35	0,34	0,38	0,38
ΔP_s	[Pa]	12.943	20.915	22.316	22.623	13.007	12.913
ΔP_t	[Pa]	4.804	5.162	4.168	4.164	3.296	3.249
C_o	[Euro/Ano]	853	1.189	1.171	1.183	746	739
C_{od}	[Euro]	5.241	7.308	7.199	7.271	4.583	4.539
C_i	[Euro]	48.083	45.923	41.408	41.373	40.778	40.822
C_{tot}	[Euro]	53.325	53.231	48.607	48.644	45.361	45.361

Fonte: (1) Caputo *et al.* (2008) – (2) Patel e Rao (2010) – (3) e (4) Mariani *et al.* (2012) – (5) e (6) Os Autores (2016).

De acordo com os valores acima, é possível notar que, ao aplicar a ED, há uma redução em área de transferência de calor de, aproximadamente, 20%, o que fez com que o trocador de calor casco-tubo em análise apresente, também, uma redução no comprimento de seus tubos em 56,1%, mesmo com o aumento significativo no número de tubos e a redução no diâmetro dos mesmos. O capital em investimento no trocador de calor reduziu o correspondente a 15,2% e, por consequência o custo de depreciação do equipamento decresce em, aproximadamente, 12,5%. Já com a EDQO, a redução em área de transferência de calor foi da ordem de 19,7% fazendo com os tubos reduzissem o equivalente a 56,3%, quando comparado com Caputo *et al.* (2008). Além disso, o capital de investimento apresentou 15,1% de redução e o custo de depreciação, 13,4%. De maneira geral, o custo total do trocador de calor apresentou uma redução da ordem de 15%, tanto com ED quanto com EDQO. Uma comparação geral do custo total para este trocador de calor, de acordo com as diversas abordagens de otimização, é apresentada na Figura 3.

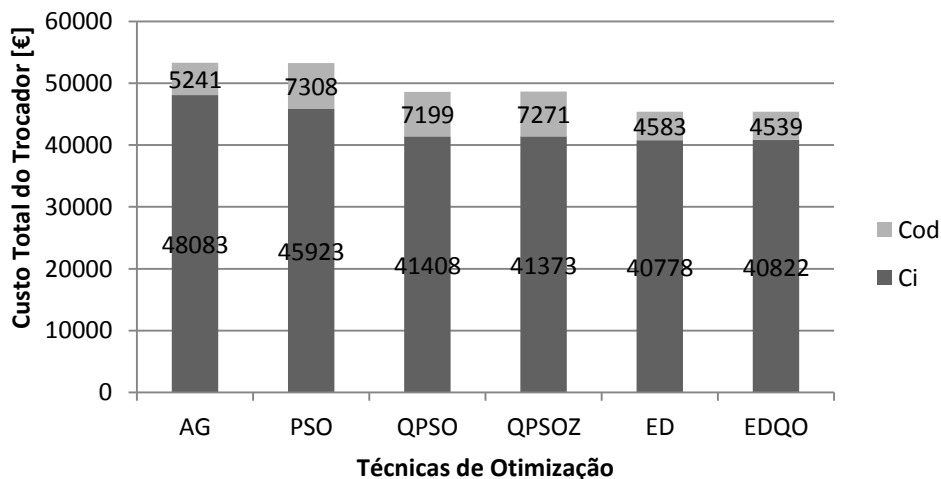


Figura 3 – Gráfico Comparativo do Custo Total para o Trocador de Calor Casco-Tubo. Fonte: Os Autores, 2016.

Além disso, ao avaliar a taxa de convergência das técnicas de otimização utilizadas neste estudo, concluiu-se que, para um número de 30 experimentos cada, a convergência para o valor ótimo da função objetivo com ED deu-se, em média, na 58ª iteração e com EDQO, na 48ª iteração, fazendo com que seja possível verificar dada eficácia da EDQO sob a ED durante processo de convergência.

5. CONCLUSÕES

Um projeto completo de trocadores de calor é uma tarefa um tanto quanto complexa devido às inúmeras variáveis que integram o desenvolvimento de um sistema térmico deste nível. Porém, diversas ferramentas avançadas de otimização podem ser úteis a fim de projetar tal equipamento com o intuito de identificar a melhor e mais barata configuração do trocador de calor para determinada aplicabilidade. Neste trabalho, o método de otimização de Evolução

Diferencial (ED) foi aplicado ao problema de Caputo *et al.* (2008), sendo satisfatório para a concepção de um projeto ótimo de trocadores de calor casco-tubo a partir do ponto de vista econômico. Quando aplicado ao problema em análise e comparado aos resultados apresentados por Caputo *et al.* (2008) usando GA, Patel e Rao (2010) usando PSO e Mariani *et al.* (2012) usando QPSO e QPSOZ, a ED e a EDQO apresentaram os melhores resultados em termos de valores da função objetivo. Em relação à literatura, a redução no custo total deste trocador de calor casco-tubo foi da ordem de 15% em ambas as abordagens. A redução em custos de investimento e custos de depreciação do equipamento foi da ordem de 15,2% e 12,5%, respectivamente, quando utilizada a ED e de 15,1% e 13,4% ao aplicar a EDQO. Após a análise da taxa de convergência das técnicas de otimização utilizadas neste estudo, concluiu-se que a EDQO apresenta um comportamento levemente mais rápido de alcance do valor ótimo da função objetivo quando comparada com a ED.

6. REFERÊNCIAS

- Babu, B. V., Munawar, S. A. **Differential Evolution Strategies for Optimal Design of Shell and Tube Heat Exchangers**. Chemical Engineering and Processing, Vol. 62, Pág. 3720-3739, 2007.
- Caputo, Antonio C., Pelagagge Pacifico M., Salini Paolo. **Heat Exchanger Design based on Economic Optimization**. Applied Thermal Engineering, Italy, Pág. 1151-1159, 2008.
- Gamperle, R., Muller, S.D., Koumoutsakos, P. A. **Parameter Study for Differential Evolution**. WSEAS Int. Conf. on Advances in Intelligent Systems, Fuzzy Systems, Evolutionary Computation, 2002.
- Kern, D. Q. **Process Heat Transfer**. McGraw-Hill, New York, NY, United States of America, 1950.
- Mariani, Viviana C., Duck, Anderson R. K., Guerra, Fabio A., Coelho, Leandro S., Rao, Ravipudi V. **A chaotic quantum-behaved particle swarm approach applied to optimization of Heat exchangers**. Applied Thermal Engineering, Vol. 42, 2012, Pág. 119-128.
- Muralikrishna, K., Shenoy, U. V. **Heat Exchanger Design Targets for Minimum Area and Cost**. Institution of Chemical Engineers, India, Vol. 78, Part. A, 2000.
- Patel, V.K., Rao, R. V. **Design Optimization of Shell-and-Tube Heat Exchanger using Particle Swarm Optimization Technique**. Applied Thermal Engineering, Vol. 30, Pág. 1417-1425, 2010.
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D. **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**. McGraw-Hill, New York, NY, United States of America, 1991.
- Price, K., Storn, R. **Differential Evolution**. Dr. Dobb's Journal, Pág. 18-24, 1997.
- Rocha, N. C., Saramago, S. F. P. **Estudo de Algumas Estratégias de Evolução Diferencial**, Congresso de Matemática Aplicada e Computacional, CMAC Sudeste, 2011.
- Selbas, R., Kizilkan, O., Reppich, M. **A New Design Approach for Shell-and-Tube Heat Exchangers using Genetic Algorithms from Economic Point of View**. Chemical Engineering and Processing, Germany, Vol. 45, Pág. 268-275, 2006.
- Sinnott, R. K., Coulson, J. M., Richardson, J. F. **Chemical Engineering Design**. Vol. 6, Butterworth-Heinemann, Boston, USA, 2005.
- Shah, Ramesh K., Sekulic, Dusan P. **Fundamentals of Heat Exchanger Design**. John Wiley & Sons, 2003.
- Sun, Si-Ying., Lu, Ya-Dong., Yan, Cai-Qiu. **Optimization in Calculation of Shell-Tube Heat Exchanger**. Int. Comm. Heat Mass Transfer, USA, Vol. 20, Pág. 675-685, 1993.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

QUASI-OPPOSITIONAL DIFFERENTIAL EVOLUTION APPLIED IN A OPTIMIZATION OF A SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGER

Leonardo Cavaleiro Martinez, leonardo.cmartinez@live.com¹
 Emerson Hochsteiner de Vasconcelos Segundo, e.hochsteiner@gmail.com²
 Viviana Cocco Mariani, viviana.mariani@pucpr.br²
 Leandro dos Santos Coelho, leandro.coelho@pucpr.br²

¹ Federal University of Paraná – UFPR – Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos, Curitiba – PR, Brazil.

² Pontifical Catholic University of Paraná – PUCPR – R. Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – PR, Brazil.

Abstract. Shell-and-tube heat exchangers are the most common heat exchangers that can be found in several industrial applications. The reduction of the investment cost and the operation of this equipment it's one of main industrial designers. Reducing total costs of a shell-and-tube heat exchangers, as proposed by CAPUTO *et al.* (2008) are employed in this study the optimization techniques called Differential Evolution (DE) and Quasi-Oppositional Differential Evolution (QODE), which basically consists in a calculation mechanism, supported on operators of

“crossing” and “mutation” differential, through mathematical and heuristics arguments that indicate your adequacy for function optimization. This study is defined as a mono-objective optimization problem and the total cost of a shell-and-tube heat exchanger is the objective function. To this, it was taken as a design variable intern diameter tube, the outer diameter of the shell and the spacing between baffles or deflectors. The results reached in this work were compared with the same problem when used GA (Genetic Algorithms), PSO (Particle Swarm Optimization), QPSO (Quantum Particle Swarm Optimization) and QPSOZ (Quantum Particle Swarm Optimization by Zaslavskii). Regarding the literature, the capital investment in the heat exchanger, when applied DE, reduces corresponding in 15.2% and consequently the depreciation charge of the equipment decrease approximately 12.5%. Beside it, when applied QODE, the reduction in investment and depreciation of the equipment was about 15.1% and 13.4%, respectively. In general, the total cost of the shell-and-tube heat exchanger in analysis, both applying DE as QODE, presented a reduction of 15%, showing the potential of applied method in this study.

Key-Words: Optimization, Shell-and-Tube Heat Exchanger, Differential Evolution and Quasi-Oppositional Differential Evolution.