

OTIMIZAÇÃO DE UM TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBOS UTILIZANDO O ALGORITMO LOBO CINZENTO (GWO)

Cleomar Trentin Oliveira, clemartrentin@gmail.com
Jacqueline Biancon Copetti, jcopetti@unisinos.br

Universidade do Vale do Rio do Sinos – UNISINOS, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Av. Unisinos, 950 – Cristo Rei – CEP: 93020-190 - São Leopoldo – RS, Brasil.

Resumo: Neste estudo, desenvolve-se uma nova abordagem de otimização do projeto de um trocador de calor casco e tubos. O algoritmo otimização por lobo cinzento (GWO) foi aplicado para minimizar o custo total do trocador de calor. As variáveis de otimização adotadas foram: número de passes nos tubos (n), diâmetro externo dos tubos (d_o), diâmetro interno do casco (D_s), espaçamento dos defletores (L_{bc}), número de tubos (N_t) e corte dos defletores (B_c). O método Bell-Delaware é usado para calcular o coeficiente de transferência de calor e a queda de pressão do lado do casco. Os resultados são comparados com outros algoritmos de otimização. A redução da área de troca térmica somada às reduções de perda de carga resultam em um custo total 24,61 % menor comparado com o projeto original e redução de 11,74 %, 10,59 %, 8,68 %, 4,30 %, 3,90 % e 3 %, comparado ao Algoritmo Genético (GA), Algoritmo Competitivo Imperialista (ICA), Otimização por Enxame de Partículas (PSO), Colônia de Abelhas Artificial (ABC), Otimização Baseada na Biogeografia (BBO) e Algoritmo de Busca Gravitacional (GSA), respectivamente. Os resultados mostram que o algoritmo GWO pode ser aplicado para otimização do projeto de trocadores de calor casco e tubos obtendo resultados bastante satisfatórios.

Palavras-chave: trocador de calor casco e tubos, otimização, algoritmo lobo cinzento, custo total.

1. INTRODUÇÃO

Os trocadores de calor do tipo casco e tubos são amplamente utilizados para aquecimento e resfriamento, em refinarias de petróleo e processamento químico, dentre outras. Permite a operação em uma ampla faixa de temperaturas e pressões.

Geralmente uma configuração geométrica de referência do equipamento é escolhida e após um valor de queda de pressão permitido é fixado. Então os valores das variáveis de projeto são definidas nas especificações de projeto e na suposição de diversos parâmetros mecânicos e termodinâmicos, afim de obter um coeficiente de transferência de calor satisfatório e que conduza a uma utilização apropriada da superfície de troca térmica.

Segundo Shah e Bell (2000), as definições do projeto são então verificadas com base em procedimentos iterativos envolvendo muitos testes até que um projeto razoável seja obtido, sendo que este deve atender às especificações de projeto como queda de pressão e desempenho de troca térmica. Embora bem comprovado este tipo de abordagem é demorada e não garante uma solução ótima. Considerando a importância funcional e a utilização generalizada de trocadores de calor casco e tubos, seu projeto visando o custo mínimo é considerado um objetivo importante. Em particular a minimização do custo relacionada com a energia é fundamental na visão de conservação de recursos (Jegade e Polley, 1992; Reppich e Zagermann, 1995).

Devido ao papel importante dos trocadores de calor casco e tubos, uma variedade de técnicas foram propostas ao problema de otimização do projeto nos últimos anos.

No entanto, é necessário investigar o potencial de aplicação de técnicas de otimização não tradicionais. O algoritmo otimizador lobo cinzento (GWO, do inglês *Grey Wolf Optimizer*) é uma destas técnicas e o mesmo é investigado neste trabalho para identificar seu desempenho.

2. ALGORITMO OTIMIZADOR POR LOBO CINZENTO (GWO)

O algoritmo GWO proposto por Mirjalili *et al.* (2014) é baseado na hierarquia social de liderança e comportamento de caça dos lobos cinzentos. Este algoritmo é uma técnica nova entre os algoritmos por enxame inteligente de base populacional, é caracterizado por inúmeras vantagens tais como: simplicidade, flexibilidade e evita pontos ótimos locais. Possui fácil implementação, com poucos parâmetros de controle para ajuste. Além disso, possui características de convergência rápida. Devido a sua flexibilidade o mesmo é aplicado a diferentes problemas, sem necessidade de

alterações especiais no algoritmo tendo em vista que assume os problemas como caixas pretas. Além disso, o GWO otimiza problemas estocasticamente e possui habilidades superiores para evitar ótimos locais quando comparado com técnicas de otimização convencionais. Estas qualidades do GWO fazem com que seja um método altamente adequado para resolver problemas de otimização de funções não lineares, multivariados, multimodais, segundo Song *et al.* (2015).

2.1. Hierarquia Social

O modelo matemático de sua hierarquia social segue os seguintes critérios: a solução mais apta é considerada como alfa (α). A segunda e a terceira melhores soluções são respectivamente classificadas como beta (β) e delta (δ). O restante das soluções são assumidas como ômega (ω). No algoritmo GWO a otimização é guiada por α , β e δ . Os lobos ω seguem os três lobos (α , β e δ).

2.2. Cercando a Presa

Outro comportamento social interessante dos lobos cinzentos é chamado de cercar a presa durante a caçada. Para modelar matematicamente este comportamento as seguintes equações são propostas:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (1)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \vec{D} \quad (2)$$

onde t indica a iteração corrente, $\vec{A}$ e $\vec{C}$ são vetores de coeficientes, $\vec{X}_p$ é o vetor posição da presa, e $\vec{X}$ indica o vetor de posição de um lobo e $\vec{D}$ é a distância entre o lobo e a presa. Para o cálculo dos vetores $\vec{A}$ e $\vec{C}$ temos:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (4)$$

onde $\vec{a}$ decresce gradualmente e linearmente de 2 para 0 ao longo das iterações e r_1, r_2 são valores aleatórios no intervalo de $[0,1]$.

2.3. Caçando

Os lobos cinzentos possuem a capacidade de reconhecer a localização da presa e cercá-la. Geralmente a caçada é guiada pelo α . O β e o δ podem também participar na caçada ocasionalmente. Entretanto, em um espaço de busca abstrato não se tem ideia sobre a localização do ótimo (presa). Afim de simular matematicamente o comportamento de caça dos lobos cinzentos, supomos que alfa (melhor solução candidato), beta e delta têm melhor conhecimento sobre a localização potencial da presa. Assim sendo, as primeiras três melhores soluções obtidas até agora são salvas e obriga-se os outros agentes de pesquisa (incluindo os ômegas) a atualizarem suas posições, de acordo com a posição dos melhores agentes de pesquisa. Assim, as seguintes equações são propostas para modelar matematicamente o processo de caça descrito:

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \quad \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \quad \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (5)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1(\vec{D}_\alpha), \quad \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2(\vec{D}_\beta), \quad \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3(\vec{D}_\delta) \quad (6)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (7)$$

2.4. Atacar Presas

Os lobos cinzentos terminam a caça ao atacar a presa quando ela para de se mover. Para modelar matematicamente a aproximação da presa, se diminui o valor de $\vec{a}$. O intervalo de flutuação de $\vec{A}$ é também diminuído por $\vec{a}$. Em outras palavras, $\vec{A}$ é um valor aleatório no intervalo $[-2a, 2a]$ onde $\vec{a}$ é reduzido de 2 para 0 ao longo das iterações. Quando os valores aleatórios de $\vec{A}$ estão em $[-1,1]$, a próxima posição de um agente de busca pode estar em qualquer posição entre a sua posição atual e a posição que se encontra a presa. Quando $|\vec{A}| < 1$ obriga os lobos ao ataque em direção à presa. Com os operadores propostos até o momento, o algoritmo permite aos seus agentes de busca atualizar a sua posição com base na localização do α , β e do δ , e ataquem a presa. Entretanto, o algoritmo é propenso a estagnação em soluções locais com

estes operadores. É verdade que o mecanismo de cerco proposto mostra exploração até certo ponto, mas o GWO necessita de mais operadores para enfatizar a exploração.

2.5. Busca por Presas

Os lobos cinzentos pesquisam principalmente de acordo com a posição alfa, beta e delta. Eles divergem entre si para procurar presas e convergem para atacar a presa. Para modelar matematicamente esta divergência, é utilizado $\vec{A}$ com valores aleatórios maiores que 1 ou menor que -1 para obrigar o agente de busca a divergir da presa. Isso enfatiza a busca fora da vizinhança e permite ao algoritmo procurar globalmente. Quando $|\vec{A}| > 1$ força os lobos cinzentos a divergir da presa para encontrar esperançosamente uma presa mais simples.

Outro componente do algoritmo que favorece a exploração é $\vec{C}$. Como pode ser visto na Eq. (4), o vetor $\vec{C}$ contém valores aleatórios no intervalo de $[0,2]$. Este componente fornece pesos aleatórios para a presa, afim de estocasticamente enfatizar ($C > 1$) ou desenfatar ($C < 1$) o efeito de presa na definição da distância Eq. (1). Isto ajuda o GWO a mostrar um comportamento mais aleatório durante toda a otimização, favorecendo a exploração e evitar pontos ótimos locais.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA PARA O PROJETO DE TROCADORES DE CALOR CASCO E TUBOS

A taxa de calor transferida entre as correntes é dada por:

$$Q = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (8)$$

onde $\dot{m}_h$ e $\dot{m}_c$ são as vazões mássicas do fluido quente e frio, $C_{p,h}$ e $C_{p,c}$ os calores específicos do fluido quente e frio, $T_{h,i}$ e $T_{h,o}$ são as temperaturas do fluido quente na entrada e na saída, e $T_{c,o}$ e $T_{c,i}$ são as temperaturas do fluido frio na saída e na entrada, respectivamente.

A área da superfície de um trocador de calor casco e tubos é determinada por:

$$A = \frac{Q}{U \Delta T_{lm} F} \quad (9)$$

sendo U o coeficiente global de transferência de calor, ΔT_{lm} a diferença de temperatura média logarítmica e F o fator de correção para trocadores de calor multipasses.

O comprimento dos tubos é obtido por:

$$L = \frac{A}{\pi d_o N_t} \quad (10)$$

onde d_o é o diâmetro externo dos tubos e N_t é o número total de tubos.

No lado dos tubos o coeficiente de transferência de calor é calculado através da correlação para o número de Nusselt conforme Gnielinski para o fluxo em regime totalmente desenvolvido.

$$Nu_t = \frac{\left(\frac{f_t}{8}\right)(Re_t - 1000)Pr_t}{1 + 12,7\left(\frac{f_t}{8}\right)^{1/2}\left(Pr_t^{2/3} - 1\right)}, \quad 3000 < Re_t < 5 \times 10^6 \quad (11)$$

onde Re_t é o número de Reynolds, Pr_t é o número de Prandtl e f_t é o fator de atrito. Assim o coeficiente de transferência de calor pode ser encontrado por:

$$Nu_t = \frac{h_t d_i}{k_t} \quad (12)$$

onde h_t é o coeficiente de transferência de calor k_t é a condutividade térmica do fluido, d_i é o diâmetro interno dos tubos.

O fator de atrito de Darcy é utilizado no cálculo da queda de pressão no escoamento no interior dos tubos, sendo para regime transição-turbulento dado pela correlação de Petukov abaixo (Hewitt, 1998).

$$f_t = (1,82 \log_{10} Re_t - 1,64)^{-2}, \quad 3000 < Re_t < 5 \times 10^6 \quad (13)$$

A queda de pressão do lado dos tubos, considerando o retorno, pode ser calculada de acordo com a Eq. (14).

$$\Delta P_t = n \left(f_t \frac{L}{d_i} + 4 \right) \frac{\rho_t v_t^2}{2} \quad (14)$$

onde n é o número de passes nos tubos, ρ_t é a massa específica do fluido no interior do tubo e v_t é a velocidade do fluido no interior do tubo.

No lado do casco se utiliza o método Bell-Delaware para determinar o coeficiente de transferência de calor e queda de pressão devido a sua maior precisão (Sadeghzadeh *et al.*, 2015).

O coeficiente de transferência de calor do lado do casco considerando os fatores de correção é dado por (Shah e Bell, 2000):

$$h_s = h_{id} J_c J_l J_b J_s J_r \quad (15)$$

onde h_{id} é o coeficiente de transferência de calor ideal e os fatores de correção são: J_c devido ao efeitos de configuração dos defletores, J_l devido aos efeitos de vazamento nos defletores, J_b devido aos efeitos de *by-pass* no feixe de tubos, J_s para o espaçamento entre defletores diferente na entrada e/ou saída e J_r para o gradiente de temperatura adverso no fluxo laminar.

A queda de pressão total para o lado do casco é dada por (Shah e Bell, 2000):

$$\Delta P_s = \left[(N_b - 1) \Delta P_{b,id} \zeta_b + N_b \Delta P_{w,id} \zeta_l + 2 \Delta P_{b,id} \left(1 + \frac{N_{r,cw}}{N_{r,cc}} \right) \zeta_b \zeta_s \right] \quad (16)$$

onde N_b é o número de defletores, $\Delta P_{b,id}$ é a queda de pressão referente ao fluxo cruzado ideal entre dois defletores, ζ_b é o fator de correção para efeitos de *by-pass*, $\Delta P_{w,id}$ é a queda de pressão ideal nas janelas dos defletores, ζ_l é o fator de correção para efeitos de vazamento, $N_{r,cw}$ é o número de fileiras reais de fluxo cruzado em cada janela do defletor, $N_{r,cc}$ é o número de fileiras de tubos entre dois cortes do defletor e ζ_s é o fator de correção para seção de entrada e saída com espaçamento dos defletores diferentes dos defletores centrais.

4. FUNÇÃO OBJETIVO

Este artigo considera como função objetivo o custo total (C_{tot}) do trocador de calor casco e tubos. Esta metodologia é abordada por Caputo *et al.* (2008), sendo tradicionalmente empregada na busca do custo mínimo do equipamento. O modelo matemático que descreve a função objetivo é dado por:

$$C_{tot} = C_i + C_{od} \quad (17)$$

onde C_i é o investimento de capital e C_{od} é o custo operacional total descontado (Taal *et al.*, 2003), conforme Eqs. (18) e (19), respectivamente:

$$C_i = a_1 + a_2 A^{a_3} \quad (18)$$

sendo A a área de troca térmica, $a_1 = 8.000$, $a_2 = 259,2$ e $a_3 = 0,91$ para trocadores de calor projetados em aço inoxidável (Taal *et al.*, 2003).

$$C_{od} = \sum_{k=1}^{ny} \frac{C_o}{(1+i)^k} \quad (19)$$

onde ny é o tempo de vida útil do equipamento, C_o é o custo anual de operação, i é a taxa de desconto anual.

O custo anual de operação, C_o , é dado em função da potência de bombeamento, P , do custo da energia, C_e e do tempo de operação anual, H , ou:

$$C_o = P C_e H \quad (20)$$

onde a potência de bombeamento é:

$$P = \frac{1}{\eta} \left(\frac{\dot{m}_t}{\rho_t} \Delta P_t + \frac{\dot{m}_s}{\rho_s} \Delta P_s \right) \quad (21)$$

sendo η a eficiência da bomba, $\dot{m}_t$ e $\dot{m}_s$ são as vazões mássicas do fluido no lado dos tubos e no lado do casco, respectivamente, e ρ_s é a massa específica do fluido no interior do casco.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validar o desempenho do algoritmo GWO no processo de otimização de trocadores de calor casco e tubos foi realizada uma análise de um caso relevante da literatura apresentado por Sinnott *et al.* (2005), afim de ter dados confiáveis, tendo em vista que este equipamento foi investigado por outros métodos de otimização em trabalhos anteriores. Desta forma é possível realizar a abordagem de comparação com outros métodos de otimização aplicados anteriormente. Além disso, este é um equipamento classificado de acordo com norma TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturers Association*) como tipo E, amplamente utilizado em aplicações industriais com um passe no casco e dois passes nos tubos e passo triangular, onde o metanol é usado como fluido quente do lado do casco e água é usado como fluido frio do lado dos tubos. As propriedades físicas e os parâmetros de processo são resumidos na Tab. 1.

Tabela 1. Dados de entrada do processo e propriedades físicas segundo Sinnott *et al.* (2005).

		Lado dos tubos	Lado do casco
Propriedades/Fluidos		Água	Metanol
$\dot{m}$ (kg/s)	Vazão mássica do fluido	68,9	27,8
$T_{h,i}$ (°C)	Temperatura quente de entrada	-	95
$T_{h,o}$ (°C)	Temperatura quente de saída	-	40
$T_{c,i}$ (°C)	Temperatura fria de entrada	25	-
$T_{c,o}$ (°C)	Temperatura fria de saída	40	-
ρ (kg/m ³)	Massa específica do fluido	995	750
C_p (J/kgK)	Calor específico do fluido	4200	2840
μ_t (Pa s)	Viscosidade do fluido	0,00080	0,00034
μ_{wt} (Pa s)	Viscosidade do fluido à temperatura de parede	0,00052	0,00038
k (W/mK)	Condutividade térmica do fluido	0,59	0,19
R_f (m ² K/W)	Fator de incrustação	0,00020	0,00033

É gerado um código em linguagem MATLAB® para descrever o modelo matemático apresentado para o projeto de trocadores de calor e também para a função objetivo. A Tabela 2 mostra as variáveis de otimização adotadas e seus respectivos limites.

Tabela 2. Variáveis de otimização.

Variáveis de otimização		Pode variar em:
n (-)	Número de passes nos tubos	2,4,6,8
d_o (m)	Diâmetro externo dos tubos	0,010 – 0,060
D_s (m)	Diâmetro interno do casco	0,5 – 1,5
L_{bc} (m)	Espaçamento entre os defletores	0,2 – 0,8
N_t (-)	Número de tubos	700 - 3000
B_c (%)	Corte dos defletores segmentados	15 - 45

Estes limites são aplicados ao algoritmo GWO juntamente com os parâmetros de entrada (ajuste) do algoritmo, que são:

- tamanho da população aleatória inicial = 30
- número máximo de iterações = 100.

O parâmetro tamanho da população aleatória inicial definido segundo Mirjalili *et al.* (2014).

É considerado conforme Caputo *et al.* (2008) um tempo de vida útil do equipamento de 10 anos, o custo da energia de 0,12 €/kW/h, o tempo de operação de 7000 h/ano e a taxa de desconto anual de 10%. Além disso, a eficiência da bomba é considerada como 0,7. O Euro (€) é adotado como moeda neste artigo para efeito de comparação com os resultados de trabalhos anteriores.

O critério para que a simulação seja encerrada é definida pelo número máximo de iterações que o algoritmo realizará.

A Figura 1 representa a convergência da minimização do custo total do trocador de calor obtido pela aplicação do algoritmo GWO, ou seja, mostra a evolução da otimização durante o decorrer das iterações. Apesar de ser adotado 100 iterações como critério de parada do programa, pode ser visto nesta figura que a função objetivo convergiu dentro de aproximadamente 40 iterações.

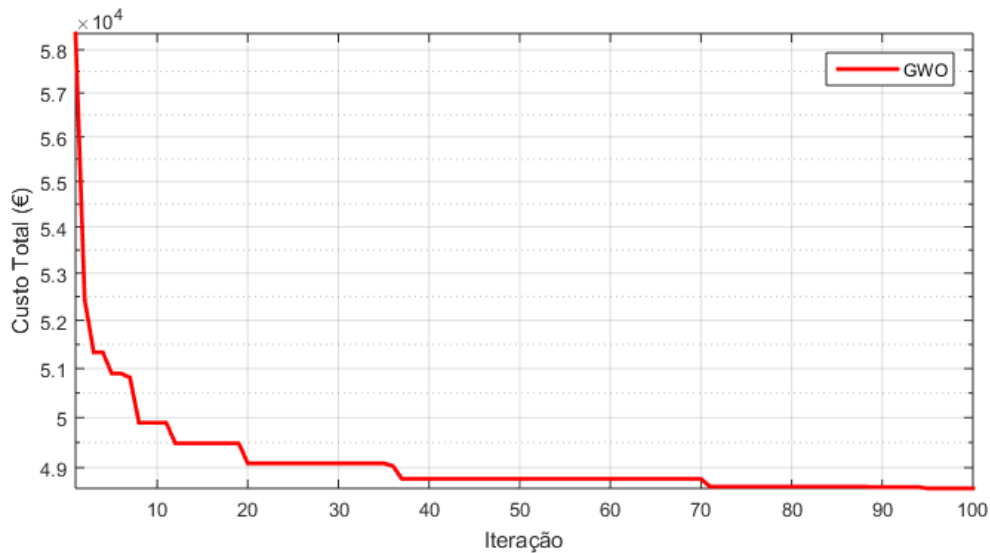


Figura 1. Curva de convergência do algoritmo GWO.

Os resultados da otimização do trocador de calor casco e tubos pela aplicação do algoritmo GWO é comparado com o projeto original e também com outros algoritmos. A Tabela 3 mostra a comparação dos resultados deste trabalho com outros métodos de otimização adotados em outros trabalhos de pesquisa:

- Algoritmo Genético (GA) (Caputo *et al.*, 2008)
- Algoritmo Competitivo Imperialista (ICA) (Hadidi *et al.*, 2013)
- Otimização por Enxame de Partículas (PSO) (Patel e Rao, 2010)
- Colônia Artificial de Abelhas (ABC) (Sahin *et al.*, 2011)
- Otimização Baseado na Biogeografia (BBO) (Hadidi e Nazari, 2013)
- Algoritmo de Busca Gravitacional (GSA) (Mohanty, 2016).

Tabela 3. Comparação de resultados deste estudo com resultados de outros pesquisadores.

	Projeto original Sinnot <i>et al.</i> (2005)	(GA) 2008	(ICA) 2013	(PSO) 2010	(ABC) 2011	(BBO) 2013	(GSA) 2016	Resultados deste estudo
D_s (m)	0,894	0,83	0,879	0,81	1,3905	0,801	0,842	0,6319
L_{bc} (m)	0,356	0,5	0,5	0,424	0,4669	0,5	0,486	0,5488
d_o (m)	0,02	0,016	0,015	0,15	0,0104	0,01	0,015	0,0104
N_t (-)	918	1567	1752	1658	1528	3587	1806	2343
v_t (m/s)	0,75	0,69	0,69	0,67	0,36	0,77	0,678	1,0765
Re_t (-)	14925	10936	10429	10503	-	7643	10118	11194
h_t (W/m ² K)	3812	3762	3864	3721	3818	4314	4029	6269,1
ΔP_t (Pa)	6251	4298	5122	4171	3043	6156	4501	5841,9
v_s (m/s)	0,58	0,44	0,42	0,53	0,118	0,46	0,453	0,4383
Re_s (-)	18381	11075	9917	12678	-	7254	10662	10103
h_s (W/m ² K)	1573	1740	1740	1950,8	3396	2197	2060	2096,1
ΔP_s (Pa)	35789	13267	12367	20551	8390	13799	12458	10221
U (W/m ² K)	615	660	677	713,9	832	755	732,6	795,88
L (m)	4,83	3,379	3,107	3,115	3,963	2,04	2,783	2,836
A (m ²)	278,6	262,8	256,6	243,2	230,109	229,95	236,9	218,205
C_i (€)	51507	49259	48370	46453	44559	44536	45439	42834
C_o (€)	2111	947	975	1038,7	1014,5	984	813,2	940,06
C_{od} (€)	12973	5818	5995	6778,2	6233,8	6046	4673	5776,3
C_{tot} (€)	64480	55077	54366	53231	50793	50582	50112	48610,3

O número de passes nos tubos (n) convergiu para 2 passes e o corte dos defletores (B_c) convergiu para 43 %.

O corte de 25 % dos defletores geralmente é utilizado, pois é um valor médio que atende a grande maioria das situações. No então, o corte dos defletores pode ter de 15 % a 45 % do diâmetro do casco para defletores segmentados simples.

Conforme pode ser visto na Tab. 3, o custo total do trocador de calor teve redução de 24,61% em comparação com o projeto original. Da mesma forma reduções de custo total de 11,74 %, 10,59 %, 8,68 %, 4,30 %, 3,90 % e 3 % em

comparação com GA, ICA, PSO, ABC, BBO e GSA, respectivamente. É importante notar que a redução da área do trocador de calor deve-se à redução do comprimento dos tubos (L) e do aumento do coeficiente global de transferência de calor (U) mesmo considerando um aumento significativo do número de tubos (N_t). Com o aumento da velocidade do lado dos tubos (v_t), o número de Reynolds (Re_t) teve um aumento significativo quando comparado com os algoritmos de otimização. A soma dos efeitos do maior (Re_t) com a redução do diâmetro dos tubos favoreceu o aumento do coeficiente de transferência de calor do lado dos tubos (h_t) na ordem de 64,46 %, 66,64 %, 62,24 %, 68,48 %, 64,2 %, 45,32 % e 55,60 % em comparação com o projeto original, GA, ICA, PSO, ABC, BBO e GSA, respectivamente.

Do lado do casco o coeficiente de transferência de calor (h_s) ficou abaixo dos valores obtidos pelos algoritmos ABC e BBO, porém obteve aumento de 33,25 %, 20,47 %, 20,47 %, 7,45 % e 1,75 % quando comparado ao projeto original, GA, ICA, PSO e GSA, respectivamente. A queda de pressão do lado do casco (ΔP_s) ficou acima do valor obtido pelo algoritmo ABC, entretanto teve redução significativa de 71,44 %, 22,96 %, 17,35 %, 50,27 %, 25,93 % e 17,96 % quando comparado ao projeto original, GA, ICA, PSO, BBO e GSA, respectivamente.

Além disso, o algoritmo GWO obteve a menor área total de transferência de calor (A), consequentemente o investimento de capital, que é calculado em função desta área, obteve o menor valor quando comparado a outros métodos de otimização.

Devido principalmente à redução da queda de pressão do lado do casco o custo operacional total descontado teve uma redução significativa, permanecendo com valor superior apenas quando comparado ao algoritmo GSA.

A Figura 2 mostra uma comparação do custo total (C_{tot}), incluído o investimento de capital (C_i) e o custo operacional total (C_{od}), considerando todos os métodos de otimização anteriormente publicados.

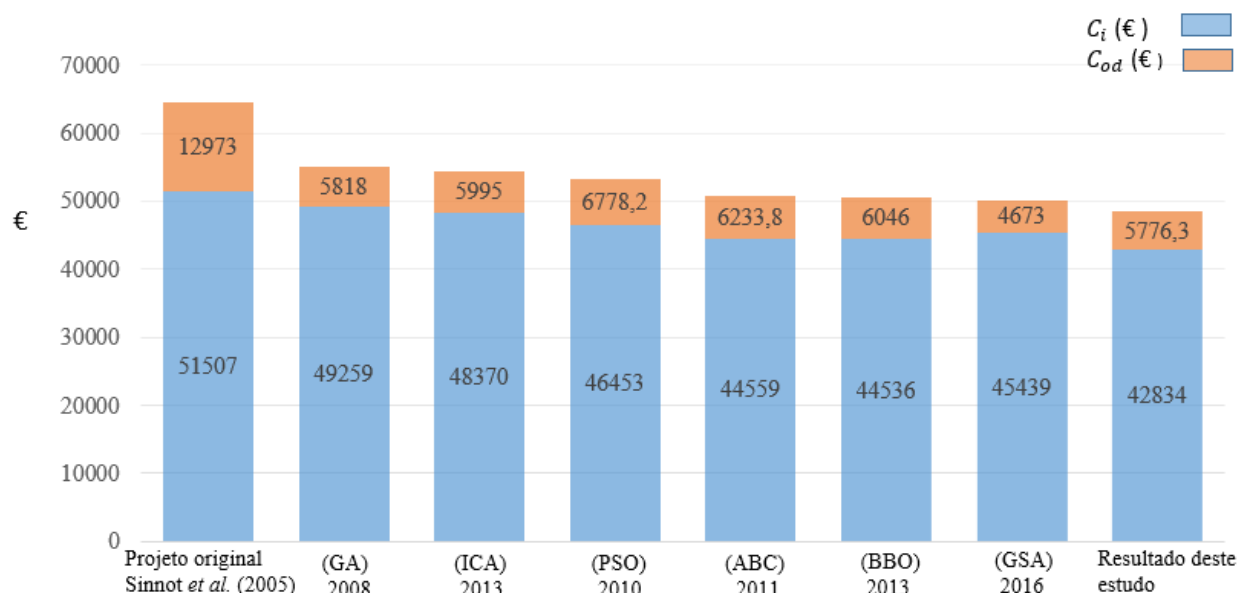


Figura 2. Composição do custo total.

6. CONCLUSÕES

O presente estudo, mostrou a aplicação de uma nova técnica de otimização de um trocador de calor casco e tubos. O modelo matemático utiliza o método Bell-Delaware para o cálculo do coeficiente de transferência de calor e queda de pressão do lado do casco. O algoritmo GWO é simples de ser aplicado e possui poucos parâmetros de controle. Além disso, possui rápida convergência para o valor ótimo da função objetivo, mesmo em problemas complexos com um grande número de variáveis. O algoritmo GWO apresentou melhor desempenho para minimização da função objetivo custo total comparado com outros algoritmos de otimização. Por fim, o algoritmo GWO pode ser facilmente empregado na rotina de projeto para realizar a otimização de outros equipamentos de processo.

7. REFERÊNCIAS

- Caputo, A.C., Pelagagge, P.M., Salini, P., 2008, "Heat exchanger design based on economic optimization". Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 1151-1159.
- Hadidi, A., Nazari, A., 2013, "Design and economic optimization of shell and tube heat exchangers using Biogeography-Based (BBO) algorithm", Applied Thermal Engineering, Vol. 51, pp. 1263-1272.
- Hadidi, A., Hadidi, M., Nazari, A., 2013, "A new design approach for shell and tube heat exchangers using Imperialist Competitive Algorithm (ICA) from economic point of view", Energy Conversion and Management, Vol. 67, pp. 66-74.
- Hewitt, G.F., 1998, "Heat exchanger design handbook", New York: Begell House.

- Jegade, F.O., Polley, G.T., 1992, "Optimum heat exchanger design". Transactions Institution of Chemical Engineers, Vol. 70 (Part A), pp. 133-141.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Lewis, A., 2014, "Grey Wolf Optimizer". Advances in Engineering Software, Vol. 69, pp. 46-61.
- Mohanty, D.K., 2016, "Gravitational Search Algorithm for economic optimization design a shell and tube heat exchanger", Applied Thermal Engineering, Vol. 107, pp. 184-193.
- Patel, V.K., Rao, R.V., 2010, "Design optimization of shell and tube heat exchanger using Particle Swarm Optimization technique", Applied Thermal Engineering, Vol. 30, pp. 1417-1425.
- Reppich, M., Zagermann, S., 1995, "A new design method for segmentally baffled heat exchangers". Computers Chemical Engineering, Vol. 19, pp. 137-142.
- Sadeghzadeh, H., Ehyaei, M.A., Rosen, M.A., 2015, "Techno-economic optimization of a shell and tube heat exchanger by genetic and particle swarm algorithms", Energy Conversion Management, Vol. 93, pp. 84-91.
- Sahin, A.S., Kiliç, B., Kiliç, U., 2011, "Design and economic optimization of shell and tube heat exchanger using Artificial Bee Colony (ABC) algorithm", Energy Conversion and Management, Vol. 52, pp. 3356-3362.
- Sinnott, R.K., Coulson & Richardson's, 2005, "Chemical Engineering Design", Vol. 6, Ed. Butterworth-Heinemann, 1017 p.
- Song, X., Tang, L., Zhao, S., Zhang, X., Li, L., Huang, J., Cai, W., 2015, "Grey Wolf Optimizer for parameter estimation in surface waves". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 75, pp. 147-157.
- Shah, R.K., Bell, K.J., 2000, "Handbook of thermal engineering", Florida: CRC Press.
- Taal, M., Bulatov, I., Klemes, J., Stehlik, P., 2003, "Cost estimation and energy price forecast for economic evaluation of retrofit projects", Applied Thermal Engineering, Vol. 23, pp. 1819-1835.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

OPTIMIZATION OF A SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER USING THE GREY WOLF ALGORITHM (GWO)

Clemar Trentin Oliveira, clemartrentin@gmail.com

Jacqueline Biancon Copetti, jcopetti@unisin.br

Universidade do Vale do Rio do Sinos – UNISINOS, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Av. Unisinos, 950 – Cristo Rei – CEP: 93020-190 - São Leopoldo – RS, Brasil.

Abstract. In this study, a new approach is developed to optimize the design of a shell and tube heat exchanger. The Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm was applied to minimize the total cost of the heat exchanger. The optimization variables adopted were: number of tubes passes (n), tube outside diameter (d_o), shell inside diameter (D_s), baffles spacing (L_{bc}), number of tubes (N_t) and baffle cut (B_c). The Bell-Delaware method is used to calculate the heat transfer coefficient and the pressure drop from the shell side. The results are compared with other optimization algorithms. The reduction of the thermal exchange area added the loss of load reductions results in a total cost 24,61 % lower compared with the original design and reduction of 11,74 %, 10,59 %, 8,68 %, 4,30 %, 3,90 % e 3 %, compared to the Genetic Algorithm (GA), Imperialist Competitive Algorithm (ICA), Particle Swarm Optimization (PSO), Artificial Bee Colony (ABC), Biogeography-Based Optimization (BBO) and Gravitational Search Algorithm (GSA), respectively. The results show that the GWO algorithm can be applied for optimization of the design of shell and tubes heat exchangers getting quite satisfactory results.

Keywords: shell and tube heat exchanger, optimization, grey wolf algorithm, total cost.