

Algoritmos Evolucionários e de Tomada de Decisão Aplicados ao Projeto Térmico e Hidráulico do Trocador de Calor Casco e Tubos

Wagner Saldanha¹, Petr Ekel¹, Cristiana Maia², Gustavo Soares¹

¹Departamento de Engenharia Elétrica
PUC – MG, Belo Horizonte, Brasil
wagnerh.saldanha@yahoo.com.br

²Departamento de Engenharia Mecânica
PUC – MG, Belo Horizonte, Brasil

Resumo—O problema de otimização multiobjetivo do trocador de calor casco e tubos é resolvido com a aplicação de algoritmos evolucionários. O algoritmo Predador Presa e *Non Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II)* foram usados para minimizar as funções objetivo área de transferência de calor e potência de bombeamento. A utilização de Algoritmos Genéticos é direcionada a construção da Fronteira de Pareto. A seleção de decisões racionais desta Fronteira é associada com a aplicação do método *PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)*. Esta é uma nova abordagem para analisar o problema multiobjetivo do trocador de calor casco e tubos e permite gerar soluções com as características preferidas pelo Tomador de Decisão.

Palavras chave—otimização multiobjetivo; algoritmos evolucionários; trocador de calor casco e tubos; Predador Presa; *NSGA II*; *PROMETHEE*.

I. INTRODUÇÃO

Trocadores de calor são equipamentos utilizados em indústrias de processo, em plantas de geração de vapor, em sistemas de refrigeração, em sistemas de aquecimento, em ar condicionado, em indústrias petroquímicas, entre outras aplicações. Existem diferentes modelos de trocadores de calor, tais como Espiral, Placas, Regeneradores, Compactos, Casco e Tubos (Fig. 1). Durante sua concepção é possível obter diferentes configurações, no entanto, é desejável o projeto ótimo, que se inicia a partir da modelagem do mesmo.

A modelagem de um Trocador de Calor Casco e Tubos (TCCT) geralmente é baseada em análise de equações analíticas, correlações gráficas e considerações teóricas. Os cálculos térmicos e de fluxo podem ser realizados por modelos analíticos de Bell Delaware [1] ou de Kern [2]. Adicionalmente, a norma TEMA [3] é a referência para o projeto mecânico e fabricação do Trocador de Calor Casco e Tubos.

Durante a concepção do trocador de calor, após definida as condições de operação, elabora-se a avaliação térmica e hidráulica do equipamento, analisa-se as condições de vibração, para então realizar o projeto mecânico. Existem motivações econômicas para a otimização do TCCT com foco na máxima eficiência e mínimo custo de fabricação, operação e manutenção.

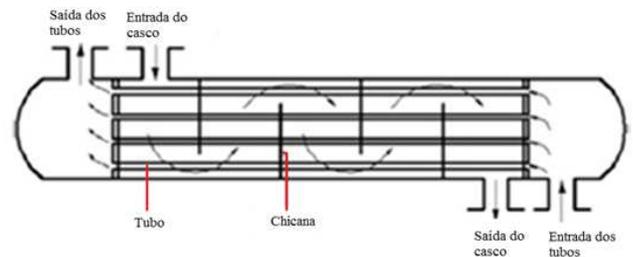


Fig. 1. Trocador de Calor Casco e Tubos

Na literatura é possível encontrar a otimização mono-objetivo do TCCT [4-12]. Assim como casos de otimização multiobjetivo (OMO) [13-18]. Modelar o problema TCCT considerando OMO é particularmente interessante, pois é esperado que o resultado de um conjunto de soluções não dominadas [19] seja de onde o tomador de decisão faça sua escolha final.

A otimização multiobjetivo pode ser realizada através de algoritmos evolucionários (EAs), sendo técnicas de busca inspiradas em sistemas naturais e sociais. Estes algoritmos aplicam regras probabilísticas associadas à recombinação e diversidade sobre um conjunto de soluções candidatas, a fim de melhorar o desempenho das mesmas. Uma revisão sobre o tema pode ser encontrado em [20, 21].

Uma vez disponíveis as soluções não dominadas é possível aplicar métodos de tomada de decisão *a posteriori* com o intuito de se conseguir a solução que corresponde às preferências do decisor. Dentre os métodos para esse fim, destaca-se o *PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)* [22, 23], devido a sua simplicidade, eficácia e diversidade de aplicações encontradas na literatura [24].

Considerando o exposto, este artigo investigou a *minimização da área de troca térmica e da potência de bombeamento do Trocador de Calor Casco e Tubos TEMA E*, do problema formulado em [25]. A solução do problema é baseada na aplicação dos algoritmos evolucionários *NSGA II* [26] e *Predador Presa* [27], e também da metodologia *PROMETHEE*, para seleção da solução final sobre as soluções não dominadas.

O restante do artigo é organizado do seguinte modo: A seção II apresenta os trabalhos relacionados. A seção III realiza uma breve revisão bibliográfica sobre otimização multiobjetivo, *NSGA II*, Predador Presa e *PROMETHEE*. A seção IV discute sobre o experimento e os resultados. Na seção V se tem a conclusão do trabalho.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Ghanei et al. [13] utilizam o método Bell Delaware [1] para estimar o coeficiente de transferência de calor do lado do casco. No trabalho *Multi-Objective Particle Swarm Optimizer* (MOPSO) [28] é aplicado para maximizar a função objetivo eficiência e minimizar a função objetivo de custo total do trocador de calor casco e tubos modelo TEMA E. Ainda os autores comparam os resultados obtidos pelo MOPSO aos encontrados pelo *NSGA-II* [26].

Fettaka et al. [14] utilizam o toolbox *Multiobjective Genetic Algorithm* do *MATLAB* para realizar a otimização multiobjetivo do trocador de calor casco e tubos modelo TEMA E através do algoritmo *NSGA II* [26]. As funções objetivo são a área de transferência de calor e a potência de bombeamento que são minimizadas. A modelagem do Trocador de Calor Casco e Tubos foi realizada pelo método de Bell Delaware [1].

Sanaye e Hajabdollahi [15] realizam a otimização multiobjetivo para maximizar a efetividade e minimizar o custo total (incluindo o valor do investimento e o custo de operação) do trocador de calor casco e tubos. A modelagem térmica do trocador de calor utilizou o método ϵ -*NTU* [25] e o método de Bell Delaware [1] para determinar o coeficiente de transferência de calor do lado do casco e a queda de pressão. O algoritmo evolucionário utilizado foi o *NSGA II* [26].

Guo e Xu [16] realizam através do Genetic Algorithm (GA) [29] a otimização mono e multiobjetivo do trocador de calor Casco e Tubos utilizando a teoria de Entransy [30, 31] na modelagem do trocador de calor. A função objetivo da otimização mono-objetivo é o somatório do número de Entransy Dissipação para condução de calor e do número de Entransy Dissipação causado pela fricção do fluido. Na otimização multiobjetivo cada um desses números Entransy Dissipação são as funções objetivo.

Singh et al. [32] aplicaram uma abordagem de Tomada de Decisão Multiatributo através do método *TOPSIS* (Technique for Order Performance by Similarity to the Ideal Solution) [33] para seleção do modelo mais adequado de trocador de calor com os critérios necessários para a sua aplicação informados por um especialista. Zhou et al. [34] usam um modelo de decisão *Fuzzy* [35, 36] para seleção ótima do trocador de calor compacto.

Conforme os trabalhos discutidos anteriormente, observou-se uma lacuna não tratada que relacionasse as tecnologias de inteligência computacional algoritmos evolucionários, otimização multiobjetivo e tomada de decisão aplicadas ao TCCT. Desta forma, esta abordagem foi à principal motivação para este trabalho.

III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para melhor entendimento do restante do artigo apresenta-se uma breve revisão de otimização multiobjetivo e dos algoritmos evolucionários *NSGA II* e Predador Presa, e do método de Tomada de Decisão *PROMETHEE*.

A. Otimização multiobjetivo

Considerando $\mathbf{x} \in R^n$ o problema de otimização multiobjetivo pode ser formulado do seguinte modo [21]:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } f(\mathbf{x}) &= [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_n(\mathbf{x})] \\ \text{sujeito } g_j(\mathbf{x}) &\geq 0 \quad j=1, 2, \dots, J \end{aligned} \quad (1)$$

A comparação entre vetores dos valores das funções objetivo é essencial na otimização multiobjetivo. Uma solução só é considerada melhor que a outra depois de comparadas as avaliações de todas as funções objetivo do problema. Assim, para melhor entendimento será abordado algumas definições [21, 37].

Definição 1. Seja $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in X$, $\mathbf{x}_1 \neq \mathbf{x}_2$, e o vetor de função objetivo $f(\mathbf{x}): R^{nx} \rightarrow R^{nf}$, o operador de dominância $<$ é:

$$\mathbf{x}_1 < \mathbf{x}_2, \text{ se } f_n(\mathbf{x}_1) \leq f_n(\mathbf{x}_2) \quad \forall n \wedge \exists i : f_i(\mathbf{x}_1) < f_i(\mathbf{x}_2) \quad (2)$$

Pode-se dizer que a partir da definição acima \mathbf{x}_1 domina \mathbf{x}_2 .

Definição 2. A variável $\mathbf{x} \in X \subset R^n$ é não dominada com respeito a X , se não existe outro $\mathbf{x}' \in X$ tal que $f(\mathbf{x}') < f(\mathbf{x})$.

Definição 3. A variável $\mathbf{x}^* \in F \subset R^n$ (F é região viável) é Pareto ótimo se ela é não dominada com respeito a F .

Definição 4. O conjunto Pareto ótimo P^* é:

$$P^* = \{ \mathbf{x} \in F \mid \mathbf{x} \text{ é Pareto ótimo} \} \quad (3)$$

Definição 5. A fronteira de Pareto PF^* é:

$$PF^* = \{ f(\mathbf{x}) \in R^n \mid \mathbf{x} \in P^* \} \quad (4)$$

B. Non Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II)

O *NSGA-II* foi proposto em 2002 por Kalyanmoy Deb et al. no trabalho [26]. Ele tem como modo de busca o algoritmo genético e utiliza o conceito de dominância, que classifica a população total em fronteiras. Os indivíduos localizados na primeira fronteira são as melhores soluções daquela geração e os localizados na última fronteira são as piores soluções. Os dois principais mecanismos no processo de ordenação e seleção do *NSGA-II* são *Fast Non-Dominated Sorting* (separa os indivíduos em fronteiras) e *Crowding Distance* (calcula a distância média entre um ponto central i selecionado dentro da população e dois pontos localizados nas extremidades do ponto central), assim eles possibilitam a introdução do conceito de elitismo [19], pois estes mecanismos classificam as melhores soluções que serão utilizadas nos mecanismos de cruzamento, mutação e reprodução em cada geração.

C. Predador Presa

O algoritmo Predador Presa foi originalmente proposto por Marco Laumanns et al. [38]. Os trabalhos [39-43] incluem modificações dos resultados de [38].

A idéia do algoritmo original é imitar o fenômeno natural em que um predador engole a presa mais fraca, o que significa que um predador elimina a pior presa em sua vizinhança, o que corresponde ao pior valor do objetivo. Para implementar essa idéia, foi proposto uma grade toroidal, em que as presas são inicializadas aleatoriamente em cada nó e um (ou mais) predador por objetivo foi colocado aleatoriamente em nós.

Para a implementação do código utilizado neste artigo a referência foi o artigo proposto Kalyanmoy Deb [27].

D. Preference Ranking Organization Method for Enrichment

Evaluations (PROMETHEE)

O método de Tomada de Decisão *PROMETHEE* seleciona a solução de compromisso a partir de um conjunto de alternativas que são comparadas aos pares de acordo com um conjunto de critérios que podem estar em conflito um com o outro.

Determina-se o índice de preferência para cada par de alternativas, que é dado pela agregação das intensidades de preferências determinadas para todos os critérios, referente ao respectivo par de alternativas. Esta formulação é dada por (5) e (6) [44].

$$P(a, b) = \frac{1}{W} \sum_{l=1}^r w_l \times p_l(a, b) \quad (5)$$

$$W = \sum_{l=1}^r w_l \quad (6)$$

Sendo que a e b são 2 alternativas diferentes, w é o peso do critério l e r é o número de critérios.

Para cada alternativa, os índices preferências são chamados fluxo positivo, Phi^+ , e fluxo negativo, Phi^- . A grandeza $Phi^+(a)$ expressa o quanto uma alternativa a sobreclassifica todas as outras; quanto maior o fluxo positivo de uma alternativa, mais preferencial ela é. A grandeza $Phi^-(a)$ expressa o quanto uma alternativa a é sobreclassificada pelas demais; quanto menor o fluxo negativo de uma alternativa, menos preferencial ela é. Essas grandezas são usadas para estabelecer a pré ordem parcial das alternativas, o que expressa o método *PROMETHEE I*. Os fluxos são determinados pelas seguintes expressões (7) e (8):

$$Phi^+(a) = \sum_{a \neq b} \frac{P(a, b)}{m - 1} \quad (7)$$

$$Phi^-(a) = \sum_{a \neq b} \frac{P(a, b)}{m - 1} \quad (8)$$

Sendo m o número de alternativas.

No *PROMETHEE II* uma pré-ordem completa das alternativas é obtida a partir de uma grandeza denominada fluxo líquido, que pode ser interpretada como uma pontuação atribuída à alternativa de acordo com o seu desempenho. O fluxo líquido é dado por:

$$Phi(a) = Phi^+(a) - Phi^-(a) \quad (9)$$

Uma alternativa a sobreclassifica uma alternativa b se o fluxo líquido de a for maior que o fluxo líquido de b , isto é, $Phi(a) > Phi(b)$, a é indiferente a b se seus fluxos líquidos forem iguais, isto é, $Phi(a) = Phi(b)$. A ordenação das alternativas é feita com base na ordem decrescente de seus respectivos fluxos líquidos.

IV. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

A. Otimização multiobjetivo do Trocador de Calor Casco e Tubos via Algoritmos Evolucionários

A proposta de otimização multiobjetivo do trocador de calor casco e tubos é a minimização simultânea da área de transferência de calor e da potência de bombeamento dos fluidos no

trocador de calor. Minimizar a área de transferência de calor é importante, pois reduz o investimento financeiro na compra do feixe e minimizar a potência de bombeamento possibilita reduzir o custo de operação. De tal forma temos o seguinte problema:

$$Min \quad f_1 = A \quad (10)$$

$$Min \quad f_2 = P_{s,t} \quad (11)$$

A modelagem detalhada, incluindo todos os parâmetros destas equações foi obtida de [25]. Os parâmetros usados neste experimento para modelagem analítica do Trocador de Calor Casco e Tubos são apresentados na Tabela I.

TABELA I. PARÂMETROS PARA DESIGN DO TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBOS

	Lado do tubo	Lado do casco
Fluido	Água do mar	Petróleo
Vazão mássica (kg / s)	18,1	36,3
Temperatura de entrada (°C)	32,2	65,6
Temperatura de saída (°C)	37,42	60,4
Densidade (kg/m ³)	993	849
Capacidade térmica (J / kg K)	4187	2094
Viscosidade (Pa s)	0,000723	0,0646
Condutividade térmica (W/m K)	0,63	0,14
Fator de incrustação (m ² K/W)	0,000176	0,000088
Condutividade térmica da parede do tubo (W/m K)	111	
Número de tiras de vedação	2	

O número de raia divisoras é igual a 0, 1 e 2, para o número de passos dos tubos iguais a 1, 2 e 4, respectivamente.

A especificação das variáveis que serão utilizadas durante a otimização é a seguinte:

- Arranjo dos tubos que pode ter 3 valores discretos, que são: triangular (30°), quadrado rotacionado (45°), e quadrado (90°);

- Número de passos do tubo, pode ter os valores 1, 2 e 4;
- Diâmetro externo do tubo (d_o) pode ter 7 valores discretos, que são: 0,01588 m; 0,01905 m; 0,0254 m; 0,03175 m; 0,0381 m; 0,0508 m;

- Espaçamento entre as chicanas de entrada, centro e saída, que variam de 0,0508 m a $29,5d_o^{0,75}$, a variável d_o deve ser utilizada com a unidade de medida em metros;

- Corte das chicanas pode variar de 15% a 45%;
- Folga nos furos das chicanas pode variar de 0,01 d_o a 0,1 d_o ;

- Folga entre o casco e o feixe tubular pode ter os valores entre 0,0032 m a 0,011 m;

- Comprimento dos tubos pode adotar 10 valores discretos, que são: 2,438 m; 3,048 m; 3,658 m; 4,877 m; 6,096 m; 7,32 m; 8,53 m; 9,75 m; 10,7 m; 11,58 m;

- Espessura da parede dos tubos, que pode ter os valores: 0,004572 m; 0,004191 m; 0,003759 m; 0,003404 m; 0,003048 m; 0,002769 m; 0,002413 m; 0,002108 m.

Para realização da otimização multiobjetivo os algoritmos Predador Presa e *NSGA II* foram implementados no *software MATLAB*. A Fig. 2 apresenta o resultado para o algoritmo Predador Presa e a Fig. 3 apresenta o resultado para o algoritmo *NSGA II*.

Os parâmetros utilizados no algoritmo Predador Presa foram: população de tamanho 100, número de interações igual a

50, 10 predadores.

Os parâmetros utilizados no algoritmo *NSGA II* foram: população de tamanho 100, número de interações igual a 50, razão de crossover igual a 0,8 e razão de mutação igual a 0,3.

Foram consideradas três restrições que envolvem os valores limites de queda de pressão lado do casco, de queda de pressão lado do tubo, e valor de área máxima do Trocador de Calor. A formulação foi à mesma considerada em [14]. São elas:

$$\begin{aligned} g_1(x) &= \Delta P_{ct} - \Delta P_t \geq 0 \\ g_2(x) &= \Delta P_{cs} - \Delta P_s \geq 0 \\ g_3(x) &= \Delta A_{\max} - A \geq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Se $\Delta P_t > \Delta P_{ct}$ ou $\Delta P_s > \Delta P_{cs}$ ou $A > A_{\max}$, o problema pode ser apresentado da seguinte maneira:

$$\text{Min } f_1 = A + 10^9 \times |g_3(x)| \quad (13)$$

$$\text{Min } f_2 = P_{s,t} + 10^9 \times (|g_1(x)| + |g_2(x)|) \quad (14)$$

O limite de queda de pressão admitida para o lado do tubo (ΔP_{ct}) e para o lado do casco (ΔP_{cs}) foi 7×10^4 Pa, e o valor da área máxima permitida (A_{\max}) foi 60 m^2 .

Deve-se ressaltar que este trabalho apesar de utilizar dois algoritmos diferentes não possui o objetivo de realizar a comparação entre os mesmos através de métricas estatísticas. A intenção é possibilitar uma comparação visual entre os mesmos, pois para a tomada de decisão foi escolhido os resultados obtidos no algoritmo Predador Presa devido a quantidade de pontos não dominados ser menor que a do *NSGA-II*, o que facilitou gerar o exemplo com o método *PROMETHEE*. O algoritmo *NSGA-II* encontrou 60 pontos não dominados, enquanto o Predador Presa encontrou 43 pontos não dominados como aproximação da Fronteira de Pareto.

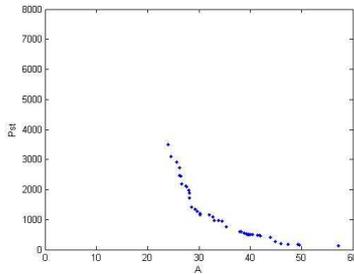


Fig. 2. Resultado da otimização multiobjetivo pelo algoritmo Predador Presa

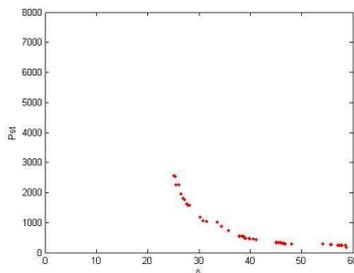


Fig. 3. Resultado da otimização multiobjetivo pelo algoritmo *NSGA II*

B. Aplicação do *PROMETHEE* ao projeto do Trocador de Calor Casco e Tubos

A partir dos valores encontrados na otimização multiobjetivo do Trocador de Calor Casco e Tubos foi aplicado o Método de Otimização através do *software Visual PROMETHEE Academic*. Os seguintes critérios foram estabelecidos:

- Diâmetro externo do tubo: conforme a TEMA [3] o maior diâmetro externo do tubo é favorável por oferecer maior momento de inércia e conforme [45] quanto maior o diâmetro melhor será a prevenção dos tubos a sedimentação de depósitos e incrustações. Os valores encontrados durante a otimização foram 0,01588 m e 0,01905 m. Foi definido na escala qualitativa *sim/não* o valor de preferência *sim* para o diâmetro de 0,01905 m e *não* para o de 0,01588 m;

- Comprimento do tubo: foi dada preferência ao menor comprimento de tubo, pois reduz o custo na compra de material e é favorável durante a manutenção, pois facilita a movimentação dos feixes de tubos com máquinas de carga. Os valores encontrados durante a otimização foram 2,438 m; 3,048 m; 3,658 m; 4,877 m; 6,096 m, foi usada a escala qualitativa de 5 pontos, onde o menor valor de comprimento foi atribuído o valor 5 (muito bom) e ao maior valor foi atribuído valor 1 (muito ruim);

- Corte das chicanas: foi definido que os valores entre 20 a 30% teriam preferência *sim* na escala qualitativa *sim/não*, a referência para esta escolha foram às informações obtidas em [46];

- Espaçamento entre as chicanas: a preferência foi pelo menor valor de espaçamento, pois quanto menor o espaçamento entre chicanas, o valor da frequência natural do tubo aumenta mais que o valor da frequência forçada, o que possibilita uma segurança contra falhas de vibração induzida [45];

- Formato do Trocador: os formatos encontrados durante a otimização foram o triangular (30°) e o quadrado rotacionado (45°). Foi definido que o formato quadrado rotacionado (45°) teria preferência *sim* na escala qualitativa *sim/não*, pois este formato é favorável para melhor qualidade de limpeza que é necessária no momento em o trocador diminui significativamente de eficiência [46];

- Diâmetro do casco: foi definida a preferência pelo menor valor, pois significa que menor quantidade de material será usada na fabricação, o que reduz o custo;

- Velocidade do fluido no interior do tubo: a partir da referência [45] estabeleceram-se os valores de velocidade entre 1 a 2 m/s teriam preferência *sim* na escala qualitativa *sim/não*, pois esta faixa de velocidade ajuda a prevenir a sedimentação de depósitos e incrustações proveniente do escoamento da água nos tubos;

- Razão entre o comprimento dos tubos e o diâmetro do casco: conforme [46] é usual que esta relação seja entre 5 a 10. Assim, definiu-se a preferência *sim* na escala qualitativa *sim/não* para os valores obtidos a partir da otimização que estavam nessa faixa;

- Custo anual: escolheu-se a preferência pelo custo anual mínimo. Esse custo pode ser apresentado, levando em consideração as recomendações de [47] da seguinte maneira:

$$\text{Custo anual} = \text{Custo operação} + \text{Custo capital} \quad (15)$$

onde:

$$\text{Custo operação} = TP \times ec \times P_{s,t} \quad (16)$$

e:

$$\text{Custo capital} = d \times A^f \times \left[\frac{i_r \times (1 + i_r)^{TL}}{(1 + i_r)^{TL} - 1} \right] \quad (17)$$

Considerou-se o número de horas de operação por ano (TP) igual a 8232, o custo da energia (ec) é $\$0,1\text{kW}^{-1}\text{h}^{-1}$, a taxa de retorno anual (i_r) igual 0,05; o tempo de vida esperada para o trocador (TL) igual a 20 anos, d e f são constantes de custo para material do Trocador de Calor em aço carbono com respectivos valores iguais a 2694 e 0,551.

A Fig. 4 mostra os resultados dos fluxos obtidos pelo método *PROMETHEE*. Os valores das variáveis que constituem a solução de compromisso do Trocador de Calor Casco e Tubos são apresentados na Tabela II. Desse modo, a área de troca térmica é $27,62 \text{ m}^2$ e a Potência de bombeamento é $2101,9 \text{ W}$.

TABELA II. VALORES DAS VARIÁVEIS DO TROCADOR CASCO E TUBOS OBTIDOS PELA TOMADA DE DECISÃO

Variáveis	Valores
Arranjo dos tubos	quadrado (45°)
Número de passos do tubo	1
Comprimento do tubo (m)	3,048
Espessura da parede dos tubos (m)	0,002413
Diâmetro externo do tubo (m)	0,01588
Espaçamento entre as chicanas (m)	0,5119
Corte das chicanas	24,11%
Folga nos furos das chicanas (m)	0,00025
Folga entre o casco e o feixe tubular (m)	0,00585

V. CONCLUSÃO

O problema da escolha das variáveis do trocador de calor e tubos foi resolvido com base na abordagem multiobjetivo. A maior contribuição desse trabalho está associada com a aplicação de um método de tomada de decisão a partir da Fronteira de Pareto gerada por algoritmos evolucionários. A aplicação desta abordagem permite encontrar soluções Pareto ótimas no projeto térmico e hidráulico do trocador de calor casco e tubos e escolher a que possui as características técnicas e econômicas que da melhor maneira correspondem às preferências do Tomador de Decisão.

O algoritmo Predador Presa neste estudo de caso facilitou a implementação do método de tomada de decisão, pois gerou menor número de soluções não dominadas quando comparado ao *NSGA II*, e as soluções obtidas foram adequadas em termos de diversidade para que fosse possível uma tomada de decisão com alternativas de diferentes características. A efetivação do uso deste algoritmo também foi uma contribuição, pois ao se realizar uma revisão bibliográfica na literatura percebe-se que este algoritmo foi usado pela primeira vez para otimização multiobjetivo do problema TCCT.

Como sugestão de trabalhos futuros pode-se comparar diferentes algoritmos evolucionários através de métricas estatísticas e usar os resultados do melhor algoritmo avaliado na

tomada de decisão multiatributo. Também é possível que sejam comparadas diferentes abordagens de tomada de decisão *a posteriori* aplicadas ao projeto do trocador de calor casco e tubos.

PROMETHEE Flow Table					
Rank	action		Phi	Phi+	Phi-
1	action10		0,3289	0,5244	0,1955
2	action9		0,2404	0,4697	0,2294
3	action18		0,2346	0,4525	0,2179
4	action 21		0,2203	0,4741	0,2539
5	action 34		0,2081	0,3721	0,1640
6	action 42		0,1747	0,3990	0,2243
7	action 25		0,1729	0,4295	0,2566
8	action 26		0,1297	0,3903	0,2606
9	action16		0,1122	0,3853	0,2731
10	action19		0,1071	0,3595	0,2524
11	action 20		0,0950	0,3487	0,2537
12	action 24		0,0914	0,3789	0,2875
13	action8		0,0854	0,3590	0,2735
14	action11		0,0736	0,3535	0,2799
15	action7		0,0649	0,3625	0,2976
16	action 31		0,0643	0,3167	0,2524
17	action12		0,0625	0,3475	0,2849
18	action13		0,0607	0,3804	0,3197
19	action1		0,0592	0,3159	0,2567
20	action6		0,0559	0,3149	0,2590
21	action5		0,0429	0,3120	0,2690
22	action14		0,0426	0,3555	0,3130

Fig. 4. Resultado da tomada de decisão

REFERÊNCIAS

- [1] K. J. Bell, "Final report of the co-operative research program of shell and tube heat exchangers", University of Delaware, Wilmington, DE, EUA, Rep. 5, 1963.
- [2] D. Q. Kern, "Process Heat Transfer", New York, USA: McGraw-Hill, 1950.
- [3] TEMA, Standards of the tubular exchanger manufacturers association, 9th. Tubular Exchanger Manufacturers Association, New York; 2007.
- [4] R. Selbas, O. Kizilkan, M. Reppich, "A new design approach for shell-and-tube heat exchangers using genetic algorithms from economic point of view", *Chemical Engineering Processing*, vol. 45, pp. 268–275, October, 2005.
- [5] A. C. Caputo, P. M. Pelagagge, P. Salini, "Heat exchanger design based on economic optimization", *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 1151-1159, September, 2007.
- [6] A. Hadidi, M. Hadidi, A. Nazari, "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, December, 2012.
- [7] A. V. Azad, M. Amidpour, "Economic optimization of shell and tube heat exchanger based on constructal theory", *Energy*, vol. 36, pp. 1087-1096, January, 2011.
- [8] V. C. Mariani, A. R.K. Duck, F. A. Guerra, L.S. Coelho, and R. V. Rao, "A chaotic quantum-behaved particle swarm approach applied to optimization of heat exchangers," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 42, pp. 119–128, 2012.
- [9] P. D. Chaudhuri, U. M. Diwekar, J. S. Logsdon, "An automated approach for the optimal design of heat exchangers", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 36, no. 9, pp. 3685-3693, August, 1997.

- [10] M. C. Tayal, Y. Fu, U. M. Diwekar, "Optimal design of heat exchangers: a genetic algorithm framework", *Industrial Engineering Chemical Research*, vol. 38, no. 2, pp. 456-467, December, 1998.
- [11] S. Rajasekaran, T. Kannadasan, "Optimization of shell and tube heat exchangers using modified genetic algorithm", *International Journal of Control and Automation*, vol. 3, no. 4, pp. 1-10, December, 2010.
- [12] J. Yang, A. Fan, W. Liu, A. M. Jacobi, "Optimization of shell-and-tube heat exchangers conforming to TEMA standards with designs motivated by constructal theory," *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 468-476, 2014.
- [13] A. Ghanei, E. Assareh, M. Biglari, A. Ghanbarzadeh, A. R. Noghrehabadi, "Thermal-economic multi-objective optimization of shell and tube heat exchanger using particle swarm optimization (PSO)," *Heat Mass Transf.*, pp. 1375-1384, 2014.
- [14] S. Fettaka, J. Thibault, Y. Gupta, "Design of shell-and-tube heat exchangers using multiobjective optimization", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 60, pp. 343-354, February, 2013.
- [15] S. Sanaye, H. Hajabdollahi, "Multi-objective optimization of shell and tube heat exchangers", *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp.1937-1945, April, 2010.
- [16] J. F. Guo, M. Xu, "The application of entransy dissipation theory in optimization design of heat exchanger", *Applied Thermal Engineering*, vol. 36, pp. 227-235, December, 2011.
- [17] R. V. Rao, V. Patel, "Multi-objective optimization of heat exchangers using a modified teaching-learning-based optimization algorithm," *Appl. Math. Model.*, vol. 37, no. 3, pp. 1147-1162, 2013.
- [18] A. Agarwal, S.K. Gupta, "Jumping gene adaptations of NSGA-II and their use in multi-objective optimal design of shell and tube heat exchangers", *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 86, pp. 123-139, November, 2007.
- [19] K. Deb, "Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms", John Wiley & Sons Ltd., 2001.
- [20] A. Zhou, B.-Y. Qu, H. Li, S.-Z. Zhao, P. N. Suganthan, Q. Zhang, "Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art," *Swarm Evol. Comput.*, vol. 1, no. 1, pp. 32-49, 2011.
- [21] C. A. C. Coello, "Research directions in evolutionary multi-objective optimization", vol. 3, no. 3, pp. 110-121, August, 2012.
- [22] J. P. Brans, "L'ingénierie de la décision: l'élaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE." in *L'aide à la décision: Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir*, Québec, Canada, 1982, pp. 183-213.
- [23] J. P. Brans, P. Vincke. "A preference ranking organization method: The PROMETHEE method for MCDM", *Management Science*, vol. 31, no. 6, pp. 647-656, June, 1985.
- [24] M. Behzadian, R. B. Kazemzadeh, A. Albadvi, M. Aghdasi, "PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 200, no. 1, pp. 198-215, 2010.
- [25] R. K. Shah, D. P. Sekulic, "Fundamentals of heat exchanger design", New Jersey, USA: Wiley, 2003.
- [26] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, "A fast elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April, 2002.
- [27] K. Deb, B. R. N. Uday, "Investigating Predator-Prey algorithms for multi-objective optimization", KanGAL, Kanpur, Indian, Rep. 2005010, Dec. 2005.
- [28] C. A. C. Coello, G. T. Pulido, M. S. Lechuga, "Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 3, pp. 256-279, June, 2004.
- [29] C. R. Houck, J. A. Joines, M. G. Kay, "A Genetic Algorithm for function optimization: a MatLab implementation", North Carolina State University, Raleigh, NC, EUA, Rep. NCSU-IE-TR-95-09, 1995.
- [30] M. T. Xu, L. Cheng, J. F. Guo, "An application of entransy dissipation theory to heat exchanger design", *Journal of Engineering Thermophysics*, vol. 30, pp. 2090-2092, 2009.
- [31] J. F. Guo, L. Cheng, M. T. Xu, "Entransy dissipation number and its application to heat exchanger performance evaluation", *Chinese Science Bulletin*, vol. 54, pp. 2708-2713, 2009.
- [32] D. P. Singh, A. Chaudhary, V. Maan, "Selection of heat exchanger for heat operation by multiple attribute decision making (MADM) approach," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 2, no. 10, pp. 3072-3080, 2013.
- [33] C. L. Hwang, K. Yoon, "Multiple attribute decision making: methods and applications - a state-of-the-art survey", New York, Springer-Verlag, 1981.
- [34] G. Y. Zhou, E. Wu, S. T. Tu, "Optimum selection of compact heat exchangers using non-structural fuzzy decision method," *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1801-1809, 2014.
- [35] C. M. Tam, T. K. L. Tong, G. C. W. Chiu, I. W. H. Fung, "Comparing non-structural fuzzy decision support system and analytical hierarchy process in decision-making for construction problems", *Euro j. Oper. Res.*, vol. 174, no. 2, pp. 1317-1324, 2006.
- [36] S. Y. Chen, "Non-structured decision making analysis and fuzzy optimum seeking theory for multi-objective systems", *J. Fuzzy Math.*, vol. 4, no. 2, pp. 835-842, 1996.
- [37] G. L. Soares, "Algoritmos determinísticos e evolucionário intervalares para otimização robusta multi-objetivo," Ph.D. dissertation, Universidade Federal de Minas Gerais and École Nationale Supérieure d'Ingénieurs and Université de Bretagne Occidentale, 2008.
- [38] M. Laumanns, G. Rudolph, H. P. Schwefel, "A spatial predator-prey approach to multi-objective optimization: A preliminary study", *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature*, vol. 5, pp. 241-249, 1998.
- [39] S. Chowdhury, G. S. Dulikravich, "Improvements to single-objective constrained predator-prey evolutionary optimization algorithm", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 41, pp. 541-554, September, 2009.
- [40] S. Chowdhury, G. S. Dulikravich, R. J. Moral, "Modified predator-prey (MPP) algorithm for constrained multi-objective optimization" in *Burczynski T EUROGEN 2009*, Cracow, Poland, 2009, pp. 1-6.
- [41] S. Chowdhury, G. S. Dulikravich, R. J. Moral, "Modified predator-prey algorithm for constrained and unconstrained multi-objective optimization problems", *Int. J. Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, vol. 1, no. 1, pp. 1-38, 2009.
- [42] S. Chowdhury, R.J. Moral and G.S. Dulikravich, "Predator-prey evolutionary multi-objective optimization algorithm: performance and improvements" in *7th ASMO-UK/ISSMO International Conference on Eng. Design Optimization*, Bath, UK, 2008, pp. 1-10.
- [43] X. Li, "Real-Coded Predator-Prey Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization", *Lecture Notes in Computer Science*, vol.2632, pp. 69-84, 2003.
- [44] V. B. S. Silva, F. Schramm, H. R. C. Carvalho, "O uso do método PROMETHEE para seleção de candidatos à bolsa-formação do Pronatec", *Production*, vol.24, pp. 548-558, 2014.
- [45] R. Mukherjee, "Practical thermal design of shell-and-tube heat exchangers", Begell House, New Delphi, 2004.
- [46] R. Smith, "Chemical process design and integration", Wiley, New York, 2005.
- [47] M. Fesanghary, E. Damangir, I. Soleimani, "Design optimization of shell and tube heat exchangers using global sensitivity analysis and harmony search algorithm", *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 1026-1031, May, 2008.