

Design termo-hidráulico de um permutador de calor de carcaça e tubos para arrefecimento por ácido acrílico.

Design termo-hidráulico de um tubo e permutador de calor de carcaça para arrefecimento de ácido acrílico.

Amaury Pérez Sánchez ¹ *; Laura Thalía Álvarez Lores ²; Laura de la Caridad Arias Águila ³; Lizthalia Jiménez Guerra ⁴

Recebido: 06/03/2025 – Aceite: 29/08/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artigos de Investigação ☒ Artigos de Revisão ☐ Artigos de Ensaio ☐

* Autor correspondente.



Esta obra está licenciada sob a licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-PartilharIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Os autores mant m os direitos sobre os seus artigos e são livres de partilhar, copiar, distribuir, apresentar e comunicar publicamente a obra, desde que seja dada a atribuição adequada, o uso seja não comercial e quaisquer obras derivadas estejam licenciadas sob os mesmos termos.

Resumo.

Os permutadores de calor de casca e tubos (STHE), nas suas várias manifestações, são, sem d vida, os equipamentos de transferência de calor mais amplamente e mais utilizados nas indústrias de processamento químico. O objetivo do presente trabalho   conceber, do ponto de vista termo-hidráulico, um STHE 1-2 para arrefecer 50.000 kg/h de um fluxo de ácido acrílico entre 97 e 40  C usando água como refrigerante a uma temperatura de entrada de 25  C. O STHE proposto apresentar  uma área de transferência de calor de 284,29 m², um coeficiente global de transferência de calor de 364,26 W/m². K, vários tubos de 702, um diâmetro de feixe de 975,62 mm e um diâmetro de projéteis de 1.047,62 mm. O tipo selecionado de STHE é a cabeça flutuante de anel dividido, a carga térmica tem um valor de 1.733,59 kW, serão necessários 20,74 kg/s (74.664 kg/h) de água de arrefecimento para realizar o serviço de transferência de calor, enquanto os valores da queda de pressão tanto da  gua (402,54 Pa) como do ácido acrílico (2.479,27 Pa) estão abaixo dos limites máximos permitidos pelo processo de troca térmica, que são 1.000 Pa e 3.000 Pa para a água e o ácido acrílico, respetivamente. O STHE projetado ter  um custo de compra de USD \$101.209.

Palavras-chave.

Design; Permutador de Calor de Carcaça e Tubo;  rea; Queda de Pressão, Custo de Compra.

Resumen.

Los intercambiadores de calor de tubo y coraza (ICTC) en sus varias manifestaciones son indudablemente los equipos de transferencia de calor más ampliamente y comúnmente usados en las industrias de procesamiento químico. El objetivo del presente trabajo es diseñar, desde el punto de vista térmico-hidráulico, un ICTC 1-2 para enfriar 50 000 kg/h de una corriente de ácido acrílico desde 97 hasta 40  C usando agua como refrigerante a una temperatura de entrada de 25  C. El ICTC propuesto presentar  una área de transferencia de calor de 284,29 m², un coeficiente global de transferencia de calor de 364,26 W/m².K, un número de tubos 702, un di metro del haz de 975,62 mm, y un di metro de la coraza de 1 047,62 mm. El tipo de ICTC seleccionado es de cabezal flotante de anillo hendido, la carga de calor tiene un valor de 1 733,59, se requerirán 20,74 kg/s (74 664 kg/h) de agua de enfriamiento para llevar a cabo el servicio de transferencia de calor, mientras que los valores de la ca da de presión de tanto el agua (402,54 Pa) como el ácido acrílico (2 479,27 Pa) est n por debajo de los límites máximos permisibles fijados por el proceso de intercambio de calor, los cuales son 1 000 Pa y 3 000 Pa para el agua y el ácido acrílico, respectivamente. El ICTC diseñado tendrá un costo de adquisición de USD \$ 101 209.

Palabras clave.

Dise o; Intercambiador de Calor de Tubo y Coraza;  rea; Ca da de Presi n; Costo de Adquisición.

1.- Introdução

A transferência de calor é o campo que se foca basicamente na taxa de troca de calor entre objetos quentes e frios, designados como fonte e recetor, respetivamente. Os dispositivos usados para facilitar esta transferência de calor são conhecidos como permutadores de calor [1].

Os permutadores de calor funcionam com base no conceito de transferir energia térmica entre um fluido a uma temperatura mais elevada e outro a uma temperatura mais baixa. Funcionam permitindo que o fluido quente entre em contacto com o fluido de arrefecimento, seja direta ou indiretamente. Este mecanismo permite a transferência de calor do fluido mais quente para o mais frio, levando a uma redução da temperatura do primeiro fluido e a um aumento da temperatura do segundo fluido. A direção da

transferência de calor é determinada pela necessidade de aquecimento ou arrefecimento para o sistema em questão [2].

A transferência de calor ocorre principalmente por condução e convecção. Os permutadores de calor são tipicamente categorizados com base no número de fluidos envolvidos, nas características dos elementos de superfície, nos aspetos de projeto, nos padrões de fluxo dos fluidos e nas suas técnicas de transferência de calor [3].

Entre as várias categorias de permutadores de calor, os permutadores de camada e tubos (STHEs) são razoavelmente simples de montar e oferecem uma vasta gama de aplicações tanto para gases como para líquidos em níveis extensos de temperatura e pressão [3].

¹ Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; amaury.perez84@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0819-6760>, Camagüey; Cuba.

² Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; laura.alvarez@reduc.edu; <https://orcid.org/0009-0007-2643-018X>, Camagüey; Cuba.

³ Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; aguilaariaslaura@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6494-9747>, Camagüey; Cuba.

⁴ Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; lizthalia.jimenez@reduc.edu; <https://orcid.org/0000-0002-2471-7263>

Na STHE, dois fluidos com temperaturas variáveis fluem pelo sistema. Um fluido viaja para dentro dos tubos (conhecido como lado do tubo) enquanto o outro circula em torno dos tubos dentro da carcaça (referido como lado da casca). A energia térmica é trocada entre os fluidos através das paredes dos tubos, movendo-se do lado do tubo para o lado da carcaça ou vice-versa. Estes fluidos podem estar em estado líquido ou gasoso, seja do lado da casca ou do lado do tubo. Para facilitar uma transferência eficaz de calor, é necessária uma área considerável de transferência de calor, levando à utilização de inúmeros tubos.

Os STHEs podem ser especialmente concebidos tendo em conta fatores como funcionalidade, facilidade de manutenção, adaptabilidade e segurança, resultando num permutador de calor altamente durável que incentiva a sua aplicação extensa em vários setores. Projeta-se que mais de 35-40% dos permutadores de calor usados nos setores de engenharia contemporâneos sejam do tipo shell and tube, graças ao seu design estrutural fiável, fácil manutenção e potencial para melhorias. Para uma eficiência ótima na transferência de calor, os permutadores de calor de casca e tubos devem procurar uma queda de pressão mínima, uma velocidade elevada do fluxo de massa do lado da carcaça, um coeficiente elevado de transferência de calor e incrustações mínimas a desprezíveis, entre outras características essenciais [3].

Os STHEs facilitam a troca de grandes quantidades de calor de forma eficiente e económica, oferecendo uma superfície de tubo de baixo custo enquanto minimizam a área necessária no chão, o volume de líquido e o peso total, estando disponíveis em tamanhos e comprimentos variados [4].

Estes permutadores de calor são prevalentes em vários setores, como instalações de produção de energia onde atuam como condensadores, e nos setores químicos e petroquímicos para funções de pré-aquecimento ou arrefecimento [5]. Também são empregues na refrigeração, controlo climático e na indústria da produção alimentar, entre outros [3]. Os usos comuns incluem frequentemente o aquecimento ou arrefecimento de fluxos de fluidos relevantes e a condensação ou evaporação de misturas fluidas. Além disso, certas aplicações visam recuperar ou rejeitar calor ou realizar esterilização, pasteurização, fraccionamento, destilação, concentração, cristalização ou ajuste térmico de fluidos de processo [6].

O design termo-hidráulico de um permutador de calor de casca e tubos envolve geralmente o cálculo da área de transferência de calor, quantidade de calor transferida, eficiência global de transferência de calor, quantidade de tubos, dimensões dos tubos, disposição, número de passagens para a carcaça e o tubo, tipo de permutador de calor (como folhas tubulares fixas ou feixes removíveis), espaçamento dos tubos, quantidade e especificações dos

deflectores, bem como quedas de pressão tanto do lado da carcaça como do tubo, entre outros fatores [4].

Numerosas investigações foram documentadas envolvendo o design de um STHE. Neste contexto, [5] introduziu uma abordagem detalhada de desenho para STHE influenciada pela análise dos índices de flexibilidade. Esta abordagem visa mitigar desafios como possíveis ineficiências de conceção ou funcionamento inadequado de sistemas de processo inteiros. Esta investigação incorpora um algoritmo genético com restrições rigorosas para otimizar o desenho da STHE. Além disso, [4] forneceu insights sobre os cálculos necessários para o desenho de permutadores de calor do tipo shell and tube, delineando um processo metódico para determinar os projetos, com a intenção de servir como guia padronizado para a realização sistemática destes cálculos para o projeto STEM. De forma semelhante, [7] focava-se no desenho de um STHE destinado a aplicações relacionadas com a produção de celulose nanofibrila, cumprindo as normas TEMA, e executava cálculos de parâmetros manualmente através do programa Microsoft Excel. Da mesma forma, [8] projetou um permutador de calor de carcaça e tubos para locomotivas a diesel, utilizando a técnica Bell Delaware para obter várias dimensões, incluindo carcaça, tubos e deflectores. Posteriormente, foi realizada uma análise térmica usando COMSOL, aplicando várias cargas térmicas enquanto se ajustava o número de deflectores. Adicionalmente, [2] destacou o design e avaliação de permutadores de calor de casca e tubos, examinando diferentes materiais e as suas capacidades de transferência de calor a partir das superfícies, estudando também o espaçamento dos deflectores e a sua influência na transferência de calor através da análise de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Os resultados foram contrastados com modelos teóricos. O design e a simulação do permutador de calor foram concluídos usando o paramétrico PTC Creo e o ANSYS Fluent para análise CFD, considerando materiais como cobre, alumínio e aço.

Em [9], foi apresentado um permutador de calor de casca e tubos contracorrente construído para uma instalação de fabrico de ácido nítrico, onde o projeto foi realizado com a capacidade de processamento alvo de 100 toneladas de ácido nítrico por dia. Este projeto utilizou duas metodologias distintas, a abordagem de Kern e a de Bell, durante o processo de conceção. Determinou-se que a abordagem de Bell forneceu resultados mais precisos, uma vez que o coeficiente global de transferência de calor derivado deste método correspondia de perto ao valor previsto. Além disso, o design incluía componentes auxiliares do permutador de calor, como flanges, juntas, parafusos, suportes e selas. Noutro estudo [10], os investigadores desenharam e avaliaram a eficácia de um permutador de calor de casca e tubos utilizando tanto a abordagem de Kern como o software Ansys, empregando CFD para analisar a temperatura e a taxa de fluxo dentro dos tubos e da casca, chegando à conclusão de que a

transferência de calor ao longo do comprimento do tubo varia.

Em [11], foi descrito um método direto para projetar um permutador de calor de casca e tubos para aplicações nas indústrias de bebidas e processos; Este processo de concepção abordou tanto aspectos térmicos como estruturais. O aspecto do design térmico envolvia calcular a área de superfície efetiva necessária (que se refere ao número de tubos) e determinar a diferença média de temperatura logarítmica, enquanto o projeto mecânico envolvia desenhar a carcaça para suportar pressões internas e externas, juntamente com o desenho de tubos, defletores, juntas, etc. O processo de concepção seguiu as normas ASME/TEMA.

Em [12], foi desenvolvido um permutador de calor de casca e tubo com uma única passagem de casca juntamente com duas passagens de tubo para funcionar como aquecedor de água, utilizando água de enxofre como agente de aquecimento. Os materiais de construção escolhidos para o permutador de calor incluíram aço inoxidável 304 para as carcaças e cobre para os tubos. Da mesma forma, em [13], foi introduzida uma abordagem de design e classificação para STHes equipados com defletores helicoidais, baseada em fontes públicas existentes e na técnica Bell-Delaware prevalente para STHes utilizando defletores segmentários. Este método substituiu vários fatores de tipo de curva da literatura por fórmulas matemáticas para simplificar o projeto de engenharia, detalhando assim o processo de cálculo para a abordagem proposta. Finalmente, [14] explora os princípios fundamentais do design térmico para STHes, discutindo elementos como os componentes das STHes; a sua classificação baseada na construção e operação; dados necessários para o design térmico; design do lado do tubo; design do lado da carcaça, incorporando disposição dos tubos, defletores, queda de pressão do lado da carcaça; e a diferença média de temperatura. Enfatiza a utilização de equações essenciais relacionadas com a transferência de calor e perda de pressão tanto do lado do tubo como do lado da carcaça para o design ótimo do STH.

Vários livros [1] [15]-[18] descrevem metodologias úteis de cálculo para desenhar STH do ponto de vista térmico e hidráulico, que são adaptações modernas ou versões do clássico método de Kern, bem como descrevem o método Bell-Delaware.

Em certas plantas químicas, deseja-se arrefecer 50.000 kg/h de um jato de ácido acrílico produzido no fundo de uma coluna de destilação antes de ser armazenado, e para isso foi proposto um permutador de calor de casca e tubos. Neste contexto, o objetivo deste estudo é desenhar um STH para arrefecer este fluxo de ácido acrílico de 97 °C a 40 °C usando água de arrefecimento a uma temperatura de entrada de 25 °C. Para desenhar o STH, foi aplicada a metodologia de cálculo reportada em [17], baseada na abordagem de Kern, devido à sua simplicidade e características inovadoras. Esta metodologia permite calcular vários

parâmetros de concepção para o SSE, como área de troca de calor, número de tubos, diâmetro da carcaça, coeficiente global de transferência de calor, bem como a queda de pressão de ambos os fluxos. Além disso, o custo de compra do STH projetado será calculado e atualizado para o ano de 2024.

2.- Materiais e métodos.

2.1. Enunciado do problema

É necessário arrefecer 50.000 kg/h de um fluxo de ácido acrílico proveniente do fundo da coluna de destilação entre 97 °C e 40 °C usando água de arrefecimento a uma temperatura de entrada de 25 °C. Para este serviço de transferência de calor é proposto um permutador horizontal de carcaça e tubos que funcione como arrefecedor. A temperatura de saída da água de arrefecimento não deve exceder 45 °C por questões de segurança, enquanto a queda de pressão dos fluxos de ácido acrílico e água de arrefecimento não deve exceder 5.000 Pa e 1.000 Pa, respetivamente. O permutador de calor deve operar sob disposição de contracorrente e será do tipo 1-2, ou seja, com uma passagem de casca e duas passagens de tubos. Para desenhar o permutador de calor proposto de 1-2 carcaças e tubos será utilizada a metodologia reportada por [17], baseada na abordagem de Kern. Além disso, o custo de compra do permutador de calor será calculado usando a correlação publicada em [17], que depende da área de troca de calor calculada.

2.2. Metodologia de concepção.

A metodologia de cálculo aplicada para projetar o permutador de calor de casca e tubo do ponto de vista termo-hidráulico é apresentada abaixo.

Projeto preliminar

Passo 1. Definição dos dados iniciais disponíveis para os dois fluxos:

A Tabela 1 mostra os dados iniciais disponíveis para os dois fluxos.

Tabela 1. Dados iniciais disponíveis para os dois fluxos.

Parâmetro	Unidades	Fluido frio	Fluido quente
Caudal mássico	kg/h	m_c	m_h
Temperatura de entrada	°C	t_1	T_1
Temperatura de saída	°C	t_2	T_2
Queda máxima de pressão permitida	Pa	$\Delta P_{c(p)}$	$\Delta P_{h(p)}$
Fator de falta	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	R_c	R_h

Fonte: Explicação própria.

Passo 2. Temperatura média de ambos os cursos de água (ribeiros):

- Fluido frio (\bar{t}):

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (1)$$

- Fluido quente (\bar{T}):

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2)$$

Passo 3. Propriedades físicas de ambos os fluidos à temperatura média:

A Tabela 2 apresenta as propriedades físicas que devem ser definidas para ambos os fluidos à temperatura média calculada no passo anterior.

Tabela 2. Propriedades físicas a definir para ambos os fluidos.

Propriedade	Unidades	Fluido frio	Fluido quente
Densidade	kg/m ³	ρ_c	ρ_h
Viscosidade	Pa.s	μ_c	μ_h
Capacidade calorífica	kJ/kg.°C	Cp_c	Cp_h
Condutividade térmica	W/m.K	k_c	k_h

Fonte: Explicação própria.

Passo 4. Carga térmica ():Q

- Para o fluido quente:

$$Q = \frac{m_h}{3,600} \cdot Cp_h \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

Onde a unidade de é kW.Q

Passo 5. Caudal mássico necessário do fluido frio (água de arrefecimento) ():m_c

$$m_c = \frac{Q}{Cp_c \cdot (t_2 - t_1)} \quad (4)$$

Onde é dado em kW e é dado em kJ/kg.K. Q Cp_c

Passo 6. Suposição do coeficiente global de transferência de calor ().U₀

Passo 7. Diferença média de temperatura logarítmica ():ΔT_{lm}

- Para uma disposição contracorrente:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad (5)$$

Passo 8. Fator R:

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)} \quad (6)$$

Passo 9. Fator S:

$$S = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)} \quad (7)$$

Passo 10. Fator de correção de temperatura ():F_t

- Para uma carcaça 1: permutador de calor de passagem de 2 tubos:

$$F_t = \frac{\sqrt{(R^2 + 1)} \cdot \ln \left[\frac{(1 - S)}{(1 - R \cdot S)} \right]}{(R - 1) \cdot \ln \left[\frac{2 - S \cdot \left[R + 1 - \sqrt{(R^2 + 1)} \right]}{2 - S \cdot \left[R + 1 + \sqrt{(R^2 + 1)} \right]} \right]} \quad (8)$$

Passo 11. Diferença verdadeira de temperatura ():ΔT_m

$$\Delta T_m = \Delta T_{lm} \cdot F_t \quad (9)$$

Passo 12. Área provisória de transferência de calor ():A₀

$$A_0 = \frac{Q \cdot 1,000}{U_0 \cdot \Delta T_m} \quad (10)$$

Onde é dada em kW.Q

Passo 13. Selecione os seguintes dados para as válvulas:

- Diâmetro nominal.
- Material.
- Comprimento ().L_t

Passo 14. Área de um tubo ():a₁

$$a_1 = \pi \cdot L_t \cdot d_0 \quad (11)$$

Onde e são dados em m.L_td₀

Passo 15. Número de tubos ():N₀

$$N_0 = \frac{A_0}{a_1} \quad (12)$$

Passo 16. Disposição dos tubos:

Inclinação triangular ou quadrada.

Passo 17. Seleção das constantes e dependendo da disposição dos tubos (triangular ou quadrada) e do número de passagens dos tubos.K₁n₁

Passo 18. Diâmetro do feixe ():D_b

$$D_b = d_0 \cdot \left(\frac{N_0}{K_1} \right)^{1/n_1} \quad (13)$$

Onde é dado em mm.d₀

Passo 19. Selecione o tipo de permutador de calor de casca e tubos:

- Cabeça flutuante de puxar.
- Cabeça flutuante de anel dividido.
- Fora de casa, cabeça compacta.
- Fixo e U-tube.

Passo 20. Folga do feixe de projéteis () em mm.C_{sb}

Passo 21. Diâmetro da concha ():D_s

$$D_s = D_b + C_{sb} \quad (14)$$

Onde e são dados em mm.D_bC_{sb}

Passo 22. Alocação de fluidos dentro do permutador de calor.

Coeficiente do lado do tubo

Passo 23. Área da secção transversal do tubo ():a_t

$$a_t = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \quad (15)$$

Onde é dado em m.d_i

Passo 24. Número de tubos por passagem ():N_{tp}

$$N_{tp} = \frac{N_0}{n_p} \quad (16)$$

Onde – número de passagens do lado do tubo = 2.n_p

Passo 25. Área total de fluxo (m^2): a_T

$$a_T = N_{tp} \cdot a_t \quad (17)$$

Passo 26. Velocidade de massa do fluido do lado do tubo

$$G_t = \frac{m_t}{a_T} \quad (18)$$

Onde é dada em $\text{kg/s} \cdot m_t$

Passo 27. Velocidade linear do fluido do lado do tubo (m/s): v_t

$$v_t = \frac{G_t}{\rho_t} \quad (19)$$

Passo 28. Número de Reynolds do fluido do lado do tubo

$$Re_t = \frac{\rho_t \cdot v_t \cdot d_i}{\mu_t} \quad (20)$$

Passo 29. Número de Prandtl do fluido do lado do tubo

$$Pr_t = \frac{(Cp_t \cdot 1,000) \cdot \mu_t}{k_t} \quad (21)$$

Onde é dada em $\text{kJ/kg} \cdot \text{K} \cdot Cp_t$

Passo 30. Razão, onde tanto como são dados em

$$m \cdot \frac{L_t}{d_i} \cdot L_t d_i$$

Passo 31. Fator de transferência de calor do lado do tubo ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), dependendo da razão e do número de

$$\text{Reynolds} \cdot j_{h1} \cdot \frac{L_t}{d_i}$$

Passo 32. Coeficiente de transferência de calor do lado do tubo ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$): h_i

$$h_i = \frac{k_t}{d_i} \cdot j_{h1} \cdot Re_t \cdot Pr_t^{0.33} \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right)^{0.14} \quad (22)$$

Onde é dado em $m \cdot d_i$

Para água que flui em tubos, pode ser usada a seguinte correlação:

$$h_i = \frac{4,200 \cdot (1.35 + 0.02 \cdot \bar{t}) \cdot v_t^{0.8}}{d_i^{0.2}} \quad (23)$$

Onde:

\bar{t} – Temperatura média da água ($^{\circ}\text{C}$).

v_t – Velocidade da água (m/s).

d_i – Diâmetro interior do tubo (mm).

Coeficiente do lado da casca:

Passo 33. Espaçamento dos defletores (m): l_B

$$l_B = D_s \cdot \phi \quad (24)$$

Onde = 0,2 – 0,5 [17] e é dado em $\text{mm} \cdot \phi D_s$

Passo 34. Afinação do tubo (m): p_t

$$p_t = 1.25 \cdot d_o \quad (25)$$

Onde é dado em $m \cdot d_o$

Passo 35. Área de fluxo cruzado do fluido do lado da casca (m^2): A_s

$$A_s = \frac{(p_t - d_o)}{p_t} \cdot D_s \cdot l_B \quad (26)$$

Onde todos os parâmetros são dados em m.

Passo 36. Velocidade de massa do fluido lateral da concha

$$G_s = \frac{m_s}{A_s} \quad (27)$$

Onde e são dados em kg/h e $\text{mm}^2 \cdot A_s^2$, respetivamente.

Passo 37. Diâmetro equivalente à carcaça (diâmetro hidráulico) (m): d_e

• Afinação quadrada:

$$d_e = \frac{1.27}{d_o} \cdot (p_t^2 - 0.785 \cdot d_o^2) \quad (28)$$

• Afinação triangular:

$$d_e = \frac{1.10}{d_o} \cdot (p_t^2 - 0.917 \cdot d_o^2) \quad (29)$$

Onde e são dados em $m \cdot p_t d_o$

Passo 38. Número de Reynolds do fluido do lado da casca (m): Re_s

$$Re_s = \frac{G_s \cdot d_e}{\mu_s} \quad (30)$$

Passo 39. Número de Prandtl do fluido do lado da concha (m): Pr_s

$$Pr_s = \frac{(Cp_s \cdot 1,000) \cdot \mu_s}{k_s} \quad (31)$$

Onde é dada em $\text{kJ/kg} \cdot \text{K} \cdot Cp_s$

Passo 40. Seleção do corte do defletor (%).

Passo 41. Fator de transferência de calor do lado da carcaça ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), dependendo do corte do defletor e do número de Reynolds j_{h2}

Passo 42. Coeficiente de transferência de calor do lado da casca ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$): h_o

$$h_o = \frac{k_s}{d_e} \cdot j_{h2} \cdot Re_s \cdot Pr_s^{0.33} \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_{sw}} \right)^{0.14} \quad (32)$$

Onde é dado em $m \cdot d_e$

Coeficiente global de transferência de calor calculado

Passo 43. Condutividade térmica do material do tubo ($\text{W/m} \cdot \text{K}$): k_w

Passo 44. Coeficiente global de transferência de calor calculado ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$): U_c

$$U_c = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{1}{R_s} + \frac{d_o \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2 \cdot k_w} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{R_t} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{h_i}} \quad (33)$$

Queda de pressão

Passo 45. Fator de atrito para o fluido do lado do tubo (j_{f1})

Passo 46. Queda de pressão do fluido do lado do tubo (ΔP_t)

$$\Delta P_t = n_p \cdot \left[8 \cdot j_{f1} \cdot \left(\frac{L_t}{d_i} \right) \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right)^{-m} + 2.5 \right] \cdot \frac{\rho_t \cdot v_t^2}{2} \quad (34)$$

Onde $n_p = 0,25$ para escoamento laminar (< 2.100) e $n_p = 0,14$ para escoamento turbulento (> 2.100), enquanto e são dados em m, e em $\text{kg/m} \cdot \text{Re}_t \cdot \text{Re}_t \cdot L_t \cdot d_i \cdot \rho_t \cdot v_t^3$ e m/s, respectivamente.

Passo 47. Fator de atrito do fluido do lado da casca (j_{f2})

Passo 48. Velocidade linear do fluido do lado da casca (v_s)

$$v_s = \frac{G_s}{\rho_s} \quad (35)$$

Passo 49. Queda de pressão do fluido do lado da casca (ΔP_s)

$$\Delta P_s = 8 \cdot j_{f2} \cdot \left(\frac{D_s}{d_e} \right) \cdot \left(\frac{L_t}{l_B} \right) \cdot \frac{\rho_s \cdot v_s^2}{2} \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_{sw}} \right)^{-0.14} \quad (36)$$

Onde j_{f2} , e são dados em m. $D_s d_e L_t l_B$

Custo de compra do permutador de calor

Para calcular o custo de compra do permutador de calor proposto, foi utilizada a seguinte correlação [17]:

$$C_{exch(2007)} = a + b \cdot A^n \quad (37)$$

Onde:

$a = 24.000$

$b = 46$

$n = 1.2$

A – Área do permutador de calor, que deve situar-se na ordem de $10 - 1.000 \text{ m}^2$.

O custo de compra calculado pela eq. (37) para o permutador de calor projetado é referido para janeiro de 2007. Para atualizar o custo de compra do permutador de calor de carcaça e tubos para maio de 2024, foi utilizada a seguinte correlação:

$$C_{exch(2024)} = C_{exch(2007)} \cdot \frac{CE \text{ Index } (2024)}{CE \text{ Index } (2007)} \quad (38)$$

Onde:

$C_{exch(2024)}$ – Custo do permutador de calor de carcaça e tubos em maio de 2024.

$C_{exch(2007)}$ – Custo do permutador de calor de carcaça e tubos em janeiro de 2007, calculado pela eq. (37).

$CE \text{ Index } (2024)$ – Índice de Engenharia Química em maio de 2024 = 800,0 [19].

$CE \text{ Index } (2007)$ – Índice de Engenharia Química em janeiro de 2007 = 509,7 [17].

3.- Análise e Interpretação dos Resultados.

3.1. Projeto preliminar.

Abaixo são mostrados cada passo implementado na metodologia para desenhar o permutador de calor de casca e tubo para arrefecimento por ácido acrílico.

Passo 1. Definição dos dados iniciais disponíveis para os dois fluxos:

A Tabela 3 mostra os dados iniciais disponíveis para os dois fluxos.

Tabela 3. Dados iniciais disponíveis para os dois fluxos.

Parâmetro	Unidades	Água de arrefecimento	Ácido acrílico
Caudal mássico	kg/h	-	50,000
Temperatura de entrada	°C	25	97
Temperatura de saída	°C	45	40
Queda máxima de pressão permitida	Pa	1,000	5,000
Fator de falta	W/m ² ·°C	1,000	3,000

Fonte: Explicação própria.

Passo 2. Temperatura média de ambos os cursos de água (ribeiros):

- Fluido frio (\bar{t})

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{25 + 45}{2} = 35 \text{ °C} \quad (1)$$

- Fluido quente (\bar{T})

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{97 + 40}{2} = 68.5 \text{ °C} \quad (2)$$

Passo 3. Propriedades físicas de ambos os fluidos à temperatura média:

De acordo com [20], ambos os fluidos apresentam as propriedades físicas apresentadas na Tabela 4 às temperaturas médias calculadas no passo anterior.

Tabela 4. Propriedades físicas definidas para ambos os fluidos.

Propriedade	Unidades	Água de arrefecimento	Ácido acrílico
Densidade	kg/m ³	994.033	995.54
Viscosidade	Pa.s	0.000719	0.0005696
Capacidade calorífica	kJ/kg.°C	4.179	2.1897
Condutividade térmica	W/m.K	0.6233	0.1449

Fonte: Explicação própria.

Passo 4. Carga térmica (Q):

Usando os dados iniciais para o fluido quente:

$$Q = \frac{m_h}{3,600} \cdot C_{p_h} \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

$$Q = \frac{50,000}{3,600} \cdot 2.1897 \cdot (97 - 40)$$

$$Q = 1,733.59 \text{ kW}$$

Passo 5. Caudal mássico necessário do fluido frio (água de arrefecimento) (m_c):

$$m_c = \frac{Q}{C_{p_c} \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{1,733.59}{4.179 \cdot (45 - 25)} \quad (4)$$

$$m_c = 20.74 \text{ kg/s}$$

Passo 6. Suposição do coeficiente global de transferência de calor (U_0)

Tendo em conta o intervalo reportado por [17] para arrefecedores que usam água para arrefecer solventes

orgânicos, assumiu-se um valor para o coeficiente global de transferência de calor (U_0) de $300 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Passo 7. Diferença média de temperatura logarítmica (ΔT_{lm}):

- Para uma disposição contracorrente:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad (5)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(97 - 45) - (40 - 25)}{\ln \frac{(97 - 45)}{(40 - 25)}}$$

$$\Delta T_{lm} = 29.76^\circ\text{C}$$

Passo 8. Fator R:

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)} = \frac{(97 - 40)}{(45 - 25)} = 2.85 \quad (6)$$

Passo 9. Fator S:

$$S = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)} = \frac{(45 - 25)}{(97 - 25)} = 0.278 \quad (7)$$

Passo 10. Fator de correção de temperatura (F_t):

- Para uma carga 1: permutador de calor de passagem de 2 tubos:

$$F_t = \frac{\sqrt{(R^2 + 1)} \cdot \ln \left[\frac{(1 - S)}{(1 - R \cdot S)} \right]}{(R - 1) \cdot \ln \left[\frac{2 - S \cdot [R + 1 - \sqrt{(R^2 + 1)}]}{2 - S \cdot [R + 1 + \sqrt{(R^2 + 1)}]} \right]} \quad (8)$$

$$F_t = 0.683$$

Passo 11. Diferença verdadeira de temperatura (ΔT_m):

$$\Delta T_m = \Delta T_{lm} \cdot F_t = 29.76 \cdot 0.683 = 20.326^\circ\text{C} \quad (9)$$

Passo 12. Área provisória de transferência de calor (A_0):

$$A_0 = \frac{Q \cdot 1,000}{U_0 \cdot \Delta T_m} = \frac{1,733.59 \cdot 1,000}{300 \cdot 20.326} \quad (10)$$

$$A_0 = 284.29 \text{ m}^2$$

Passo 13. Seleção dos seguintes dados para os tubos:

- Diâmetro nominal: 3/4 pol, 40 ST. Assim, segundo [20]:
Diâmetro exterior (d_o) = 0,0267 m.
Diâmetro interior (d_i) = 0,0209 m.
- Material: Aço inoxidável (18/8).
- Comprimento (L_t) = 4,83 m.

Passo 14. Área de um tubo (a_1):

$$a_1 = \pi \cdot L_t \cdot d_o = 3.14 \cdot 4.83 \cdot 0.0267 \quad (11)$$

$$a_1 = 0.4049 \text{ m}^2$$

Passo 15. Número de tubos (N_0):

$$N_0 = \frac{A_0}{a_1} = \frac{284.29}{0.4049} = 702.12 \approx 702 \quad (12)$$

Passo 16. Disposição dos tubos:

O passo triangular foi selecionado para proporcionar taxas de transferência de calor mais elevadas, mesmo à custa de quedas de pressão mais elevadas [17], porque a queda de pressão não é um parâmetro importante a considerar neste serviço de transferência de calor, segundo os supervisores da indústria onde este STHE será instalado. No entanto, a queda de pressão será calculada para ambos os fluxos de fluido nesta metodologia de concepção, e os valores obtidos serão comparados com os limites máximos permitidos estabelecidos pelo processo.

Passo 17. Seleção das constantes e $K_1 n_1$:

De acordo com [17], para uma disposição triangular de tubos e um número de passagens de tubos (n_p) de 2, os valores destas constantes são: n_p

- $K_1 = 0.249$.
- $n_1 = 2.207$.

Passo 18. Diâmetro do feixe (D_b):

$$D_b = d_o \cdot \left(\frac{N_0}{K_1} \right)^{1/n_1} = 26.67 \cdot \left(\frac{702}{0.249} \right)^{1/2.207} \quad (13)$$

$$D_b = 975.62 \text{ mm}$$

Passo 19. Selecione o tipo de permutador de calor de casca e tubos:

O tipo selecionado de permutador de calor de casca e tubo é uma cabeça flutuante de anel dividido para eficiência e facilidade de limpeza [17].

Passo 20. Folga do feixe de projéteis (C_{sb}):

Como referido por [17], a folga do feixe de concha para um valor do diâmetro do feixe (D_b) de 975,62 mm e um tipo de cabeça flutuante de anel dividido, é de 72 mm. D_b

Passo 21. Diâmetro da concha (D_s):

$$D_s = D_b + C_{sb} = 975.62 + 72 = 1,047.62 \text{ mm} \quad (14)$$

Passo 22. Alocação de fluidos dentro do permutador de calor.

Tendo em conta as sugestões reportadas por [17], o fluido frio (água de arrefecimento) estará localizado do lado do tubo, enquanto o fluido quente (ácido acrílico) estará localizado do lado da carga.

3.2. Coeficiente do lado do tubo.

Devido à alocação do fluido frio nos tubos e do fluido quente na casca, a nomenclatura de alguns parâmetros será corrigida para concordar com a nomenclatura das equações que serão usadas daqui para a frente.

A Tabela 5 indica a nomenclatura inicial e corrigida dos parâmetros utilizados nas próximas equações.

Tabela 5. Nomenclatura original e corrigida dos parâmetros usados nas próximas equações.

Parâmetro	Nomenclatura original	Nomenclatura corrigida	Unidades
Caudal do fluido quente	m_h	m_s	kg/h
Caudal do fluido frio	m_c	m_t	kg/h
Densidade do fluido quente	ρ_h	ρ_s	kg/m ³
Densidade do fluido frio	ρ_c	ρ_t	kg/m ³
Viscosidade do fluido quente	μ_h	μ_s	Pa.s
Viscosidade do fluido frio	μ_c	μ_t	Pa.s
Capacidade térmica do fluido quente	Cp_h	Cp_s	kJ/kg. K
Capacidade calorífica do fluido frio	Cp_c	Cp_t	kJ/kg. K
Condutividade térmica do fluido quente	k_h	k_s	W/m.K
Condutividade térmica do fluido frio	k_c	k_t	W/m.K

Fonte: Explicação própria.

A Tabela 6 mostra os resultados dos parâmetros calculados nos passos 23 a 32, para determinar o coeficiente de transferência de calor do lado do tubo.

Tabela 6. Resultados dos parâmetros calculados nos passos 23-32.

Passo	Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
23	Área da seção transversal do tubo	a_t	0.00034	M2
24	Número de tubos por passagem	N_{tp}	351	-
25	Área total de escoamento	a_T	0.1193	M2
26	Velocidade de massa do fluido do lado do tubo	G_t	173.85	kg/s.m ²
27	Velocidade linear do fluido do lado do tubo	v_t	0.175	m/s
28	Número de Reynolds do fluido do lado do tubo	Re_t	5,056.57	-
29	Número de Prandtl do fluido do lado do tubo	Pr_t	4.82	-
30	Proporção L_t/d_i	-	231.10	-
31	Fator de transferência de calor do lado do tubo ¹	j_{h1}	0.0041	-
32	Coeficiente de transferência de calor do lado do tubo ²	h_i	1,162.11	W/m ² . K

¹ Para um valor de Re_t e de 5056,57 e 231,10, respetivamente. L_t/d_i

² A equação (23) foi utilizada para calcular estes parâmetros, uma vez que a água flui nos tubos.

Fonte: Explicação própria.

3.3. Coeficiente do lado da carapaça.

A Tabela 7 apresenta os resultados dos parâmetros calculados nos passos 33-42, para determinar o coeficiente de transferência de calor do lado da casca.

Tabela 7. Resultados dos parâmetros calculados nos passos 33-42.

Passo	Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
33	Espaçamento do defletor ¹	l_B	209.52	mm
34	Afinação a válvulas	p_t	0.0334	m
35	Área de fluxo cruzado do fluido lateral da casca	A_s	0.0440	M2
36	Velocidade de massa do fluido lateral da concha	G_s	315.65	kg/s.m ²
37	Diâmetro equivalente do lado da concha ²	d_e	0.0191	m
38	Número de Reynolds do fluido do lado da casca	Re_s	10,584.47	-
39	Número de Prandtl do fluido do lado da concha	Pr_s	8.61	-
40	Seleção do corte com defletor	-	25%	-
41	Fator de transferência de calor do lado da casca	j_{h2}	0.0058	-
42	Coeficiente de transferência de calor do lado da carapaça ³	h_o	947.66	W/m ² . K

Foi selecionado um valor de 0,2 para ϕ calcular o espaçamento dos defletores.

²A Equação (29) foi utilizada para calcular o diâmetro equivalente do lado da casca devido à seleção do arranjo triangular do passo.

³O termo de correção de viscosidade não foi considerado porque ambos os fluidos têm baixa viscosidade (μ_s/μ_{sw})^{0.14}[17].

Fonte: Explicação própria.

3.4. Coeficiente global de transferência de calor calculado.

Passo 43. Condutividade térmica do material do tubo (k_w). Como o material selecionado para os tubos é aço inoxidável 18/8, a condutividade térmica deste material é de 16 W/m.K [17].

Passo 44. Coeficiente global de transferência de calor calculado (U_C)

$$U_C = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{1}{R_s} + \frac{d_o \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2 \cdot k_w} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{R_t} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{h_i}} \quad (33)$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{947.66} + \frac{1}{5.000} + \frac{0.0267 \cdot \ln\left(\frac{0.0267}{0.0209}\right)}{2 \cdot 16} + \frac{0.0267}{0.0209} \cdot \frac{1}{3.000} + \frac{0.0267}{0.0209} \cdot \frac{1}{1162.11}}$$

$$U_C = 364.26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

3.5. Queda de pressão

Passo 45. Fator de atrito para o fluido do lado do tubo (j_{f1}). Segundo [17], para um número de Reynolds do fluido do lado do tubo (água de arrefecimento) de 5.056,57, o fator de atrito (f) tem um valor de 0,0058. j_{f1}

Passo 46. Queda de pressão do fluido do lado do tubo (ΔP_t)

$$\Delta P_t = n_p \cdot \left[8 \cdot j_{f1} \cdot \left(\frac{L_t}{d_i} \right) \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right)^{-0.14} + 2.5 \right] \quad (34)$$

$$\Delta P_t = 2 \cdot \left[8 \cdot 0.0058 \cdot \left(\frac{4.83}{0.0209} \right) \cdot 1 + 2.5 \right] \cdot \frac{994.033 \cdot 0.175^2}{2}$$

$$\Delta P_t = 402.54 \text{ Pa}$$

Enquanto $(\mu_t/\mu_{tw})^{-0.14} = 1$ que sugerido por [17] porque a água não é considerada um fluido altamente viscoso.

Passo 47. Fator de atrito do fluido do lado da casca (j_{f2})

Segundo [17], para um número de Reynolds do fluido lateral da casca (ácido acrílico) de 10.584,47 e um corte de defletor de 25%, o fator de atrito (j_{f2}) tem um valor de 0,0049.

Passo 48. Velocidade linear do fluido do lado da casca (v_s)

$$v_s = \frac{G_s}{\rho_s} = \frac{315.65}{995.54} = 0.317 \text{ m/s} \quad (35)$$

Passo 49. Queda de pressão do fluido do lado da casca (ΔP_s)

$$\Delta P_s = 8 \cdot j_{f2} \cdot \left(\frac{D_s}{d_e} \right) \cdot \left(\frac{L_t}{l_B} \right) \cdot \frac{\rho_s \cdot v_s^2}{2} \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_{sw}} \right)^{-0.14} \quad (36)$$

$$\Delta P_s = 8 \cdot 0.0049 \cdot \left(\frac{1.04762}{0.0191} \right) \cdot \left(\frac{4.83}{0.20952} \right) \cdot \frac{995.54 \cdot 0.317^2}{2}$$

$$\Delta P_s = 2,479.27 \text{ Pa}$$

3.6. Custo de compra do permutador de calor.

Para um valor da área de troca de calor de 207,47 m², o custo de compra do permutador de calor de casca e tubos projetado é:

$$C_{exch(2007)} = a + b \cdot A^n \quad (37)$$

$$C_{exch(2007)} = 24,000 + 46 \cdot 284.29^{1.2}$$

$$C_{exch(2007)} \approx \text{USD } \$ 64,483$$

Como o custo de compra calculado pela equação (37) corresponde a janeiro de 2007, o custo de compra deste equipamento referido em maio de 2024 é:

$$C_{exch(2024)} = C_{exch(2007)} \cdot \frac{CE \text{ Index } (2024)}{CE \text{ Index } (2007)} \quad (38)$$

$$C_{exch(2024)} = 64,483 \cdot \frac{800.0}{509.7}$$

$$C_{exch(2024)} = \text{USD } \$ 101,209$$

4.- Discussão

Um permutador de calor de casca e tubos com uma passagem de casca e duas passagens de tubos foi projetado para arrefecer um fluxo de ácido acrílico, originado no fundo de uma coluna de destilação, de 97 a 40 °C por meio de água de arrefecimento a uma temperatura de entrada de 25 °C, utilizando a metodologia de design relatada por [17], que se baseia na abordagem de Kern. A água de arrefecimento era destinada a fluir para dentro dos tubos,

enquanto o ácido acrílico era atribuído ao fluxo sobre a carcaça.

O valor calculado da carga térmica para este serviço de permutador de calor foi de 1.733,59 kW, enquanto será necessário um caudal de 20,74 kg/s (74.664 kg/h) para o agente de transferência de calor selecionado (água de arrefecimento). A diferença de temperatura média logarítmica tinha um valor de 29,76 °C, enquanto os valores do fator de correção de temperatura e da diferença real de temperatura foram de 0,683 e 20,326 °C, respectivamente.

A velocidade de massa e a velocidade linear da água de arrefecimento foram de 173,85 kg/s.m² e 0,175 m/s, respectivamente, enquanto o número de Reynolds calculado para este fluido foi 5.056,57, indicando assim que a água de arrefecimento fluirá sob o regime de transição. O coeficiente de transferência de calor calculado do fluido do lado do tubo foi de 1.162,11 W/m² K.

Os valores da velocidade de massa e da velocidade linear do ácido acrílico foram, respectivamente, 315,65 kg/s.m² e 0,317 m/s. O número de Reynolds calculado para o ácido acrílico foi 10.584,47, indicando assim que este fluido fluirá sob regime turbulento no permutador de calor projetado. O coeficiente de transferência de calor calculado ao lado da carcaça foi de 947,66 W/m² K.

O coeficiente de transferência de calor do fluido do lado do tubo é cerca de 1,23 vezes superior ao coeficiente de transferência de calor do lado da carcaça, o que concorda com os resultados do permutador de calor de casca e tubos projetado em [17], onde o coeficiente de transferência de calor do fluido do lado do tubo (água salobra) é de 3.852 W/m² K, enquanto o coeficiente de transferência de calor para o fluido do lado da casca (metanol) é de 2.740 W/m² K (ou seja, cerca de 1,40 vezes mais alto).

A queda de pressão calculada do fluido do lado do tubo, ou seja, da água de arrefecimento (402,54 Pa), é cerca de 6,16 vezes inferior à queda de pressão do fluido do lado da carapaça, ou seja, da água acrílica (2.479,27 Pa). Este resultado concorda com os resultados da queda de pressão calculada durante o desenho de um permutador de calor de casca e tubos em [17], onde o valor da queda de pressão (7,2 kPa) da água salobra usada como fluido de arrefecimento (fluido do lado do tubo) é inferior ao valor da queda de pressão (272 kPa) do fluido do lado da casca (metanol). Os valores da queda de pressão calculada no presente estudo para ambos os fluidos estão abaixo dos limites máximos permitidos estabelecidos pelo serviço de troca de calor.

Um valor calculado do coeficiente global de transferência de calor de 364,26 W/m² K foi obtido, que está acima do valor assumido (300 W/m² K) no passo 6, indicando assim que o projeto tem área adequada para o dever exigido [17].

Assim, o permutador de calor de carcaça e tubos projetado neste estudo apresentará os seguintes dados de projeto:

- Tipo: Cabeça flutuante de anel dividido.
- Área de transferência de calor (m^2): 284,29
- Número de tubos (N): 702
- Diâmetro do feixe (D_b): 975,62 mm
- Diâmetro do projétil (D_s): 1.047,62 mm

O permutador de calor de casca e tubos, projetado em [17] para arrefecer 100.000 kg/h de um fluxo de metanol por meio de água salobra, tem os seguintes parâmetros de projeto:

- Tipo: Cabeça flutuante de anel dividido.
- Área de transferência de calor (m^2): 278
- Número de tubos (N): 918
- Diâmetro do feixe (D_b): 826 mm
- Diâmetro do projétil (D_s): 894 mm

Em [9], foi projetado um permutador de calor de casca e tubos para arrefecer 0,827 kg/s de fluxo de óxido nítrico de 150 °C a 50 °C, usando água a uma temperatura de fornecimento de 35 °C. Os parâmetros do permutador de calor de casca e tubos desenhados neste estudo são apresentados abaixo:

- Área de transferência de calor (m^2): 8,98
- Número de tubos (N): 60
- Diâmetro do feixe (D_b): 240,049 mm
- Diâmetro do projétil (D_s): 251,049 mm
- Coeficiente total de transferência de calor ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$): 405,62
- Queda de pressão no lado da carcaça: 82,93 kPa.

Neste estudo, o óxido nítrico foi distribuído na lateral da concha, enquanto a água de arrefecimento foi distribuída pelos tubos. No entanto, o valor do coeficiente de transferência de calor do lado do tubo ($1.059,197 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) é 1,51 vezes inferior ao valor do coeficiente de transferência de calor do lado da casca ($1.601,63 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$), que difere dos resultados do nosso estudo.

Outros autores [7] realizaram o design de um permutador de calor de casca e tubos para aplicações de produção de celulose nanofibrilada. Os resultados dos parâmetros de desempenho obtidos durante o desenho deste STHE são apresentados abaixo:

- Taxa de transferência de calor (W): 167.720
- Área de transferência de calor (m^2): 16,87
- Número de tubos (N_t): 53
- Concha do feixe (D_b): 1,85 m
- Coeficiente de transferência de calor por convecção no tubo ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$): 135,34
- Coeficiente de transferência de calor por convecção na camada ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$): 0,5934
- Coeficiente total de transferência de calor real ($\text{W/U}_{act} \cdot \text{K}$): 0,5932
- Eficácia (ϵ): 89,21%

Da mesma forma, em [4] um STHE é concebido para arrefecer 1,5 kg/s de um fluxo de óleo de 107 °C a 27 °C

usando 1,72 kg/s de água de arrefecimento com uma temperatura de entrada de 27 °C. Neste estudo, o fluido quente é distribuído do lado da carcaça enquanto o fluido frio está localizado do lado do tubo, o que é semelhante às condições do nosso estudo. Vários parâmetros são calculados neste trabalho, alguns dos quais são apresentados abaixo:

- Energia transferida (W): 129.660
- Área de transferência de calor (m^2): 3,43
- Número de tubos (N_t): 26
- Coeficiente de transferência de calor do lado do tubo ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$): 126,63
- Coeficiente de transferência de calor no lado da carcaça ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$): 182,65
- Coeficiente global de transferência de calor assumido ($\text{W/U}^m \cdot \text{K}$): 800
- Eficácia (ϵ): 50,01%

5.- Conclusões.

Um permutador de calor de casca e tubos com passagem onshell e duas passagens tubulares foi projetado do ponto de vista termo-hidráulico, utilizando uma metodologia de design bem conhecida baseada na abordagem de Kern, para arrefecer 50.000 kg/h de um fluxo de ácido acrílico de 97 °C a 40 °C usando água de arrefecimento a uma temperatura de entrada de 25 °C. Foram determinados vários parâmetros, como a carga térmica ($1.733,59 \text{ kW}$); coeficiente total de transferência de calor ($364,26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$); área de transferência de calor ($284,29 \text{ m}^2$); número de tubos (702); e diâmetro do projétil (1.047,62 mm). O caudal mássico da água de arrefecimento necessário para arrefecer este fluxo de ácido acrílico é de 20,74 kg/s (74.664 kg/h). O tipo de permutador de calor de carcaça e tubos selecionado tinha uma cabeça flutuante de anel dividido, enquanto a queda de pressão da água (402,54 Pa) e do ácido acrílico (2.479,27 Pa) é inferior à queda máxima permitida definida pelo serviço. O custo de compra do permutador de calor de carcaça e tubos projetado é de USD \$ 101.209.

6.- Contribuições dos Autores (Taxonomia dos Papéis dos Colaboradores (CRediT))

1. Conceptualização: Amaury Pérez Sánchez.
2. Curadoria de dados: Laura Thalía Alvarez Lores, Lizthalia Jiménez Guerra.
3. Análise Formal: Amaury Pérez Sánchez, Laura Thalía Alvarez Lores, Laura de la Caridad Arias Aguila.
4. Aquisição de fundos: Não aplicável.
5. Investigação: Amaury Pérez Sánchez, Laura Thalía Alvarez Lores, Laura de la Caridad Arias Águila, Lizthalia Jiménez Guerra.
6. Metodologia: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Águila.
7. Gestão de projetos: Não aplicável.
8. Recursos: Não aplicável.
9. Software: Não aplicável.
10. Supervisão: Amaury Pérez Sánchez.
11. Validação: Amaury Pérez Sánchez, Laura Thalía Alvarez Lores.

12. Ecrã: Não aplicável.
13. Redação - rascunho original: Laura Thalía Alvarez Lores, Laura de la Caridad Arias Águila, Lizthalía Jiménez Guerra.
14. Escrita - revisão e edição: Amaury Pérez Sánchez.

7.- Apêndice.

Nomenclatura.

a	Constante a usar na equação (37)	-
a_1	Área de um tubo	M2
a_t	Área da secção transversal do tubo	M2
a_T	Área total de escoamento	M2
A	Área do permutador de calor a usar na equação (37)	M2
A_0	Área provisória de transferência de calor	M2
A_s	Área de fluxo cruzado do fluido lateral da casca	M2
b	Constante a usar na equação (37)	-
C_p	Capacidade calorífica	kJ/kg. K
C_{sb}	Folga do feixe de projéteis	mm
d_e	Diâmetro equivalente ao lado da carcaça (diâmetro hidráulico)	m
d_i	Diâmetro interior do tubo	m
d_0	Diâmetro exterior do tubo	m
D_b	Diâmetro do feixe	m
D_s	Diâmetro da concha	mm
F_t	Fator de correção de temperatura	-
G	Velocidade de massa	kg/s.m ²
h_i	Coefficiente de transferência de calor do lado do tubo	W/m ² . K
h_0	Coefficiente de transferência de calor do lado da casca	W/m ² . K
j_{f1}	Fator de fricção para o fluido do lado do tubo	-
j_{f2}	Fator de atrito do fluido do lado da casca	-
j_{h1}	Fator de transferência de calor do lado do tubo	-
k	Condutividade térmica	W/m.K
k_W	Condutividade térmica do material do tubo	W/m.K
K_1	Constante a usar na equação (13)	-
l_B	Espaçamento dos defletores	mm
L_t	Comprimento do tubo	m
m	Caudal mássico	kg/h
n	Constante a usar na equação (37)	-
n_1	Constante a usar na equação (13)	-
n_p	Número de passagens do lado do tubo	-
N_0	Número de tubos	-
N_{tp}	Número de tubos por passagem	-
p_t	Afinação a válvulas	m
Pr	Número de Prandtl	-

ΔP_t	Queda de pressão do fluido do lado do tubo	Pa
Q	Carga térmica	kW
R	Fator	-
Re	Número de Reynolds	-
S	Fator	-
t	Fluido frio de temperatura	°C
T	Fluido quente de temperatura	°C
\bar{t}	Temperatura média do fluido frio	°C
\bar{T}	Fluido quente a temperatura média	°C
ΔT_{lm}	Diferença de temperatura média logarítmica	°C
ΔT_m	Diferença verdadeira de temperatura	°C
U_0	Coefficiente global de transferência de calor assumido	W/m ² . K
U_c	Coefficiente global de transferência de calor calculado	W/m ² . K
v	Velocidade linear	m/s

Símbolos gregos

ϕ	Fator	-
ρ	Densidade	kg/m ³
μ	Viscosidade	Pa.s

Subíndices

1	Entrada
2	Saída
c	Fluido frio
h	Fluido quente
s	Fluido do lado da carcaça
t	Fluido do lado do tubo

8.- Referências.

- [1] M. Flynn, T. Akashige e L. Theodore, *Kern's Process Heat Transfer*, 2.^a ed. Beverly, EUA: Scrivener Publishing, 2019. <https://dokumen.pub/kerns-process-heat-transfer-2nbsped-9781119364177-9781119364832-9781119363644-1119364175.html>
- [2] E. J. Fernandes e S. H. Krishnamurthy, "Projeto e análise de permutador de calor de casca e tubos," *Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim.*, vol. 13, nº 15, pp. 1-8, 2022. <https://doi.org/10.1051/smdo/2022005>
- [3] P. Bichkar, O. Dandgaval, P. Dalvi, R. Godase e T. Dey, "Estudo do Permutador de Calor de Casca e Tubos com o Efeito de Tipos de Deflectores," *Procedia Manufacturing*, vol. 20, pp. 195-200, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.028>
- [4] R. Ragadhita e A. B. D. Nandiyanto, "Como Calcular e Projetar Permutador de Calor do Tipo Casca e Tubo com uma Única Transferência de Calor," *ASEAN Journal for Science and Engineering in Materials*, vol. 3, nº 1, pp. 21-42, 2024. <https://ejournal.bumipublikasinusantara.id/index.php/ajsem/article/view/400>
- [5] L.-Y. Chen, V. S. K. Adi, e R. Laxmidewi, "Estratégia flexível de concepção de permutadores de calor em casca e tubos para operabilidade de processos," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 37, p. 102163, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102163>
- [6] D. Bogale, "Projeto e Desenvolvimento de Permutador de Calor de Casca e Tubos para Aplicação de Pasteurizadores da Harar Brewery Company (Design Mecânico e Térmico)," *American Journal of Engineering Research*, vol. 03, nº 10, pp. 99-109, 2014. [https://www.ajer.org/papers/v3\(10\)/N0310990109.pdf](https://www.ajer.org/papers/v3(10)/N0310990109.pdf)

- [7] H. N. Purnamasari, T. Kurniawan e A. B. D. Nandiyanto, "Projeto de permutador de calor do tipo concha e tubo para processo de produção de celulose nanofibrila," *International Journal of Research and Applied Technology*, vol. 1, nº 2, pp. 318-329, 2021. <https://ojs.unikom.ac.id/index.php/injuratech/article/view/6410>
- [8] S. P. Chit, P. K. Ma, e C. C. Khaing, "Design Térmico de Permutador de Calor de Casca e Tubos," *Iconic Research and Engineering Journals*, vol. 3, nº 1, pp. 313-318, 2019. <https://www.irejournals.com/formatedpaper/1701405.pdf>
- [9] S. Kashyap, "Projeto de um permutador de calor de casca e tubos," *IJARHIE*, vol. 3, nº 4, pp. 536-550, 2017. <https://ijarie.com/FormDetails.aspx?MenuScriptId=14928&srsId=AfmBOOrg5c2Z1jtVWTTZnLXZyVP8vibVhGOjfhzbpF7esiJJQgjic7>
- [10] D. Singh e N. D. Pal, "Projeto e Avaliação de Desempenho de um Permutador de Calor de Casca e Tubos usando Ansys (Dinâmica Computacional dos Fluidos)," *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science*, vol. 2, nº 3, pp. 427-446, 2016. <https://ijseas.com/volume2/v2i3/ijseas20160348.pdf>
- [11] S. H. Gawande, S. D. Wankhede, R. N. Yerrawar, V. J. Sonawane e U. B. Ubarhande, "Design e Desenvolvimento de Permutador de Calor de Casca e Tubos para Bebidas," *Modern Mechanical Engineering*, vol. 2, pp. 121-125, 2012. <http://dx.doi.org/10.4236/mme.2012.24015>
- [12] F. H. Napitupulu, T. B. Sitorus, H. V. Sihombing, A. H. Siburian e H. Siagian, "Conceção e fabrico de permutador de calor de casca e tubos com casca de uma passagem e tubo de duas passagens como aquecedor de água com água quente de enxofre," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2421, p. 012034, 2023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2421/1/012034>
- [13] J.-F. Zhang, Y.-L. Ele, e W.-Q. Tao, "Um Método de Design e Classificação para Trocadores de Calor de Casca e Tubos com Deflectores Helicoidais," *Journal of Heat Transfer*, vol. 132, pp. 1-8, 2010. <https://doi.org/10.1115/1.4000457>
- [14] R. Mukherjee, "Projetar eficazmente permutadores de calor de casca e tubos," *Chemical Engineering Progress*, pp. 1-17, 1998. <https://www.torr-engenharia.com.br/wp-content/uploads/2011/05/exchanger.pdf>
- [15] S. Kakaç, H. Liu e A. Pramuanjaroenkij, *Permutadores de Calor - Seleção, Classificação e Design Térmico*, 3.ª ed. Boca Raton, EUA: CRC Press, 2012.
- [16] E. Cao, *Transferência de calor em engenharia de processos*. Nova Iorque, EUA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010. <https://dokumen.pub/heat-transfer-in-process-engineering-1nbsped-0071624082-9780071624084.html>
- [17] R. Sinnott e G. Towler, *Design de Engenharia Química*, 6.ª ed. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2020. <https://app.knovel.com/kn/resources/kpCEDE0001/toc>
- [18] R. Mukherjee, *Design Térmico Prático de Permutadores de Calor de Casca e Tubo*. Nova Iorque, EUA: Begell House, Inc., 2004.
- [19] Engenharia Química. (2024) Indicadores Económicos. *Revista de Engenharia Química*. 52.
- [20] D. W. Green e M. Z. Southard, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 9.ª ed. Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill Education, 2019.