

Projeto de um Protótipo de Trocador de Calor

Design of a Heat Exchanger Prototype

Laira Martinelli ^(*); Tamara Aimola Ronca Dale Vedove ^(*); Andrea Borges Vieira Campos ^(*);
 Jessica Miranda Rosa ^(*); Nathalia Silvestrin Barbosa ^(*); Rafael Caon Oliveira ^(*);
 Raul Messias Felix ^(*); Davi Leonardo de Souza ^(*)

^(*) Estudantes de Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil.

⁽⁸⁾ Professor do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil.

E-mails: ⁽¹⁾ laira_martinelli@hotmail.com ⁽²⁾ tamara_aimola@hotmail.com ⁽³⁾ andrea_borges@hotmail.com
⁽⁴⁾ jessicamirandarosa@hotmail.com ⁽⁵⁾ nathy_silvestrin@hotmail.com ⁽⁶⁾ rafael_caon@hotmail.com;
⁽⁷⁾ raul_m19@hotmail.com ⁽⁸⁾ davi.souza@uftm.edu.br

RESUMO: O dispositivo usado para realizar o processo da troca térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas é conhecido como trocador de calor na qual há a entrada e saída do fluido frio e do fluido quente. O trocador de calor mais frequentemente usado em processos industriais é o tipo casco e tubos. Esses equipamentos são amplamente utilizados no aquecimento, resfriamento, evaporação e condensação de fluidos. Trocadores deste tipo têm muitas aplicações nas indústrias de geração de energia, química, farmacêutica e óleo e gás. No presente trabalho é apresentada a metodologia de construção e a teoria utilizada para desenvolver um protótipo de um trocador de calor do tipo casco e tubos em conjunto com uma simulação computacional de uma rede de trocadores de calor. O trocador em questão proporciona uma troca de calor através de escoamento em contracorrente, com a entrada do fluido quente na região interna dos tubos de menor diâmetro e escoamento do fluido frio entre os tubos de cobre e a carcaça. São realizadas medidas de temperatura nas regiões de entrada e de saída que proporcionam uma estimativa da eficiência alcançada com o protótipo.

Palavras-chave Casco e tubos. Protótipo. Trocadores de Calor.

ABSTRACT: The device used to perform the heat exchange process between two fluids at different temperatures is known as a heat exchanger in which there is the inlet and outlet of the cold fluid and the hot fluid. The heat exchanger most often used in industrial processes is the shell type and pipes. Such equipment is widely used in heating, cooling, evaporation and condensation of fluids. Exchangers of this type have many applications in the power generation, chemical, pharmaceutical and oil and gas industries. This paper presents the construction methodology and the theory used to develop a prototype of a shell and tube type heat exchanger in conjunction with a computational simulation of a network of heat exchangers. The heat exchanger in question provides a countercurrent flow of heat through the flow of hot fluid into the inner region of the smaller diameter tubes and the flow of cold fluid between the copper tubes and the casing. Temperature measurements are performed in the input and output regions that provide an estimate of the efficiency achieved with the prototype.

Keywords: Shell and tubes. Prototype. Heat exchangers.

INTRODUÇÃO

Trocadores de calor são dispositivos em que dois fluidos a diferentes temperaturas trocam calor através de uma superfície metálica, podendo ou não ocorrer mudança de fase dos fluidos, na qual ocorre uma transferência de calor por condução e convecção. Essa troca térmica é empregada para atender às exigências de um dado processo. Na indústria petrolífera, são utilizados para a quebra de emulsões entre o petróleo e água, resfriamento de gases advindos de um processo de compressão, condensação e aquecimento de mistura em uma torre de destilação (SANT'ANNA, 2005).

Os trocadores podem ser classificados pelo tipo de serviço que realizam dentro de um processo cuja referência é o fluido principal. (ARAÚJO, 2002).

De acordo com as características construtivas do trocador, ele, também, pode ser classificado como duplo tubo, casco e tubo, tampa flutuante e de tubos em U (ESSEL ELETROMECAÂNICA, SD; REIS 2002).

A escolha do fluido não possui regras pré-estabelecidas, uma vez que o trocador está projetado para receber determinados líquidos no tubo e no casco (REIS, 2002).

A eficiência de um trocador está relacionada a higiene dos tubos, pois durante o processo operacional há deposição de diversos tipos de detritos e incrustação que, por sua vez, prejudicam as trocas de calor, bem como, queda na pressão do fluido (REIS, 2002).

O ponto de partida para o projeto térmico de um trocador de calor está exatamente em se

determinar as condições de processo as quais estará submetido o trocador (ESSEL ELETROMECÂNICA, SD).

Os trocadores de calor são designados por termos correspondentes às modificações que realizam nas condições de temperatura ou estado físico do fluido de processo. No caso de o equipamento operar com dois fluidos de processo, prevalece se possível, a designação correspondente ao serviço mais importante (GANGHIS, 2015).

As temperaturas de operação dos fluidos são determinadas pelo projetista no qual se incumbe à responsabilidade da operação (ESSEL ELETROMECÂNICA, SD). No caso do fluido principal, as condições de vazão e temperaturas de entrada e saída são perfeitamente definidas pelo processo, todavia a condição de operação do fluido refrigerante depende de outros fatores. O exemplo da água, em que a temperatura de entrada depende da disponibilidade, seja proveniente de fontes naturais ou de torres de resfriamento (ESSEL ELETROMECÂNICA, SD). Em relação a temperatura de saída existe o problema de corrosão nos materiais utilizados nos trocadores ou a capacidade de instalação das torres de resfriamento que não permitem uma temperatura elevada na saída (ESSEL ELETROMECÂNICA, SD).

Existem diversos tipos e configurações para realizar o arrefecimento de um fluido quente utilizando um trocador de calor. Um dos mais empregados, e que será abordado neste trabalho, é o do tipo casco e tubo, que consiste, resumidamente, de um casco cilíndrico (carcaça) que contém diversos tubos em seu interior. Dentro da carcaça existem também chicanas, além de barras guias. Os tubos internos são responsáveis pela condução do escoamento do fluido quente e por isso é fundamental que os mesmos sejam feitos de um material com elevada condutividade térmica. As chicanas, por sua vez, têm como função guiar os tubos internos e, também, de provocar um escoamento turbulento dentro da carcaça externa. A troca térmica é realizada através das paredes dos tubos.

O presente trabalho tem por objetivo geral o estudo e o projeto de trocador de calor em série com fluxo contracorrente. Já o objetivo específico é a construção de um protótipo de trocador de calor do tipo casco e tubo que será utilizado no Laboratório da Universidade Federal do Triângulo Mineiro para as práticas da disciplina de Operações Unitárias.

REVISÃO TEÓRICA

Um trocador de calor ou permutador de calor é um dispositivo usado para transferência de calor eficiente de um meio para outro. Tem a finalidade de transferir calor de um fluido para o outro, encontrando-se estes a temperaturas diferentes. Os meios podem ser separados por uma parede sólida, tanto que eles nunca se misturam, ou podem estar em contato (INCROPERA, 2007).

Este processo é comum em muitas aplicações da Engenharia. Podemos utilizá-los no aquecimento e resfriamento de ambientes, no condicionamento de ar, na produção de energia, na recuperação de calor e no processo químico (ALMEIDA, 2008). Em virtude das muitas aplicações importantes, a pesquisa e o desenvolvimento dos trocadores de calor têm uma longa história, mas ainda hoje busca-se aperfeiçoar o projeto e o desempenho de trocadores, baseada na crescente preocupação pela conservação de energia (GANGHIS, 2015).

A criação de micro produtos leva à criação e desenvolvimento de máquinas em microescala. Há trocadores de calor que são utilizados em micro canais, micro reatores, etc. Com este equipamento em miniatura, os processos dispõem mais ainda de integração de sistemas, proporcionando benefícios, bons tempos de resposta e altas taxas de transferência de energia (SHAKIR et al., 2011).

Existem várias aplicações referentes aos trocadores de calor de micro canais, como arrefecimento de microeletrônicos, processos que envolvem biomedicina, metrologia, robótica, telecomunicações e indústrias automotivas. Para melhor compreender o fluxo de calor através de micro canais, muitos estudos experimentais, analíticos e numéricos foram feitos nas últimas duas décadas (SHAKIR et al., 2011, YU; AMEEL 2001).

Tipo de trocador de calor

Trocador de calor é o dispositivo usado para realizar o processo da troca térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas. Este processo é comum em muitas aplicações da Engenharia Química, de Alimentos, entre outras. Abaixo algumas aplicações de trocadores de calor:

Na indústria de alimentos

O processamento de alimentos "*in natura*" requer a transferência de enormes quantidades de energia na forma de calor, portanto, é necessário que um estudo econômico e detalhado deste processo seja efetuado, para que seja evitado o gasto desnecessário de calor (ZAMBELLI, 2011).

Na indústria de alimentos, o calor é usado para garantir o produto desejado de forma segura (microbiologicamente), com boa estocagem e estabilidade durante o armazenamento e de baixo custo. O Calor é aplicado ou removido para causar e controlar a cristalização, coagulação, para gelificar, emulsificar, solidificar, neutralizar, inativar enzimas, pasteurizar, esterilizar, caramelizar, evaporar, liquefazer e etc. (ZAMBELLI, 2011).

A escolha dos meios de aquecimento ou resfriamento requer muito mais do que o conhecimento do consumo de vapor, da água de resfriamento ou dos gases usados em ciclos fechados. O conhecimento dos tipos de trocadores de calor e do processo específico torna-se indispensável para o balanço econômico, precisando então, conhecer as mudanças envolvidas, os equipamentos auxiliares da linha

(bombas e válvulas, por exemplo) e também a eficiência das operações (ZAMBELLI, 2011).

O processo a ser escolhido deve depender da situação econômica, deve ser preferencialmente um sistema contínuo e evitar algumas condições técnicas: O superaquecimento ou super-resfriamento localizado; taxa de transmissão de calor inadequada; pouca ou excessiva agitação do sistema; condições de trabalho variável e pressão muito alta ou muito baixa (ZAMBELLI, 2011).

Em indústrias diversas

A elaboração do açúcar a partir da cana-de-açúcar ou da beterraba é um processo industrial que demanda uma grande quantidade de energia. A otimização do processo depende do bom dimensionamento dos trocadores de calor (BARRIQUAND, 2016).

Nos processos de química verde e biotecnologia, diferentes etapas requerem o uso de trocadores de calor para realizar as operações unitárias de aquecimento, resfriamento, condensação, evaporação e secagem (BARRIQUAND, 2016).

Os trocadores de calor presentes nas lavanderias industriais são escolhidos, dimensionados e fabricados em função dos requisitos de limpeza e da ausência de peças de desgaste (BARRIQUAND, 2016).

Quando a área da troca térmica é grande, o tipo de trocador recomendado é o de carcaça e tubo. Neste tipo de resfriador é possível conseguir elevadas áreas de troca térmica, de maneira econômica e prática, montando-se os tubos em feixes; as extremidades dos tubos são fixadas num espelho. O feixe de tubos é colocado numa envoltória cilíndrica (a carcaça) por onde circula o segundo fluido, em volta do feixe e por entre os tubos (INCROPERA, 2007). De acordo com Incropera (2007), há três tipos básicos de trocadores de calor. São eles: coaxial, casco e tubo e os compactos. Falaremos somente a respeito do trocador utilizado neste presente trabalho.

O escoamento paralelo em todos os tubos e a baixa velocidade contribui para coeficientes de transferência de calor baixos e para pequena queda de pressão. As chicanas são instaladas para aumentar o coeficiente de convecção do fluido no lado do casco. Na configuração deste trabalho temos os fluidos entrando pelas extremidades opostas, conseqüentemente o escoamento em sentidos opostos (contracorrente).

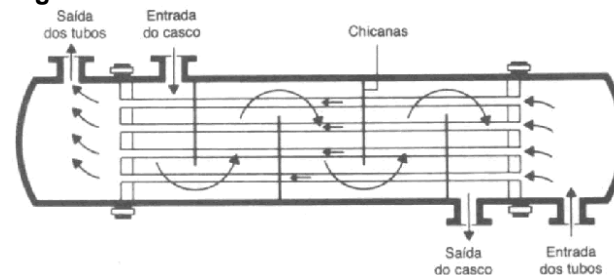
Método da diferença de temperatura média logarítmica (LMTD)

A taxa de transferência de calor pode também ser escrita em função da diferença de temperatura média logarítmica (DTML ou ΔT_{ML}) de acordo com a **Equação 1**, onde F_t é o fator de correção da temperatura. O método da diferença de temperatura média logarítmica consiste na aplicação da equação generalizada de taxa de transferência de calor em um problema puramente convectivo. Com este equacionamento pode-se estimar a taxa de transferência de calor global do trocador de calor conhecendo-se o coeficiente global de transferência térmica (U), a área representativa de troca térmica (A) e a diferença de temperatura média logarítmica (ΔT_{ML}) (SOUZA, 2013).

$$\dot{Q} = UAF_t\Delta T_{ML} \quad (1)$$

Este trocador pode ser visualizado na **Figura 1**.

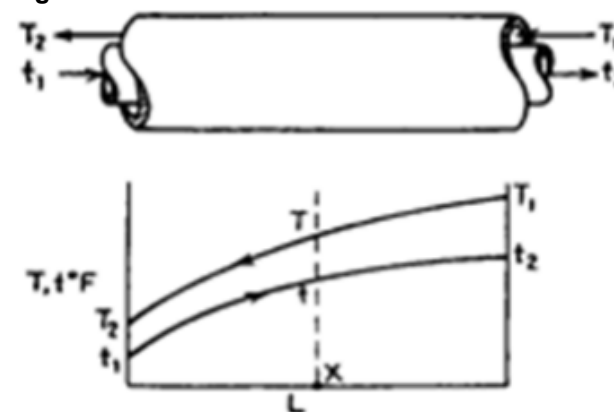
Figura 1 - Trocador de Calor Casca e Tubos.



Fonte: Apostila de Trocador de Calor, Ganghis, 2015.

De acordo com o arranjo de fluxo, os trocadores de calor podem ser classificados de duas maneiras: trocador de calor em fluxo paralelo ou trocador de calor contracorrente. Na configuração de fluxos paralelos, dois fluidos entram no trocador do mesmo lado, e fluem em paralelo um ao outro para o outro lado. Em trocadores de calor contracorrente os fluidos entram no trocador de lados opostos. O projeto contracorrente, observado na **figura 2** é mais eficiente, neste pode-se transferir a maior parte do calor do meio quente (INCROPERA, 2007).

Figura 2 – Escoamento Contracorrente



Fonte: Santos e Stapasolla, 2011.

A temperatura média logarítmica para um trocador de calor com fluxos em contracorrente é dada pela **Equação 2**.

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{in}^h - T_{out}^h)(T_{out}^h - T_{in}^h)}{\ln[(T_{in}^c - T_{out}^c)(T_{out}^c - T_{in}^c)]} \quad (2)$$

O uso do DTML é restrito à trocadores com fluxo contracorrente ou paralelo onde há apenas um passe de fluido pelo casco e um passe de fluido pelos tubos. No caso de outras configurações de trocador, faz-se necessário multiplicar o valor da DTML pelo fator de correção da temperatura (Ft). Este fator é função das constantes S e R e pode ser obtido graficamente para cada configuração diferente de fluxo no trocador (SOUZA, 2013).

As constantes S e R são definidas pela **Equação 3** e pela **Equação 4**, respectivamente.

$$S = \frac{T_{i_{out}} - T_{i_{in}}}{T_{s_{in}} - T_{s_{out}}} \quad (3)$$

$$R = \frac{T_{s_{in}} - T_{s_{out}}}{T_{i_{out}} - T_{i_{in}}} \quad (4)$$

Os valores de ΔT_{ML} , S e R obtidos são ao se substituir os valores das temperaturas de entrada e saída dos fluidos no equipamento na Equação 2, Equação 3 e Equação 4, respectivamente.

O valor de Ft é determinado substituindo-se os valores de S e na Equação 5.

$$F_t = \frac{\sqrt{R^2 - 1} \ln(1 - S) / (1 - RS)}{(R - 1) \ln \frac{2 - S(R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S(R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})}} \quad (5)$$

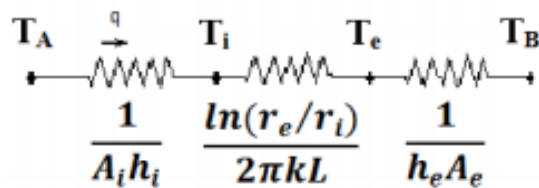
Área de troca térmica

A área de troca (A_0) pode ser escrita em função do coeficiente global de troca térmica (U), mostrado na **Equação 6**.

$$A_0 = \frac{\dot{Q}}{UF_t \Delta T_{ML}} \quad (6)$$

O coeficiente global de transferência de calor (U) é definido como o coeficiente de película global representativo do trocador de calor. O circuito térmico de um trocador duplo tubo está representado na **Figura 3**.

Figura 3 Circuito Térmico de um Trocador de Calor.



Fonte: Santos e Stapasolla, 2011.

Na literatura encontram-se valores representativos de U, como pode ser visto na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Valores representativos do coeficiente global de transferência global de calor.

Fluidos envolvidos		U_0 (W/m ² .k)
Fluido quente	Fluido frio	
Água	Água	1000-2500
Amônia	Água	1000-2500
Gases	Água	10-250
Orgânicos leves*	Água	370-730
Orgânicos pesados**	Água	25-370
Vapor d' água	Água	1000-3500
Vapor d' água	Amônia	1000-3500
Vapor d' água	Gases	25-250
Vapor d' água	Orgânicos leves*	500-1000
Vapor d' água	Orgânicos pesados**	30-300
Orgânicos leves*	Orgânicos leves*	200-400
Orgânicos pesados**	Orgânicos pesados**	50-200
Orgânicos leves*	Orgânicos l pesados**	50-200
Orgânicos pesados**	Orgânicos leves*	150-300

Fonte: BEJAN – Transferência de calor

Ou matematicamente falando, o coeficiente global de transferência pode ser representado pela **Equação 7**.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{A_i h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi K L} + \frac{1}{A_e h_e}} \quad (7)$$

Onde h_i é determinado pela Equação 8.

$$Nu = \frac{h_i L}{K} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad (8)$$

Sendo:

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{K} \quad (9)$$

$$Re_D = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} = \frac{4 \cdot \dot{m}_h}{\pi D_i \mu} \quad (10)$$

Para o escoamento interno, têm-se a **Equação 11**.

$$Nu_D = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0,4} \quad (11)$$

Pela Equação de Hilpert, pode-se determinar o h_e pela **Equação 12**.

$$\bar{Nu}_D = \frac{\bar{h} \cdot D}{k} = C \cdot Re_D^m \cdot Pr^{1/3} \quad (12)$$

Onde, D é o diâmetro do tubo. As constantes C e m são dadas em função do número de Reynolds (Re) pela **Tabela 2**.

Tabela 2 - Valores para Determinação das Constantes.

Re_D	C	m
0,4-4	0,989	0,330
4-40	0,911	0,385
40-4.000	0,683	0,466
4.000-40.000	0,193	0,618
40.000-400.000	0,027	0,805

Fonte: Incropera, 2007.

Método da Efetividade (NUT)

O método da efetividade NUT (ou método ε -NUT) é utilizado quando somente existem informações de condições de contorno a respeito das temperaturas de entrada no trocador de calor. A abordagem de um problema deste tipo pelo método DTML geraria um cálculo por iterações trabalhosas, por isso a preferência ao uso do método NUT. Para a definição da efetividade de um trocador de calor devemos partir da expressão geral para a transferência de calor máxima é dada pela **Equação 13** (INCROPERA, 2007).

$$q_{m\acute{a}x} = C_{\min} \Delta T_{m\acute{a}x} \quad (13)$$

Onde

$$C_{\min} = C_{frio} = \dot{m} \bar{C}_p \quad (14)$$

Sendo C_{\min} equivalente á menor capacidade calorífica entre C_f e C_q . Assim torna-se lógico definir a efetividade (ε) como a razão entre a taxa de transferência de calor real do trocador de calor e a taxa de transferência de calor máxima possível, que pode ser representada pela **Equação 15** (INCROPERA, 2007).

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{m\acute{a}x}} \quad (15)$$

Assim toma-se a efetividade como um adimensional dentro da faixa de $0 < \varepsilon < 1$, sendo a efetividade para qualquer trocador de calor demonstrado como:

$$\varepsilon = f\left(NUT, \frac{C_{m\acute{a}x}}{C_{\min}}\right) \quad (16)$$

Sendo: $\frac{C_{m\acute{a}x}}{C_{\min}}$ é igual à $\frac{C_q}{C_f}$ ou seu inverso dependendo das magnitudes relativas das taxas de capacidade calorífica.

Para trocadores de calor, a definição do número de unidades de transferência (NUT) pode ser escrito de acordo com a **Equação 17** (INCROPERA, 2007).

$$NUT = \frac{U \cdot A}{C_{\min}} \quad (17)$$

Sendo: U: pode ser determinado pela **Equação 7**, e a área (A) pode ser determinada pela **Equação 18**.

$$A = \pi DL \quad (18)$$

No qual a equação matemática que descreve a relação do NUT pode ser encontrado em tabelas disponibilizadas em literatura específica de transferência de calor. A **Equação 19** mostra a relação para o cálculo da efetividade para trocadores de calor do tipo casco e tubos em escoamento contracorrente retirados de uma destas tabelas (INCROPERA, 2007).

Um passe no casco (2, 4, ... passes nos tubos)

$$(NUT)_1 = -(1 + C_r^2)^{-1/2} \ln\left(\frac{E - 1}{E + 1}\right) \quad (19)$$

Sendo:

$$E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}} \quad (20)$$

n passes no casco (2n, 4n, ... passes nos tubos)

Utilizar as Equações 11 e 12 com:

$$\varepsilon = \frac{F - 1}{F - C_r} \quad (21)$$

Sendo:

$$F = \left(\frac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1} \right)^n \quad (22)$$

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (23)$$

Assim:

$$NUT = n(NUT)_1 \quad (24)$$

Trocador de calor casco e tubos

O trocador de casco e tubos, também chamado de espelhos fixos, é composto por um casco cilíndrico, um conjunto de tubos, sendo este colocado paralelamente ao eixo longitudinal do caso (ARAÚJO, 2002). Os tubos são presos, nas extremidades, as placas perfuradas, denominadas espelhos, cada furo corresponde um tubo do feixe (ARAÚJO, 2002). O feixe tubular, constituído de espelhos, mantém os tubos na posição desejada, dos quais estão soldados ao casco, além de servirem como flanges aos quais os carretéis são parafusados (ARAÚJO, 2002). Os tubos que compõem o feixe atravessam várias placas perfuradas, as chicanas, responsáveis pelo direcionamento do fluido que escoar por fora dos tubos e, também, para suportar os tubos (ARAÚJO, 2002).

O trocador de casco e tubos é o mais utilizado na indústria de refino de petróleo, uma vez que possui amplas faixas de vazão, temperatura e pressão (ARAÚJO, 2002). Em geral, é o único que pode ser aplicado em processos que necessitam de grandes áreas de troca de calor, acima de 5000m², pressões acima de 30bar e temperaturas superiores a 260°C (ARAÚJO, 2002). Além do mais, pode operar com líquidos, gases ou vapores, como condensador ou vaporizador, em posição horizontal ou vertical, de acordo com as necessidades operacionais a serem determinadas (ARAÚJO, 2002).

Os arranjos dos divisores de passes, de acordo com a **Figura 4**, conforme o número em que são dispostos no arranjo determina a velocidade do fluido, ou seja, quanto maior o número crescente de passes, tanto no tubo quanto no casco, maior a velocidade de passagem do fluido e troca térmica do mesmo (REIS, 2002).

Figura 4 – Divisores de passes.



Fonte: Reis, 2002.

Quanto à escolha do fluido, o trocador está construído para receber determinados tipos nos tubos e cascos. Não há regras específicas que estabeleçam qual tipo de fluido devem passar pelos tubos. Indubitavelmente, a escolha dos fluidos que passam pelos tubos e pelo casco devem atender às melhores condições de processo, tanto em termos custo, fácil construção e manutenção (REIS, 2002).

Em termos gerais, pelos tubos passam fluidos mais sujos, nos quais há depósitos de coque, sedimentos, catalisadores. Fluidos mais corrosivos requerem tubos mais resistentes a corrosão do que um casco com a mesma propriedade, pois é mais fácil substituir tubos furados do que o casco. Fluidos com maior pressão também passam pelos tubos, porque o casco tem menor resistência em virtude de o

respectivo diâmetro ser maior. Assim, entre fluidos de propriedades semelhantes, devem passar pelos tubos os que possuem maior pressão, temperatura e os mais corrosivos (REIS, 2002).

A deposição e acúmulo de materiais não desejados, como, produtos de corrosão, micro-organismos, partículas inorgânicas e macromoléculas, nas superfícies dos equipamentos de transferência de calor, fenômeno conhecido como incrustação, causam um aumento da resistência à transferência de calor e reduz, com o passar do tempo, o desempenho térmico e hidráulico dos equipamentos. (TONIN, 2003).

O processo de limpeza de um trocador consiste de água em contracorrente, cujo decurso consiste em inverter o fluxo d'água nos tubos, com o equipamento em operação a fim de remover os detritos frouxamente agregados aos tubos (REIS, 2002).

A limpeza por vapor necessita da retirada do trocador em operação. Passa-se vapor pelos tubos, de forma a entrar um respirador e carregar sujeira por um dreno (idem, 2002). Este processo mostra-se eficiente na remoção de graxas, depósitos frouxamente agregados nos tubos e casco (idem, 2002).

A limpeza química faz-se pela circulação de no lado dos tubos e do casco uma solução ácida conjuntamente com um inibidor de corrosão (idem, 2002). O ácido desagrega os resíduos e o inibidor impede o ataque do metal pela solução (idem, 2002). Após a limpeza, é feita a neutralização mediante a uma solução alcalina fraca seguida de uma abundante circulação de água. Neste tipo de limpeza o trocador não precisa ser desmontado (idem, 2002).

A limpeza mecânica requer o desmonte do trocador (idem, 2002). Para tanto, remove-se a tampa do carretel, tampa do casco e a tampa flutuante (idem, 2002). Camadas de lama, graxa e sedimentos frouxos podem ser removidas dos tubos por meio de arames, escovas ou jatos d'água (idem, 2002). Caso os sedimentos estejam muito agregados aos tubos, a ponto de entupi-los, emprega-se o uso de máquinas perfuratrizes, equipamentos que utilizam um eixo metálico giratório dentro dos tubos a fim de expulsar os detritos (idem, 2002).

Do ponto de vista termodinâmico, um trocador de calor geralmente opera de forma a ser um volume de controle em regime permanente (sem variação do fluxo de massa) e a transferência de calor ocorre através de um único tubo ou de um conjunto de tubos. Os escoamentos dos fluidos no trocador podem ser monofásicos ou multifásicos. Não existem meios de realização de trabalho em trocadores de calor (trabalho de eixo, trabalho elétrico, etc.) e as variações de energia potencial e cinética normalmente são desprezíveis (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009).

A transferência de calor, bem como, as variações de entalpia dos fluidos, pode ser determinada com a equação 1.6 na maioria dos trocadores de calor. É sempre mais simples escrever a primeira lei para um volume de controle que engloba todo o trocador de calor, incluindo os dois escoamentos, caso em que é normal admitirmos que a transferência de calor para as vizinhanças seja nula ou desprezível (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009).

MATERIAL E MÉTODOS

Dimensionamento do trocador

Inicialmente, para a construção do protótipo de trocador de calor, casco e tubo, com configuração contracorrente, foram estabelecidas as seguintes variáveis:

- As temperaturas de entrada e saída das duas correntes
- Componentes das correntes: água fria e água quente com suas respectivas vazões;
- A quantidade e diâmetro dos tubos de cobre e
- Diâmetro do casco.

Com esses dados, foi possível calcular o comprimento necessário para a troca térmica. Todos esses valores estabelecidos estão dispostos na primeira coluna denominada "situação A" nas **Tabelas 3 e 4**. O resultado será expresso para uma situação hipotética e servirá para a construção do protótipo. Após a construção do protótipo, foram feitos os testes e com os valores das vazões e temperaturas das correntes, foi refeito o cálculo para comparar com o comprimento hipotético, e assim observar se o protótipo será válido para ser usado como material didático. Os valores do teste também estão dispostos na segunda coluna denominada "situação B" das **Tabelas 3 e 4**.

Foram feitas, as seguintes considerações para os cálculos:

- Perda de calor para a vizinhança desprezível;
- Mudança na energia cinética e potencial desprezível;
- Propriedades constantes;
- Resistência térmica na parede do tubo e fatores de deposição desprezível;
- Condições de escoamento plenamente desenvolvidas na água quente e na água fria (U independe de x)
- valor da constante π igual a 3,14.

Tabela 3 - Dados estipulados

Dados	Situação A	Situação B
Diâmetro tubos de cobre [m]	0,005	0,005
Diâmetro casco [m]	0,100	0,100
Área tubo de cobre [m ²]	$1,963 \cdot 10^{-5}$	$1,963 \cdot 10^{-5}$
Área casco [m ²]	$7,850 \cdot 10^{-3}$	$7,850 \cdot 10^{-3}$
Vazão quente total [kg/s]	0,060	0,025
Vazão fria total [kg/s]	0,025	$4,100 \cdot 10^{-4}$

Tabela 4 – Temperatura

	Situação A			Situação B		
	Te [°C]	Ts [°C]	Tm [°C]	Te [°C]	Ts [°C]	Tm [°C]
Corrente quente	60	40	50	40	60	50
Corrente fria	10	35	22,5	22,5	41	31,75

Os cálculos hipotéticos foram feitos para a situação de resfriamento. Abaixo, segue as propriedades termofísicas utilizadas, na **Tabela 5**. Após a coleta de todos os valores, foram feitos os cálculos que estão na **Tabela 6**. Para os cálculos, considerou-se o método do DTML juntamente com suas respectivas equações representadas pelas equações da revisão bibliográfica.

Tabela 5 - Propriedades termofísicas

Propriedades termofísicas	Situação A		Situação B	
	Tmq	Tmf	Tmq	Tmf
Constante de Prandtl	3,420	5,200	5,200	5,440
Condutividade térmica [W/m.k]	0,645	0,606	0,645	0,615
Capacidade Calorífica (Cp) [J/kg.K]	4183	4183	4183	4183

Tabela 6 - Resultados

Dados calculados	Situação A	Situação B
q [kJ/s]	627,45	257,08
DTML	27,42	18,23
Rei	3975,39	1549,78
Nui	32,47	16,15
hi [W/m ² .K]	4189,13	2083,41
Ree	632,56	229,92
Coeficiente C	0,68	0,68
Coeficiente m	0,47	0,47
Nue	0,89	0,99
he [W/m ² .K]	5,19	6,06
U [W/m ² .K]	4189,32	2083,57
L [m]	0,35	0,43

Portanto, o valor hipotético do trocador foi de 35 cm, ou seja, foram construídos dois trocadores de calor com 17,5 cm cada, e após o teste, os dados mostram que o comprimento necessário seria de 43 cm, ou dois de 21,5 cm, com um erro de 20%, os valores foram próximos. Portanto os trocadores servem como material didático e suas dimensões finais estão descritas na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 – Dados finais

Número de tubos de cobre	8
Comprimento [m]	0,35
Diâmetro interno [mm]	5,00
Diâmetro externo [m]	100,00

Procedimento de montagem

Começou-se cortando os tubos de cobre com auxílio de um cegueta, dividindo-os em 16 partes iguais, sendo 8 para cada trocador. O próximo passo foi serrar o tubo de PVC em duas partes de igual tamanho de 17,5 centímetros, em seguida, foram feitas as chicanas. Para fazê-las, foram usadas tampas de PVC compradas com diâmetro de 150 milímetros que tiveram que ser cortadas para que se adaptassem ao tubo de PVC de 100 milímetros, para realizar o corte utilizou-se uma furadeira Dremel; as chicanas foram cortadas (para deixar o fluido passar de forma alternada em um espaço em torno de 20% da área) com a finalidade de causar maior turbulência e assim uma melhor troca de calor. Foram feitos 8 furos nas chicanas e nas tampas, um para cada tubo de cobre, tentando deixá-los igualmente espaçados dentro do trocador, como pode ser observado pela **Figura 5**. Para a fixação das chicanas dentro dos tubos de PVC, foram utilizados cola quente e silicone, **Figura 6**. Já para as tampas, fez-se o uso de massa plástica, **Figura 7**.

Figura 5 – Chicanas e tubos de cobre



Figura 6 – Interior do trocador de calor



Figura 7 – Tampa do trocador de calor



Os tubos de cobre foram encaixados com as chicanas no interior do tubo, e as tampas foram fixadas, mantendo os tubos de cobre em seu devido lugar. Na primeira montagem (primeiro trocador), como não houve molde para os furos, houve uma irregularidade que dificultou o encaixe dos mesmos, ficando então com espaçamentos desiguais e tortuosos. Portanto, foi necessário ajustá-los manualmente para que ficassem no lugar correto. Para evitar vazamentos, colocou-se durepox ao redor de todos os tubos, garantindo a vedação dos furos nas tampas.

Com tudo fixado e seco, o protótipo estava pronto para ser finalizado. Para isso, o cap foi preparado separadamente. Primeiro foi furado o local onde seria a entrada da mangueira, no centro do cap. Para evitar vazamentos, foi colocado o veda rosca ao redor da mangueira, e foi realizado um teste para verificar a vedação. O teste mostrou que seria necessário a adição de mais um material para vedação. Foi escolhido usar o durepox. Foi posto uma quantidade suficiente da massa para obter os resultados desejados. Por fim, o cap foi encaixado no tubo de PVC, acabando o corpo do primeiro trocador de calor. Para finalizá-los foram feitos ainda dois furos para entrada e saída de água da parte externa do mesmo. Foi realizado um teste, no qual foi verificado um novo vazamento entre tubo de PVC e o cap. Para solucionar esse gargalo, foi utilizado massa plástica. Assim, foi finalizado o primeiro trocador de calor.

Para o início da montagem do segundo trocador de calor, todos os gargalos encontrados anteriormente foram amenizados. Para os problemas do encaixe dos tubos de cobre, foi feito um molde com marcações nas chicanas, o que permitiu acomodar mais facilmente os tubos. Já eram conhecidos os locais onde poderia haver vazamento, então mesmo sem realizar testes, foi colocado massa plástica e durepox nos lugares que eram necessários. Com isso, o segundo trocador de calor foi finalizado mais rapidamente. **A Figura 8** representa os trocadores de calor finalizados.

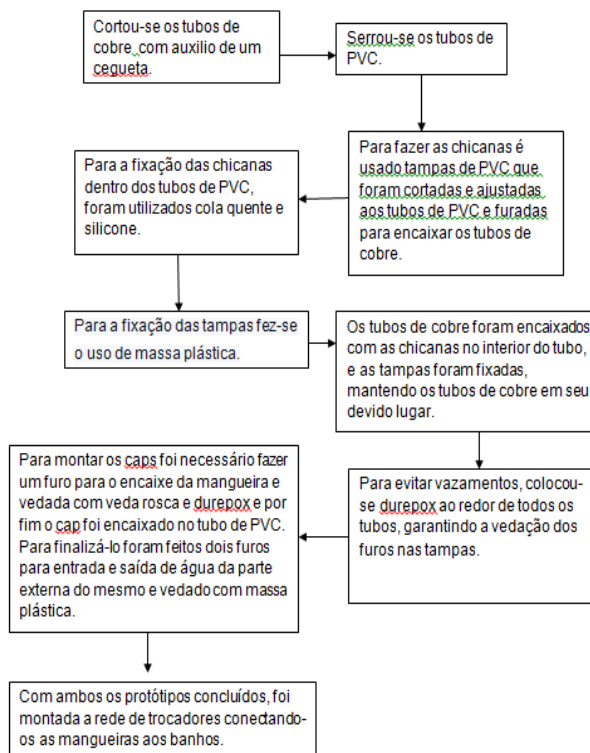
Figura 8 - Trocador de Calor

Com ambos os protótipos concluídos, foi montada a sequência em série dos dois trocadores conectando-os as mangueiras aos banhos e realizando os testes necessários.

Para a construção dos suportes dos trocadores, foram usados suportes de parede que foram adaptados com durepox e foram fixados em tábuas de madeira pequenas. E então, por fim, para uma melhor apresentação, foi passado massa plástica e gesso ao redor de todo o trocador e assim pintou-o de branco como pode ser visto pela **Figura 9**.

Figura 9 – Trocador de calor finalizado

O procedimento pode ser simplificado e demonstrado através do fluxograma da **Figura 10**.

Figura 10 – Fluxograma do processo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na bancada foi montado o sistema para a troca de calor, com 2 banhos termostáticos e os 2 trocadores de calor.

No primeiro teste, os banhos tiveram suas temperaturas de saída ajustadas, porém o intuito do trabalho que era resfriar o sistema foi modificado e foi feito um aquecimento do sistema, isso foi necessário em vista de como seriam interligados os trocadores aos banhos, além de que as temperaturas seriam mais fáceis de serem alcançadas. Com as temperaturas ajustadas de um banho em 60°C e o outro em 40°C, foram então interligados aos trocadores unindo suas mangueiras direto nas saídas dos banhos.

Como a troca térmica foi em um sistema água-água, a mangueira do primeiro trocador de calor que entra com a água nos tubos de cobre, foi ligada a saída da água da torneira, com temperatura ambiente de 22°C. As mangueiras que entram e saem com a água no casco foram interligadas ao banho de 40°C, ou seja, a água recirculava dentro do casco. Os trocadores estão ligados em série, então a mangueira que sai dos tubos do primeiro trocador foi conectada a entrada dos tubos de cobre do segundo trocador, e as mangueiras do casco (entrada e saída) foram ligadas ao banho de 60°C. Então seria medida a temperatura da água que sai dos tubos de cobre. Porém, os banhos têm vazões de saída muito altas e, até o momento não se dispunha de válvulas para regular suas vazões, então os trocadores começaram a vazar, ou seja, as águas começaram a se misturar e o que tinha de ficar só dentro do casco recirculando estava saindo na mangueira de entrada dos tubos de cobre. Foi necessário então abrir os trocadores e verificar suas falhas.

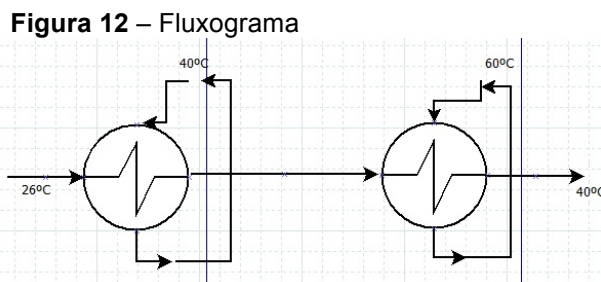
Foram abertos os dois trocadores pelas partes laterais da tampa. O motivo de as águas estarem se misturando era porque estava vazando água ao redor dos tubos de cobre. Foi necessário então fazer uma vedação mais eficiente, pois estavam vedados com durepox, e estes quando duros não aderiam totalmente na volta dos tubos, foi então retirado estes durepox, e vedado novamente com veda calha, um material viscoso, prateado de aspecto borrachuro que se molda diante do objeto. A correção pode ser visualizada na **Figura 11**.



Figura 11 - Trocador de Calor com cap cortado

Um dos trocadores foi reaproveitado e então depois da vedação foi feito um novo teste de vazamento utilizando apenas água da torneira. Como estava tudo certo, as tampas então foram coladas e feito um novo teste, verificando então que não houve mais vazamentos, ou seja, as águas não estavam mais se misturando. O primeiro trocador teve que ser refeito, dando para aproveitar apenas os tubos de cobre, as mangueiras e as chicanas. Com esse novo trocador pronto, foram feitos os testes utilizando a água da mangueira, e neles foi verificado que não havia nenhum vazamento.

Os dois trocadores foram testados e todas as águas saíram na sua mangueira certa. Foi então refeito o teste com os banhos e, para conseguir controlar a vazão dos banhos foram utilizadas duas válvulas esferas e estas foram ligadas as mangueiras dos trocadores e dos banhos, para que mantivessem as vazões estipuladas. Assim, o teste com os banhos deu certo. A temperatura entrou a 22°C (temperatura ambiente) e saiu como prevista, aquecida para 41°C como mostra a **Figura 12** para melhor entendimento.



Teste de eficiência

O teste da rede de trocadores de calor foi feito usando água à diferentes temperaturas como fluidos quente e frio. O fluido frio passa pelo feixe de tubos de cobre, e o fluido quente passa pelo casco de PVC.

Após a verificação de que os dois trocadores envolvidos estavam completamente vedados, sem vazamentos dos fluidos entre o feixe de tubos e o casco, o teste para verificar se os trocadores realmente funcionam pôde ser feito. Para atingir as temperaturas de operação foram utilizados dois banhos, um feito pela empresa Tecnal e o outro pela empresa Marq Labor.

O banho Tecnal foi colocado para operar com temperatura de setpoint de 40°C, enquanto o Marq Labor foi colocado para operar com temperatura de 60°C; por fim, a temperatura real foi de 40,1°C e 59,4°C, diferença que não tem significância para este caso. As vazões utilizadas foram 1,07 kg/min, para o banho Tecnal, e 1,89 kg/min, para o banho Marq Labor.

O fluido que passa pelo casco do primeiro trocador é a água a 40°C, enquanto que no segundo trocador a água entra no casco a 60°C. O fluido frio que passa pelo feixe de tubos, é água da torneira a 22°C e vazão de 0,54 kg/min. A **Figura 13** mostra a disposição dos trocadores durante o teste.

Figura 13 – Sistema de trocadores



O fluido frio teve sua temperatura medida ao sair do segundo trocador de calor, indicando estar a 41°C. Isso mostra que realmente houve troca térmica e que o trocador funciona, podendo ser usado em outras ocasiões.

CONCLUSÕES

Os trocadores de calor desempenham papel importante nas diversas áreas do conhecimento e pesquisa científica e aplicações tecnológicas. Nas indústrias, são usados para aquecer ou resfriar fluidos para usos diversos. Com a realização deste projeto, foi possível a verificação e validação da teoria a respeito de trocadores de calor. Por meio da construção do protótipo, foi possível perceber as dificuldades envolvidas neste processo e o grande número de variáveis que tornam um trocador eficaz. Dentre elas, é possível citar o material utilizado, o sentido do fluxo do fluido de arrefecimento e as vazões das fontes (quente e fria). O material influencia diretamente a troca de calor. Utilizou-se o cobre devido a seu alto coeficiente de condução que proporciona um elevado efeito útil neste caso (resfriamento). O sentido do fluxo neste experimento foi a configuração contracorrente, a qual foi mais eficiente que a configuração na qual os fluidos escoam no mesmo sentido.

Constatou-se também, que ao aumentar demasiadamente a vazão, a eficácia diminuía. Por fim, verificou-se após os testes, que o trocador de calor construído pelos autores (com comprimento de 35 cm - dois trocadores de calor com 17,5 cm cada), deveria possuir um comprimento de 43 cm, ou seja, dois de 21,5 cm. Tal diferença proporcionou um erro de 20%. Portanto, mesmo estes trocadores sendo menor do que o valor teórico calculado, eles obtiveram a mesma eficiência que estes, comprovando então o sucesso do projeto. Deste modo, os objetivos do trabalho foram integralmente satisfeitos, e o protótipo poderá ser utilizado para fins didáticos como experimento prático de operações unitárias no laboratório da Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

ROTEIRO PRÁTICO

Uma prática proposta para ser realizada em laboratórios é descrita a seguir. A prática consiste em calcular o DTML e o fluxo de calor da corrente quente e da corrente fria.

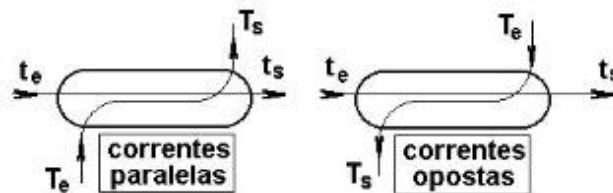
Para o desenvolvimento serão necessários além do protótipo do trocador de calor, 4 termopares para medição das temperaturas e 1 banho termostático. O primeiro passo é conectar as mangueiras do trocador de calor da seguinte forma, a mangueira de entrada do casco é ligada à saída do banho, onde uma

válvula é adicionada para fazer o controle da vazão; a mangueira de saída do casco é ligada à entrada do banho; já a mangueira dos tubos de cobre é conectada à torneira. Após essas conexões é necessário encaixar os termopares nos locais adequados das mangueiras nas entradas e saídas do trocador para que as temperaturas possam ser aferidas a cada intervalo de tempo pré-estabelecido. Em seguida, ao ligar o banho e abrir a torneira para dar início ao processo, dispara-se o cronômetro no mesmo momento e começa a anotar as temperaturas num intervalo de 3 em 3 minutos até que se completassem 30 minutos.

Passado os trinta minutos desconectam-se as mangueiras e medem-se as vazões volumétricas (Q_v) do fluido quente e do fluido frio que foram utilizadas. Essas vazões devem estar na unidade de (m^3/s). Com o valor da vazão volumétrica o próximo passo é encontrar a vazão mássica que se calcula com a multiplicação da vazão volumétrica pela massa específica do fluido, no caso que é a água, que possui um valor tabelado de $\rho=1000 \text{ kg}/m^3$. Com a vazão mássica calculada é preciso encontrar o ΔT do fluido quente e do fluido frio. Que é a diferença da temperatura maior com a menor. Com todos os dados obtidos o fluxo de calor (Q) pode ser calculado a partir da **Equação 1** e assim obtêm-se o fluxo de calor para cada intervalo de temperatura.

Depois do fluxo de calor Q calculado para o fluido frio e para o fluido quente, agora se calcula a média logarítmica o DTML em cada posição do tempo cronometrado. Para o cálculo do DTML, é necessário saber em qual sentido as correntes foram ligadas, em correntes opostas ou correntes paralelas.

Figura 14 – Correntes paralelas e correntes opostas



As diferenças de temperatura entre os fluidos nas extremidades do trocador, para o caso de correntes paralelas, são: onde o ΔT_1 é a diferença entre as temperaturas quente de entrada menos a temperatura fria de entrada. O ΔT_2 também é o diferencial da temperatura quente de saída com a fria de saída. Ou seja, é a diferença entre as temperaturas do mesmo sentido. No caso das correntes opostas, as diferenças são o ΔT_1 é a diferença da temperatura quente de entrada menos a temperatura fria de saída. O ΔT_2 é a diferença entre a temperatura quente de saída e a temperatura fria de entrada. Ou seja, é a diferença entre as temperaturas opostas. Com os valores do ΔT_1 e do ΔT_2 resta calcular a média logarítmica DTML.

Além desses valores calculados, é possível fazer dois gráficos, um gráfico para o fluxo de calor quente pelo tempo e outro para o fluxo de calor frio pelo tempo; com posse desses gráficos, analisa-se a tendência do fluxo de calor com o tempo.

LISTA DE ABREVIATURAS

Símbolos	Significado	Símbolos	Significado
U	Coefficiente Global de Transferência Térmica	$T_{t_{out}}$	Temperatura Quente de Saída
A	Área de Troca Térmica	$T_{t_{in}}$	Temperatura Quente de Entrada
ΔT_{ML} ou DTML	Diferença de Temperatura Média Logarítmica	$T_{s_{in}}$	Temperatura Fria de Entrada
Q	Fluxo de Calor	$T_{s_{out}}$	Temperatura Fria de Saída
Nu	Nusselt	Re	Número de Reynolds
Pr	Prandtl	C_p	Capacidade Calorífica
D	Diâmetro	ρ	Densidade
q_{min}	Fluxo de Calor Mínimo	C_{min}	Capacidade Calorífica Mínima
ΔT_{max}	Varição de temperatura máxima	C_{frio}	Capacidade Calorífica do Frio
ϵ	Efetividade	q_{max}	Fluxo de Calor Máximo
C_{max}	Capacidade Calorífica Máxima	T_e	Temperatura de Entrada
T_s	Temperatura de Saída	T_m	Temperatura Média
T_{mq}	Temperatura Média Quente	T_{mf}	Temperatura Média Fria
Rei	Reynolds Interno	Ree	Reynolds Externo
Nui	Nusselt Interno	Nue	Nusselt Externo
h_i	Coefficiente Convectivo Interno	h_e	Coefficiente Convectivo Externo
T_{out}^h	Temperatura de saída quente	A_e	Área Externa
μ	Viscosidade	L	Comprimento
T_{in}^c	Temperatura de entrada fria	r_i	Raio Interno
T_{out}^c	Temperatura de saída fria	A_i	Área Interna
T_{in}^h	Temperatura de entrada quente	r_e	Raio Externo

REFERÊNCIAS

ALMEIDA,G.; ALVES,G.S ; DOMINGOS J.; ALMEIDA,J; FREITAS,M. ; PACHECO,M. ; VALENTE,M. ; KOLASCO,N. ; PEREZ,P. Trocadores de Calor. 2008. Disponível em: < <http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/trocador/index.htm> >. Acesso em: 18 mar. 2011.

ARAÚJO, Everaldo César da Costa. Trocadores de Calor. São Carlos: EdUF SCAR, 2002. 102P. (Apontamentos).

BARRIQUAND. TECHNOLOGIES THERMIQUES. 2016. Especialista em trocador de calor. Disponível em: < <http://www.barriquand.com/pt/> >.

BEJAN, A, Transferência de Calor. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1998

BORGNACKE, Claus; SONNTAG, Richard E.. Fundamentos da Termo-dinâmica. 7. ed. São Paulo: Blucher, 2009. 659p.

ESSEL ELETROMECAÂNICA. Trocadores de Calor. SD. 243p. Disponível em: <http://www.essel.com.br/cursos/03_trocadores.htm>. Acesso em: 20 Mar. 2011

GANGHIS, D., Apostila do Curso de Transferência de calor;Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET/BA.

INCROPERA, F.P., 2007, Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7. Ed. New York; John Wiley & Sons.

- REIS, Carlos V., Curso de formação de Operadores de Refinaria: Equipamentos Estáticos. Curitiba. Centro Universitário da Positivo, 2002. 105f. Apostila. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/equipamentos-estaticos-petrobras-pdf-a81287.html>>. Acesso em: 18 mar. 2011.
- SHAKIR, A . M.; MOHAMMED, A . K.; HASAN, M. I., Numerical investigation of counter flow microchannel heat exchanger with slip flow heat transfer, International Journal of Thermal Sciences, v. 50, p. 2132-2140. 2011.
- SANT'ANNA, Andréia Abrahão. Simulação de processamento de gás natural em plataforma off-shore. 2005. 126f. Monografia (Especialização em Petróleo e Gás Natural) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <www.anp.gov.br/.../Andreia-Abrahamo_SantAnna_PRH13_UFRJ-EQ_G0.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2011.
- SOUZA, Monique. Análise Térmica de um Trocador de Calor do tipo Casco e Tubos para Resfriamento do Resíduo de uma Unidade de Destilação Atmosférica. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007837.pdf>>. Acesso em 11/11/2015.
- TONIN, Paulo Cesar. Metodologia para monitoramento do desempenho térmico de redes de trocadores de calor. 2003. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – CEFET-PR, Curitiba, 2003. Disponível em: <http://www.ppgem.ct.utfpr.edu.br/dissertacoes/TONIN,%20Paulo%20Cesar.pd>. Acesso em: 16 mar. 2011
- ZAMBELLI, Rafael A. Trocadores de Calor na Indústria de Alimentos [Parte 01]. 2011. Food Engineering World. Disponível em: <<http://foodengineeringworld.blogspot.com.br/2011/01/trocadores-de-calor-na-industria-de.html>>.
- YU S.; AMEEL T. A., Slip-flow heat transfer in rectangular microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer. v. 44, p. 4225-4234, 2001.