

UTILIZAÇÃO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL PARA OTIMIZAÇÃO DE EFICIÊNCIA EM UM TROCADOR DE CALOR CASCO TUBO

*USE OF COMPUTATIONAL FLUIDODYNAMICS TO OPTIMIZE EFFICIENCY
IN A HULL TUBE HEAT EXCHANGER*

Eduardo Franzoi¹

Rafaela Bohaczuk Venturelli Knop²

RESUMO: Este trabalho, apresenta um estudo de Fluidodinâmica Computacional (CFD), de um trocador de calor de casco e tubo (TCCT), utilizando o pacote computacional ANSYS. O objetivo principal do trabalho é demonstrar a otimização da troca de calor no equipamento utilizando diferentes parâmetros de entrada no programa e encontrar a configuração em que a troca térmica seja máxima mantendo a mesma geometria do trocador. A utilização do recurso computacional gera um ganho de tempo e também financeiro por não necessitar alterar a produção ou fazer paradas não programadas em uma unidade fabril, bem como não correr o risco de ter um produto fora de especificação, evitando assim, prejuízo financeiro. No domínio computacional utilizou-se o modelo de turbulência $k-\epsilon$. Os resultados obtidos foram validados com a convergência de malha. Por fim, concluiu que para as condições apresentadas a configuração onde o fluido quente escoava através do casco resultou em uma melhor eficiência.

Palavras-chave: CFD; Trocador de calor; ANSYS; Simulação;

ABSTRACT: *This work presents a study of Computational Fluid Dynamics (CFD), a shell and tube heat exchanger (TCCT), using the ANSYS computational*

¹ Acadêmico do curso de Engenharia Química da UNIFE. *E-mail:* Eduardo.franzoi@unifebe.edu.br

² Professora orientadora. Doutora em Engenharia Química. *E-mail:* rafaela.knop@unifebe.edu.br

package. The main objective of the work is to demonstrate the optimization of the heat exchange in the equipment using different input parameters in the program and to find a configuration in which the thermal exchange is maximum, maintaining the same exchanger geometry. The use of computational resources generates time and financial savings as it does not need to change production or make unscheduled stoppages in a manufacturing unit, as well as not running the risk of having a product out of specification, thus avoiding economic loss. No computational domain used the $k - \epsilon$ turbulence model. The obtained results were validated with mesh convergence. Finally it was concluded that for configuration conditions where hot fluid flows through the hull results in better efficiency.

Keywords: CFD; Heat exchanger; ANSYS; Simulation;

1 INTRODUÇÃO

Os trocadores de calor são equipamentos responsáveis por realizar a troca de calor entre dois fluidos que estão a diferentes temperaturas e encontram-se separados por uma parede sólida. Os trocadores de calor são utilizados em diversas aplicações tais como: processos da indústria química, condicionadores de ar e aquecimento de ambientes (ÇENGEL & GHAJAR 2012).

Em trocadores de calor casco tubo, a principal forma de transferência de calor é realizada através da convecção, entretanto, a condução também se faz presente atuando através da parede que divide os dois fluidos, fazendo com que o cálculo do coeficiente global de transferência de calor, U , seja realizado para alcançar de um valor que envolve todas as transferências de calor envolvidas no sistema (ÇENGEL & GHAJAR 2012).

O objetivo do trabalho é realizar uma simulação numérica utilizando um software de CFD do inglês (*Computational Fluid Dynamics* – Dinâmica dos Fluidos Computacional). Softwares CFDs são ferramentas que tem como

Utilização De Fluidodinâmica Computacional Para Otimização De Eficiência Em Um Trocador De Calor Casco Tubo

principal função realizar a simulação numérica computacional, obtendo resultados satisfatórios quando comparado com dados analíticos.

A utilização de *Softwares* CFD permite que o tempo necessário para desenvolver um produto se torne mínimo pois reduz a necessidade de protótipos físicos, um exemplo pode ser aplicado ao trocador de calor, uma simples análise de alteração em fluido de casco e fluido de tubo para análise de eficiência de troca térmica levaria um tempo considerável para realizar a alteração das entradas e saídas de fluido. Sendo necessário várias horas de trabalho e até uma interrupção na linha de produção que poderiam ser evitadas por meio de simulação, que além do tempo pouparia também os gastos de matéria prima.

Para desenvolver este trabalho foi necessário relacionar alguns objetivos específicos tais como apresentar uma introdução a fluidodinâmica computacional e suas equações envolvidas, modelar e analisar uma possível melhoria na eficiência de troca térmica de um trocador de calor alterando os domínios de fluido quente e frio e comparar os resultados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os trocadores de calor estão presentes em inúmeros processos industriais. Sendo utilizados para transferir energia térmica (entalpia) entre dois ou mais fluidos que se encontram em diferentes temperaturas. O processo é realizado por meio de uma superfície sólida fazendo com que os fluidos não se misturam (SHAH; SEKULIÉ, 2003).

Dentre todos os tipos de trocadores de calor o modelo casco e tubo são os mais utilizados entre os processos industriais totalizando um percentual de mais de 90% (KUPPAN, 2000). Geralmente, são a primeira escolha devido a existência de procedimentos bem estabelecidos para projetá-los e fabricá-los a partir de uma grande variedade de materiais, além de fornecer muitos anos de serviço satisfatório. Eles são produzidos na mais ampla variedade de tamanhos e estilos, e virtualmente não há limite na temperatura e pressão de operação (THULUKKANAM, 2013).



2.1 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAIS (CFD)

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) é uma tecnologia computacional utilizada para simular o comportamento de sistemas que envolvem fluxo de fluidos e transferência de calor e massa e mudança de fase, entre outros processos físicos. Esta simulação é realizada através da resolução das equações de fluxo do fluido sobre uma região de interesse, conforme especificado nas condições de fronteira desta região (SIMÕES, 2009).

O conjunto de equações diferenciais parciais conhecidas com equações de Navier Stokes obtidas no início do século XIX descrevem os processos de momento, calor e massa. Mesmo não tendo solução analítica as equações podem ser discretizadas e resolvidas numericamente. Estas equações são apresentadas como:

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = \mu \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x$$

Eq. (1)

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = \mu \left[\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y$$

Eq. (2)

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \mu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z$$

Eq. (3)

Existem diferentes métodos numéricos utilizados nos códigos CFD. O método mais comum, é aquele no qual o ANSYS é programado para executar, conhecido como técnica de volumes (ou elementos) finitos (SIMÕES, 2009).

Nesta técnica o *Software* CFD divide a região de interesse em pequenas sub-regiões, conhecidas como volumes de controle. As equações são discretizadas e resolvidas iterativamente para cada volume de controle. Como resultado, pode ser obtido, uma aproximação do valor de cada variável em pontos específicos ao longo do domínio (MIRANDA et al, 2010).

2.2 MALHA DE VOLUMES FINITOS

O método de malha de volumes finitos é uma ferramenta de solução (aproximada) das equações de balanço de quantidade de movimento e balanço de massa através da discretização do domínio de interesse em um número finito de volumes de controle. Sua utilização em todos os ramos de pesquisa (acadêmico e industrial) na área de fenômenos de transporte já é bastante difundida e seus resultados são bastante confiáveis.

O Software ANSYS conta com a possibilidade de utilização de malhas estruturadas que por sua vez permitem uma fácil ordenação obtendo matrizes diagonais, porém as malhas estruturadas não conseguem atender todas as necessidades de simulação devido à complexidade da geometria, fazendo-se necessário à utilização de malhas não estruturadas que além de serem versáteis demonstraram excelentes resultados para geometrias irregulares (OLIVEIRA, 2011)

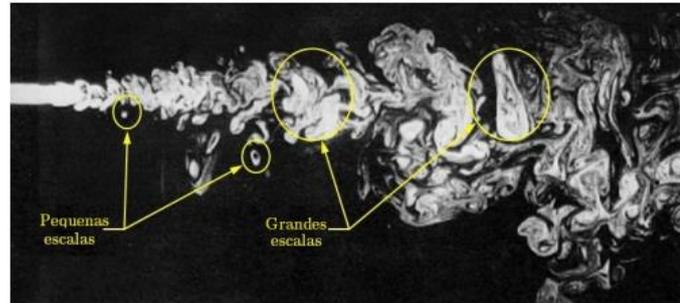
2.3 CARACTERIZAÇÃO DA TURBULÊNCIA

As teorias disponíveis para analisar o escoamento de um fluido desprezam efeitos importantes da viscosidade e da compressibilidade. O principal motivo é que o comportamento do fluido durante o escoamento sofre uma mudança considerável, onde, o escoamento deixa de ser considerado laminar e torna-se turbulento. Essa transição ocorre devido a troca de energia no escoamento resultando em dissipação de energia e também pela rugosidade da parede onde o fluido realiza o escoamento (WHITE, 2011).

O escoamento quando turbulento pode ser considerado como um fenômeno complexo pois envolve muitos graus de liberdade que consiste em flutuações de escalas e frequências variadas à medida que o número de Reynolds aumenta. Na Figura 1 é possível observar um escoamento de um jato livre onde é visível a formação das grandes e pequenas escalas (ANSYS, 2016).



Figura 1 – escoamento turbulento de um jato livre

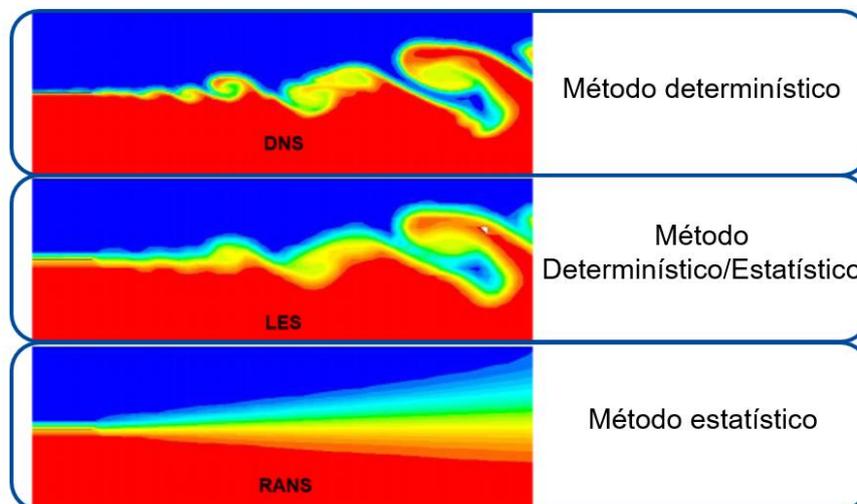


Fonte: (Adaptado) ANSYS Inc. (2016)

2.5 MÉTODOS NUMÉRICOS DE SIMULAÇÃO

Segundo Barth (2016) para solucionar numericamente um escoamento utilizando fluidodinâmica computacional é possível utilizar três modelagens de solução, o primeiro deles é pelo método determinístico conhecido como Solução Numérica Direta (DNS do inglês, *Direct Numerical Solution*). O segundo é um método estatístico conhecido como LES (*Large Eddy Simulation*) e por fim temos o método estatístico RANS (*Reynolds averaged Navier Stokes methods*). A seguir na Figura 2 é possível observar uma representação da solução de um escoamento turbulento de jato livre utilizando os métodos DNS, LES e RANS.

Figura 2 - Solução de um escoamento turbulento de jato livre pelo método DNS, LES e RANS



Fonte: (Adaptado) ANSYS Inc (2016)

2.5.1 Método DNS

No método de Solução Numérica Direta as equações de Navier Stokes que descrevem os escoamentos laminares e turbulentos no tempo e no espaço podem ser resolvidas numericamente sem a necessidade qualquer informação adicional.

A utilização do modelo DNS requer uma grande quantidade de recursos computacionais tornando inviável a sua utilização para resolver situações práticas em escalas industriais (CHUNG, 2002).

2.5.2 Método LES

A utilização do modelo *Large Eddy Simulation* possibilita resolver as escalas de turbulência de forma customizada onde as grandes escalas são resolvidas diretamente e as escalas menores são submetidas a uma decomposição média e resolvidas por um método estatístico. Mesmo utilizando a decomposição das pequenas escalas o método LES utiliza grandes recursos computacionais exigindo alto poder de processamento, porém é menor em comparação ao método DNS (CORRÊA, 2016).

2.5.3 Método RANS

O método RANS também conhecido como Navier Stokes médias de Reynolds é um método onde todas as escalas de turbulência são modeladas a partir da função média das variáveis no tempo e no espaço. A estratégia é conhecer como a turbulência afeta o escoamento de forma precisa, não sendo necessário detalhar as suas flutuações (CHUNG, 2002).

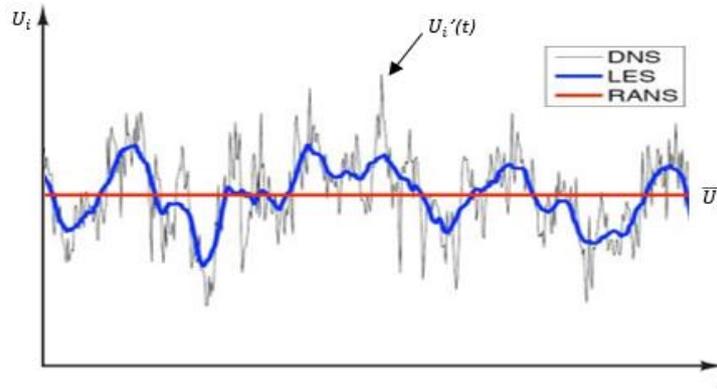
2.6 EQUAÇÕES DE NAVIER STOKES MÉDIAS DE REYNOLDS

Como descrito anteriormente, o modelo RANS utiliza a decomposição das variáveis do escoamento representando uma quantidade média e outra flutuante no tempo. As equações de Reynolds são estabelecidas a partir da decomposição

Utilização De Fluidodinâmica Computacional Para Otimização De Eficiência Em Um Trocador De Calor Casco Tubo

de escalas variáveis de flutuação temporal. Na Figura 3 pode ser observado uma representação gráfica das modelagens matemáticas DNS, LES e RANS.

Figura 3 – Representação gráfica dos métodos DNS, LES e RANS



Fonte: (adaptado) Versteeg e Malasekera (2007)

A consideração da turbulência em métodos numéricos, diferente da Simulação Numérica Direta resulta em novas variáveis desconhecidas nas equações governantes de Navier Stokes, fazendo-se necessário a introdução de novas equações para completar o sistema. Sendo assim temos que a velocidade U_i pode ser dividida em um termo médio, \bar{U}_i e em um componente variante no tempo U_i' como:

$$U_i = \bar{U}_i + u_i'(t) \quad \text{Eq. (4)}$$

Esse componente médio pode ser obtido da seguinte forma:

$$\bar{U}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U_i' dt \quad \text{Eq. (5)}$$

No qual Δt é uma grande escala de tempo quando comparada as escalas das flutuações turbulentas, porém menor quando comparada a constante de tempo para cada uma das variações.

Desta forma, temos as seguintes equações que podem ser utilizadas:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad \text{Eq. (6)}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad \text{Eq. (7)}$$

Utilização De Fluidodinâmica Computacional Para Otimização De Eficiência Em Um Trocador
 De Calor Casco Tubo

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \bar{\varphi}) \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde os últimos termos $\left(\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \right)$ e $\left(\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \bar{\varphi}) \right)$ nas duas últimas equações são conhecidos respectivamente como Tensores de Reynolds e Fluxos de calor turbulento descrevendo as flutuações causadas pela turbulência nas equações de transporte (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

A aproximação de Boussinesq, proposta em 1877 pode ser utilizada para interpretar os termos pois, os Tensores de Reynolds são assumidos como proporcionais às taxas de deformação média. Sendo assim descritos como:

$$-(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \quad \text{Eq. (9)}$$

$$-\rho \bar{u}_i \bar{\varphi} = \frac{\mu_t}{Pr_t} \left(\frac{\partial h}{\partial x_k} \right) \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde μ_t é a viscosidade turbulenta que deve ser modelada, k é a energia cinética turbulenta, δ_{ij} é o operador Delta de Kronecker e Pr_t é o número de Prandtl turbulento.

Para completar o sistema de equações na modelagem RANS deve-se introduzir a equação de Modelos da Viscosidade Turbulenta (*Eddy Viscosity Models*) pois é o mais econômico em recursos computacionais e também é o método utilizado pelo *Software Ansys*.

Por não exigir elevados níveis computacionais no presente trabalho será feita a utilização da modelagem RANS com o modelo numérico de turbulência $k-\epsilon$. O modelo standard $k-\epsilon$ de Launder e Spalding (1974), é um modelo baseado em duas equações de modelagem calculando a energia cinética turbulenta k , e sua taxa de dissipação ϵ (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Ou seja, ele assume que a viscosidade turbulenta está ligada à energia cinética turbulenta e a sua taxa dissipação que é dada pela seguinte relação:

Utilização De Fluidodinâmica Computacional Para Otimização De Eficiência Em Um Trocador De Calor Casco Tubo

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{Eq. (11)}$$

onde C_μ é uma constante adimensional.

Os valores de k e ε são alcançados através das seguintes equações (ANSYS INC, 2016):

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \quad \text{Eq. (12)}$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad \text{Eq. (13)}$$

onde $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_ε e σ_k são as constantes adimensionais do modelo; P_{kb} e $P_{\varepsilon b}$ representam as forças de empuxo que devem ser consideradas uma vez que o modelamento do trocador foi realizado levando em consideração as pressões de saída. Por fim P_k é a produção de energia cinética turbulenta dada por:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad \text{Eq. (14)}$$

As constantes adimensionais do modelo são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Constantes do modelo k-ε

CONSTANTES DO MODELO K-ε					
Constante	C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
Valor	0,09	1,44	1,92	1	1,3

Fonte: (Adaptado) Versteeg e Malasekera (2007)

O modelo regido pelas equações (12), (13) e (14) apesar de conseguir bons resultados em escoamentos externos não é indicado para aplicações em escoamentos com curvaturas, jatos axi-simétricos e escoamentos com mudanças abruptas em malhas não refinadas. No entanto, ele é útil para muitos

outros escoamentos na engenharia pois é simples, robusto e opera com baixo poder computacional (ANSYS INC, 2016).

2.7 EFICIÊNCIA DE TROCA TÉRMICA

A eficiência térmica η_e pode ser definida como a razão entre a taxa real de transferência de calor \dot{q} e a taxa máxima de transferência de calor possível no trocador \dot{q}_{max} conforme equação (15) e (16).

$$\eta_e = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_{max}}; \quad \text{Eq. (15)}$$

$$\dot{q}_{max} = C_{min}(T_{q,e} - T_{f,e}) \quad \text{Eq. (16)}$$

Onde: η_e é eficiência térmica; \dot{q} determina a taxa de calor trocado; \dot{q}_{max} é a taxa máxima de calor trocado; C_{min} é o menor valor do produto estabelecido pela relação entre pressão constante e vazão mássica. $T_{q,e}$ Estabelece a temperatura de entrada do fluido quente e por fim $T_{f,e}$ é a temperatura de entrada do fluido frio.

De posse do valor destas variáveis é possível avaliar a eficiência da troca térmica de um trocador de calor.

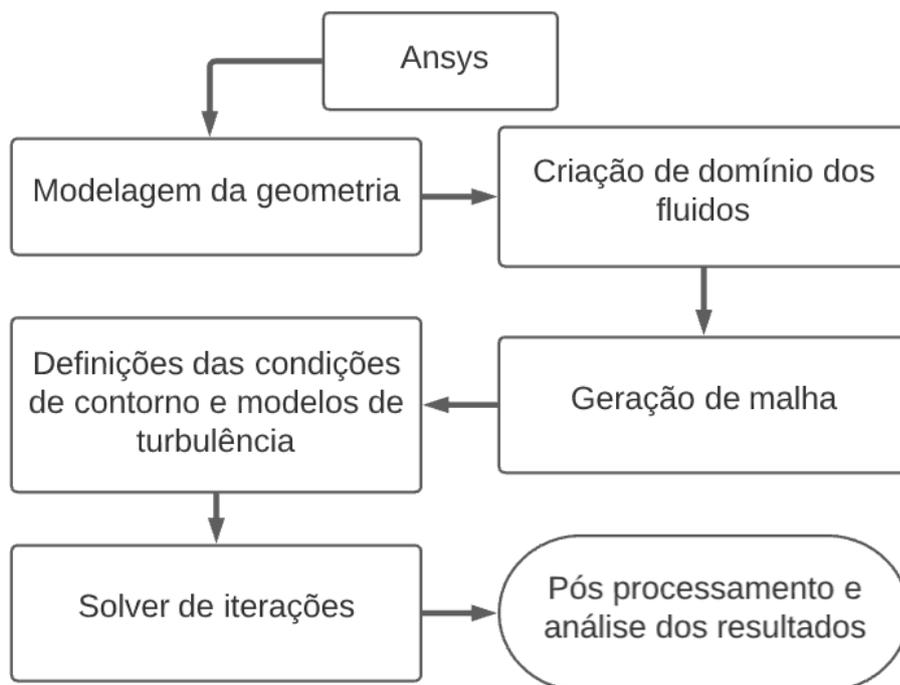
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 MONTAGEM DA SIMULAÇÃO GEOMÉTRICA

Para início da simulação, é necessário definir a geometria do problema, que começa com o desenho, em 3D, do trocador de calor no ANSYS. Após o fechamento da geometria, é definido o limite para cada um dos fluidos que serão avaliados no programa. O terceiro passo é a geração da malha, ou seja, a definição do tamanho de cada volume a ser simulado, quanto menor a malha maior o esforço computacional, porém, os resultados também serão mais refinados.

O quarto passo é a definição das condições de contorno e modelos de turbulência a serem simulados, ou seja, a delimitação de como o problema será solucionado. O quinto passo é a simulação em si, onde as iterações serão realizadas e o programa fará seu maior trabalho. O passo final é o tratamento dos resultados e análise dos gráficos gerados, conforme mostra resumidamente a Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma da modelagem geométrica



Fonte: Os autores, 2021

3.3 EQUIPAMENTO UTILIZADO NA SIMULAÇÃO

Para realizar as iterações da malha e para solução dos resultados foram utilizados um computador com processador Intel Core I7-7700HQ com quatro núcleos de 3.4GHz com 8Gb de memória RAM operando em conjunto com uma placa gráfica NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti de 4Gb.

3.4 MODELAMENTO DO TROCADOR DE CALOR

O trocador utilizado para a simulação foi um trocador casco tubo sem chicanas constituído em sua totalidade de Aço Inox AISI 405 possuindo dois

Utilização De Fluidodinâmica Computacional Para Otimização De Eficiência Em Um Trocador De Calor Casco Tubo

volumes, um de fluido frio e outro fluido quente com as dimensões estabelecidas na Tabela 2

Tabela 2 - Dimensões do trocador de calor

DIMENSÕES DO TROCADOR DE CALOR

Descrição	Valor (mm)
Comprimento do Total do Trocador	528
Comprimento total dos tubos internos	408
Diâmetro externo do casco	102
Diâmetro interno do casco	100
Diâmetro Interno dos tubos internos	20
Espessura de todos os componentes	2
Diâmetro interno da entrada e saída dos tubos	20
Diâmetro interno da entrada e saída do casco	20

Fonte: Os autores, 2021

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir das informações descritas na Tabela 4 foi possível realizar o modelamento 3D do trocador de calor e definir seus volumes dos corpos “molhados”, ou seja, os volumes que serão ocupados no trocador conforme Figura 5.

Figura 5 - Modelamento do trocador de calor (vista isométrica)



Fonte: Os autores, 2021

Com o modelamento do trocador apresentado na Figura 5 foi possível extrair os volumes de fluido que irão realizar a troca térmica no casco e no tubo.

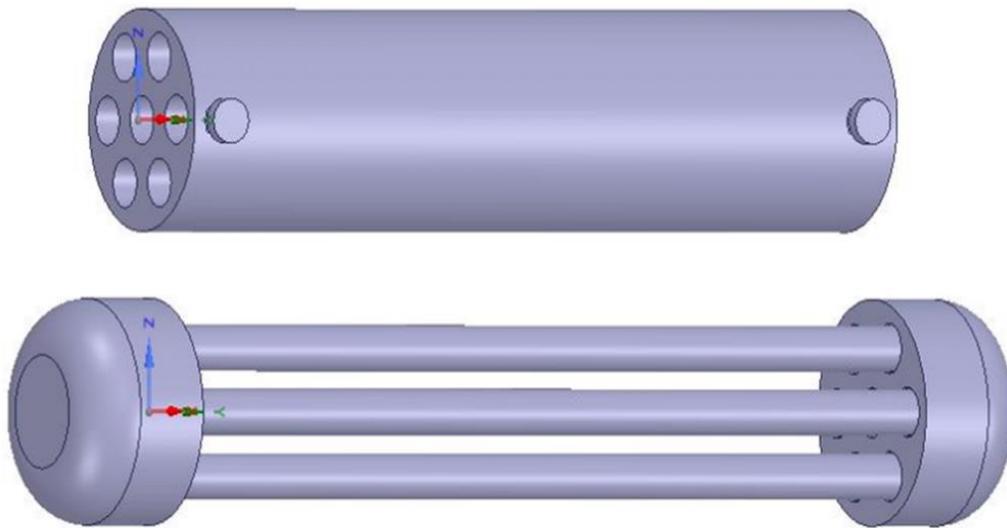
Utilização De Fluidodinâmica Computacional Para Otimização De Eficiência Em Um Trocador
De Calor Casco Tubo

É importante ressaltar que é indispensável realizar a correta seleção de geometrias entre fluido quente frio.

A partir dos volumes de controle o *Software* ANSYS realizou a interação de malha entre fluido e sólido, fator que incide diretamente na troca térmica entre as paredes do trocador uma vez que os fluidos não entram em contato direto.

A seguir na Figura 6 é possível observar os volumes de fluido quente e frio que ocupam a parte interna do trocador.

Figura 6 - Corpo molhado do casco e tubo



Fonte: Os autores, 2021

Com a análise individual de cada corpo molhado foi possível, a partir do *Software* ANSYS, determinar os volumes e as áreas de cada geometria pela troca térmica ao longo do trocador, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades dos corpos molhados

PROPRIEDADES DOS CORPOS DE TROCA TÉRMICA

Componente	Volume (L)	Área ocupada (m ²)
Corpo molhado (casco)	1,862	0,343
Corpo molhado (tubos)	1,364	0,227
Total	3,226	0,570

Fonte: Os autores, 2021

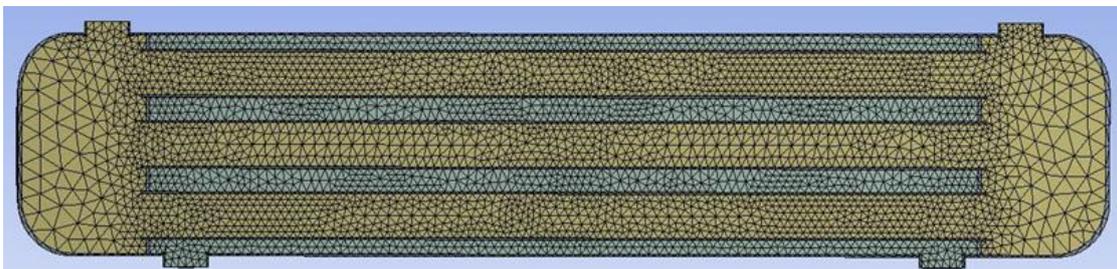
4.1 SUBDIVISÃO DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL (MALHA)

Para realizar a discretização do domínio computacional foi utilizado a malha hexaédrica que entre as opções de tetraédrico prismática e piramidal é considerada a mais precisa. Os elementos hexaédricos reduzem os erros numéricos gerando uma malha de excelente qualidade. (referencia)

Para geração da malha é necessário, a utilização de um programa específico para desenvolvimento de malha fornecido pelo pacote ANSYS conhecido como *ANSYS Meshing* que foi utilizado para o desenvolvimento da malha presente no trabalho.

De início, foi criado uma malha hexaédrica para todos os elementos do trocador com aproximadamente 559 mil nós gerando mais de 406 mil elementos mostrados na Figura 7.

Figura 7 - Vista da malha do trocador em um corte xy



Fonte: Os autores, 2021

4.1.1 Convergência de Malha

Em modelagens que utilizam *Softwares* CFD a convergência de malha se torna indispensável para apresentar bons resultados. De modo geral as simulações devem ser realizadas com as mesmas características de escoamento, alterando apenas o refino de malha.

Para o presente trabalho utilizou-se uma malha de aproximadamente 13 mil nós e a simulação foi repetida para a malha de 559 mil nós onde obteve-se um resultado de 1,4% na diferença na temperatura de saída do fluido quente. Como resultado pode-se afirmar que a malha apresentada na Figura 7 está

convergida e que que as simulações feitas a partir do refinamento apresentado apresentem resultados confiáveis.

4.2 DEFINIÇÕES DE ESCOAMENTO E PRÉ PROCESSAMENTO

Para definir as variáveis de entrada deve-se levar em consideração que apenas as vazões e as temperaturas de entrada são possíveis de se extrair de forma experimental, e as variáveis de saída devem ser modeladas. A seguir, na Tabela 4, é possível observar as vazões e a temperatura de entrada do fluido quente e frio do trocador.

Tabela 4 - Modelagem de simulação

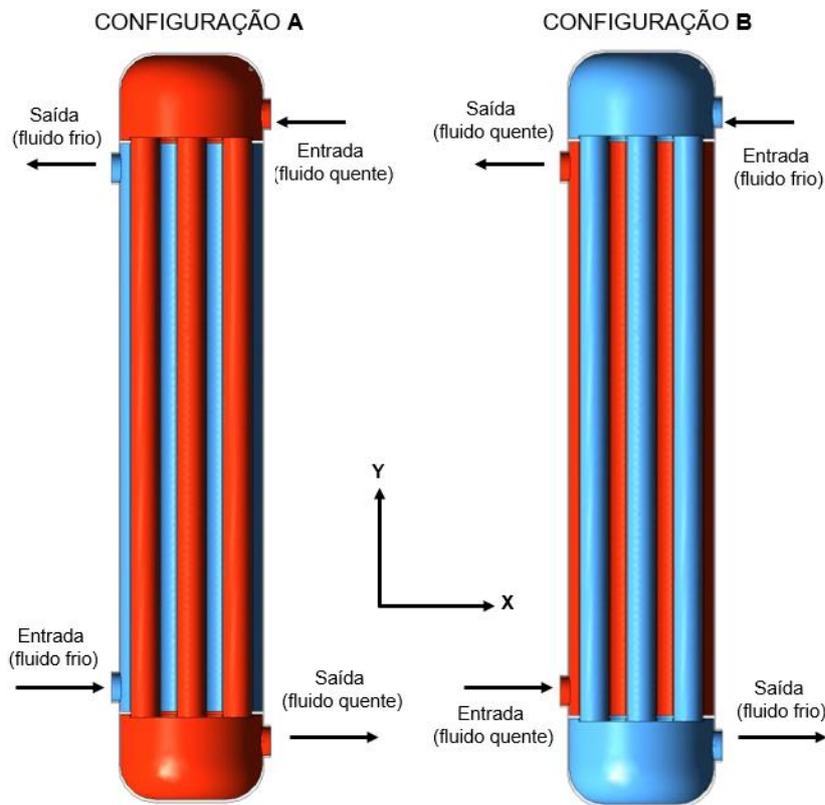
VARIÁVEIS DE ESCOAMENTO

Variável	Temperatura (K)	Vazão (kg/s)
Entrada de água fria	293,9	2
Entrada de água quente	342,1	1

Fonte: Os autores, 2021

Utilizando os dados da Tabela 6 pode-se definir as vazões de entrada entre fluido frio e quente determinado sua posição no trocador. A configuração “A” foi estabelecida de forma que escoamento do fluido frio será realizado no casco como é comum em TCCT. Já a configuração “B” o escoamento do fluido frio foi realizado nos tubos e o fluido quente pelo casco, conforme Figura 8.

Figura 8 – Configuração de escoamento



Fonte: Os autores, 2021

O tempo de processamento computacional para resolução de cada simulação foi, em média, 26 minutos, considerando uma malha com 406801 elementos e 559193 nós. Foram realizados, em média, 100 iterações por simulação com um critério de convergência de 10^{-3} .

4.3 PÓS PROCESSAMENTO ANSYS-CFX

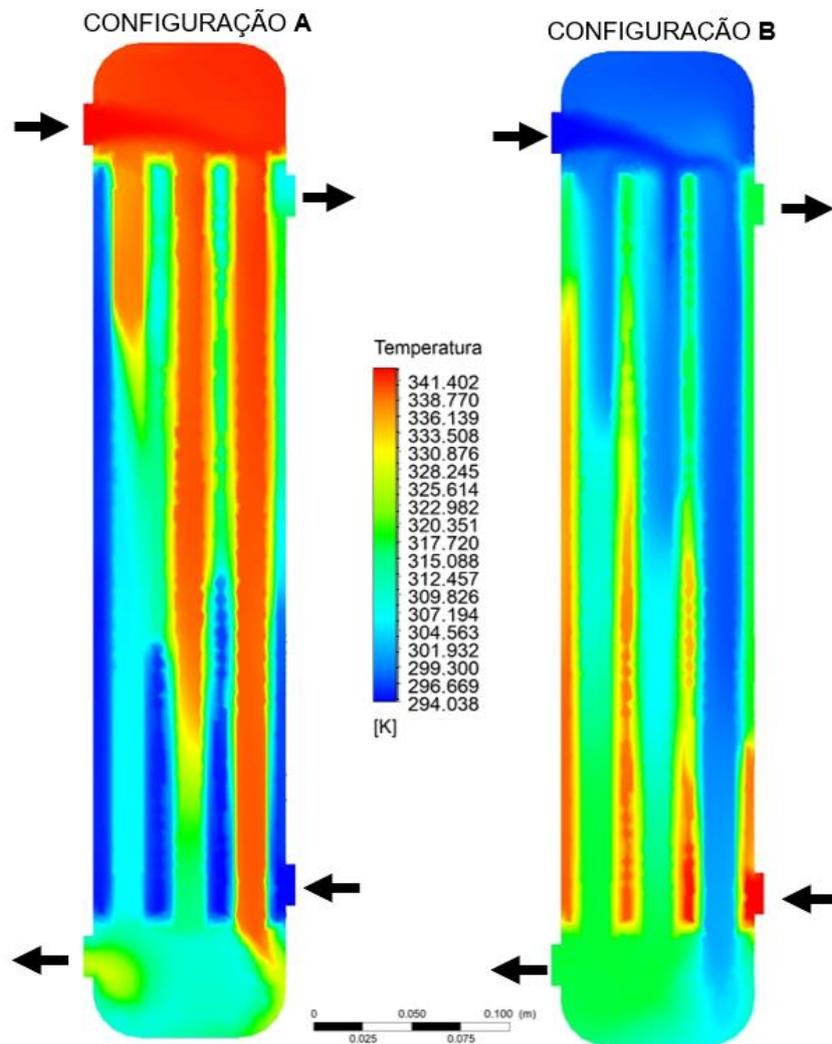
No módulo de pós-processamento de código CFD o *software* é responsável pela apresentação dos dados obtidos após as iterações gerando gráficos de vetores, linhas e contornos. Também é possível gerar gráficos de superfície em 2D e 3D (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

Os resultados obtidos a partir das iterações foram apresentados em forma de gráfico de linhas e gráfico de superfície 2D para facilitar a observação visual dos fluidos no escoamento.

Utilização De Fluidodinâmica Computacional Para Otimização De Eficiência Em Um Trocador De Calor Casco Tubo

A seguir, na Figura 9, é possível observar os contornos de temperatura em um corte axissimétrico da configuração 'A' e 'B' por meio de um gráfico de superfície 2D onde é possível observar o escoamento do fluido ao longo do trocador.

Figura 9 - Contornos de temperatura em um corte axissimétrico



Fonte: Os autores, 2021

As temperaturas de saída de fluido quente e frio foram estabelecidas após os resultados do Pós processamento ANSYS e com a análise de contorno estabelecida conforme Figura 9 é possível determinar os valores apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 – Pós processamento ANSYS

PÓS PROCESSAMENTO ANSYS

Variáveis	Temp. Conf. A (K)	Temp. Conf. B (K)
Entrada de água fria	293,9	293,9
Entrada de água quente	342,1	342,1
Saída de água fria	312,4	319,3
Saída de água quente	324,2	317,6

Fonte: Os autores

Com as temperaturas obtidas na Tabela 5 pode-se observar diretamente uma diferença de temperatura nas saídas de fluido quente entre as Configuração 'A' e 'B'. Também foi possível calcular a eficiência do trocador de calor em cada configuração.

4.2 EFICIÊNCIA DA TROCA TÉRMICA

Utilizando as equações (15) e (16) podemos avaliar a eficiência dos trocadores nas duas Configuração simuladas. Temos então que:

$$C_{\min} = m_{\min} * C_{p_{\min}} = 1 \text{ kg/s} * 4,18 \text{ kJ/kg} = 4,18$$

$$q_{\max} = 4,18 * (342,1 - 293,9) = 201,48 \text{ kJ}$$

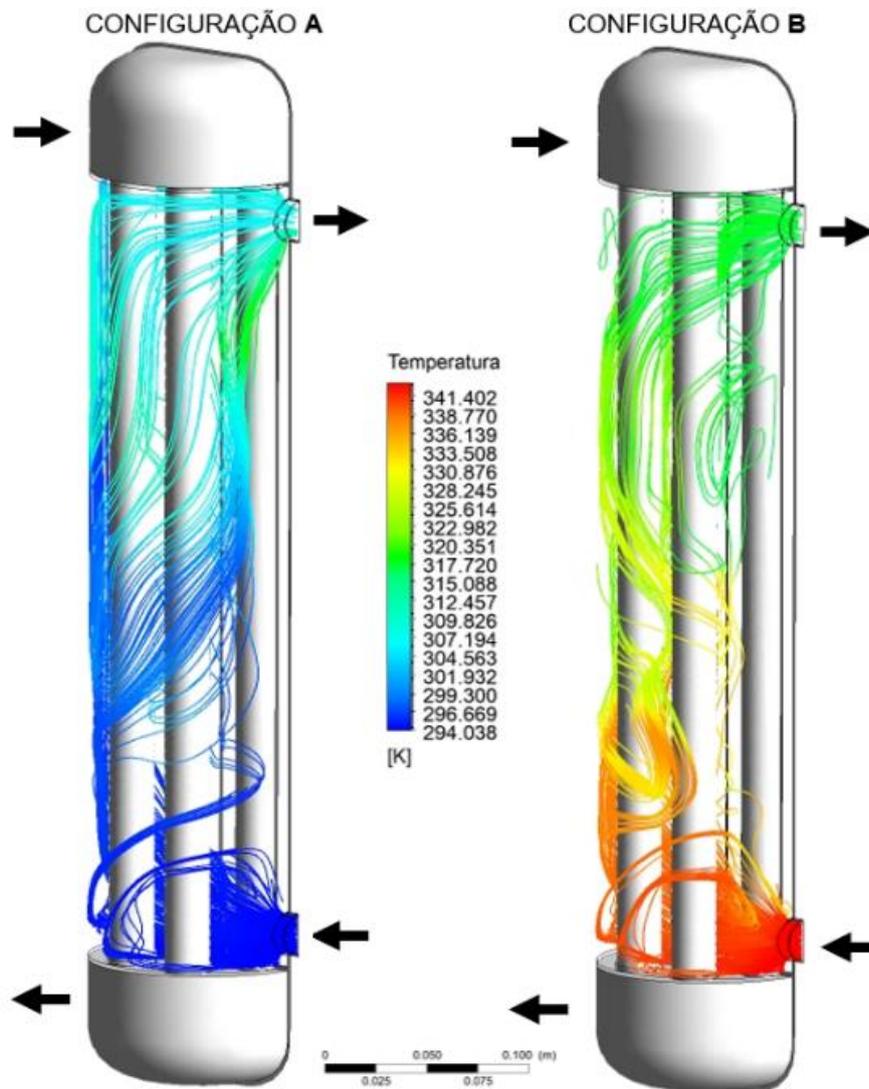
$$\eta(A) = 77,33 / 201,48 = 0,3838 = 38,4 \%$$

$$\eta(B) = 106,17 / 201,48 = 0,5270 = 52,7 \%$$

Ao comparar as eficiências das trocas térmicas das Configuração A e B podemos observar que a segunda configuração nos dá uma melhor troca térmica, aumentando de 38,4% para 52,7% a eficiência do processo de troca.

A Figura 10 apresenta as *Streamlines* da geometria em um corte axissimétrico fluindo pelo casco entre os tubos do trocador.

Figura 10 – Distribuição de temperatura nas linhas de escoamento da geometria



Fonte: Os autores

A partir dos valores obtidos, percebeu-se que no fluido quente com fluxo passando pelos tubos, obteve o maior valor na eficiência. Segundo Santos e Stapasolla (2010) o fluxo que passa pelo trocador é o fator determinante, pois ele é diretamente responsável pela quantidade de troca térmica que é obtida ao longo do trocador.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se observar que o modelamento do trocador na configuração “B” demonstrou uma troca térmica muito maior que a configuração “A”. A passagem

Utilização De Fluidodinâmica Computacional Para Otimização De Eficiência Em Um Trocador
De Calor Casco Tubo

do fluido frio pelo casco trouxe uma melhor efetividade para a refrigeração da corrente quente aumentando a taxa de transferência de calor.

Também foi possível observar, que, a configuração “B” onde o fluido quente e a geometria do trocador juntamente com a vazão causam uma turbulência maior que a situação da configuração “A” e conseqüentemente uma dissipação de energia maior, gerando um aumento da eficiência de troca térmica do trocador.

Assim, foi possível, com a utilização do *software* Ansys-CFX realizar o modelamento e simulação de fluidodinâmica computacional utilizando as equações numéricas do modelo $k-\epsilon$ alcançando o critério de convergência estabelecido obtendo resultados satisfatórios na alteração do fluxo de fluido quente e frio entre o casco e tubo do trocador.

REFERÊNCIAS

ANSYS INC. **ANSYS CFX-Solver** Theory Guide: Release 17.2. Canonsburg, 2016.

BARTH, T. J., “**An overview of combined uncertainty and posterior error bound estimates for CFD calculations**”, AIAA Paper 2016–1062, 2016.

ÇENGEL, Y. A. & GHAJAR. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 3. ed. São Paulo, SP: McGraw-Hill, 2012. 902 p.

CORRÊA, L.. **Simulação de grandes escalas de escoamentos turbulentos com filtragem temporal via método de volumes finitos**. 2016. 99 f. Tese (Doutorado em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC/USP), São Carlos – SP.

Utilização De Fluidodinâmica Computacional Para Otimização De Eficiência Em Um Trocador De Calor Casco Tubo

KHATCHATOURIAN, O. **Experimental Study of the Turbulent Wake Downstream of a Fan Jet.** *Izvestiya VUZ. Aviatsionnaya Tekhnika*, Vol. 21, No. 3, p. 100-107, 1978.

KUPPAN, T. **Heat exchanger design handbook.** 2. ed. New York: CRC Press, 2000.

MIRANDA, C.B.N., Duque, G.W.D., Silva, J.A., Teixeira, F.N., **Simulação numérica do escoamento em um ciclone separador usando CFD**, in: 9º Simpósio de Mecânica Computacional, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei/MG, Brasil, 2010.

OLIVEIRA B. C., Gilce. **Análise do Trocador de Calor de uma areira residencial através de Fluidodinâmica Computacional.** Roger Schildt Hoffmann. 2011 61p. Graduação, Engenharia mecânica. Departamento de tecnologia. Universidade regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi 2011.

SANTOS, F. C., STAPASOLLA T. Z., **Construção trocador de calor tipo casco tubo para resfriamento de mosto de cerveja.** Trabalho final da disciplina de medições térmicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre –RS, 2011.

SIMÕES, M. R., **Simulação computacional de escoamento turbulento em Compressor axial utilizando ferramenta de CFD.** Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio de Janeiro-RJ 2009.

SHAH, K. R.; SEKULIĆ, D. P. **Fundamentals of heat exchangers design.** New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

Utilização De Fluidodinâmica Computacional Para Otimização De Eficiência Em Um Trocador
De Calor Casco Tubo

THULUKKANAM, K. *Heat Exchangers Design Handbook*. 2. ed. New York:
CRC Press - Taylor & Francis Group, 2013.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational
Fluid Dynamics: The finite volume method*. 2. ed. England: Pearson Education
Limited, 2007.

