

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
ENGENHARIA QUÍMICA**

**LARISSA RUPPERT KRUBNIKI  
VANESSA PALIARES DE FREITAS**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA EM UM TROCADOR DE  
CALOR COMPACTO TUBO-ALETA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO.**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA  
2016**

**LARISSA RUPPERT KRUBNIKI  
VANESSA PALIARES DE FREITAS**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA EM UM TROCADOR DE  
CALOR COMPACTO TUBO-ALETA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO.**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Everton Moraes Matos

**PONTA GROSSA**

**2016**



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Ponta Grossa



1.1.1. Coordenação de Engenharia Química

---

### **TERMO DE APROVAÇÃO**

Análise da influência da geometria em um trocador de calor compacto tubo-aleta, através de simulação.

por

Larissa Ruppert Krubniki  
Vanessa Paliães de Freitas

Monografia apresentada no dia 10 de junho de 2016 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Profa. Dra. Priscilla Dos Santos Gaschi Leite  
(UTFPR)

---

Profa. Dra Erica Roberta Lovo Da Rocha Watanabe  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Everton Moraes Matos  
(UTFPR)  
Orientador

---

Profa. Dra. Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli  
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

**A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso**

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de nossas vidas. Portanto, desde já pedimos desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte de nossos pensamentos e de nossa gratidão.

Agradecemos ao nosso orientador Prof. Dr. Everton Moraes Matos, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos nossos colegas de curso.

A Coordenação e Departamento de Engenharia Química pela cooperação.

Gostaríamos de deixar registrado também, o nosso reconhecimento às nossas famílias, pois sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

FREITAS, V. P; KRUBNIKI, L. R. **Análise da influência da geometria em um trocador de calor compacto tubo-aleta através de simulação.** 2016. 51. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

O presente trabalho realizou a simulação computacional do comportamento da transferência de calor por convecção forçada em um trocador de calor do tipo tubo-aleta de escoamento cruzado com diferentes geometrias de aletas, sendo elas de placas, anulares, piniformes, planas verticais e um trocador de calor sem aletas. Os resultados mostram que a utilização de aletas torna a troca térmica mais efetiva e, comparativamente, os tubos com aletas anulares mostraram-se mais eficientes.

**Palavras-chave:** Trocador de calor. Tubo-aleta. Geometria. Simulação. Transferência de Calor.

## ABSTRACT

FREITAS, V. P; KRUBNIKI, L. R. **Geometry influence analysis in a compact heat exchanger tubu-fin through simulation**. 2016. 51. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2016.

This study performed a computer simulation of heat transfer by forced-convection in a tube-fin heat exchanger with different geometries of fins, which are plates, annular, pitman, verticals and a heat exchanger without fins. The results show that the use of fins makes the most effective heat exchange tubes and compared with annular fins proved to be more efficient.

**Keywords:** Heat exchanger . Tube -fin . Geometry. Simulation. Heat transfer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demonstrativo de trocador de calor. ....	7
Figura 2 - Escoamento cruzado com e sem mistura. ....	9
Figura 3 - Diferentes geometrias de aletas. ....	10
Figura 4 – Tubos aletados com (a) aletas em placas, (b) anulares e (c) planas uniformes.....	15
Figura 5 – Exemplo de malha criada no Salomé.....	16
Figura 6 - Malha importada no Salomé para o CFX-Pré. ....	17
Figura 7 - Malha hexaédrica da geometria do trocador de calor em planos diferentes. ....	17
Figura 8 - Condições de contorno pré-denifidas pelo Salomé.....	18
Figura 9 - Trocador de calor tubo aleta com aletas anulares feito no Salomé. ....	20
Figura 10 - Corte longitudinal do trocador de calor tubo aleta com aletas anulares. ....	20
Figura 11 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.....	21
Figura 12 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.....	21
Figura 13 - Perfil de temperatura obtido com a ferramenta Countor. ....	21
Figura 14 - Perfil de temperatura na saída do escoamento.....	22
Figura 16 - Trocador de calor tubo aleta com aletas de placas feito no Salomé. ....	23
Figura 17 - Corte longitudinal do trocador de calor tubo aleta com aletas de placas. ....	24
Figura 18 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.....	24
Figura 19 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.....	25
Figura 20 - Perfil de temperatura obtido com a ferramenta Countor. ....	25
Figura 21 - Perfil de temperatura na saída do escoamento.....	26
Figura 22 - Trocador de calor tubo aleta com aletas de planas verticais feito no Salomé. ....	27
Figura 23 - Corte longitudinal do trocador de calor tubo aleta com aletas planas verticais. ....	27
Figura 24 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.....	28
Figura 25 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.....	29
Figura 26 - Perfil de temperatura obtido com a ferramenta Countor. ....	29
Figura 27 - Perfil de temperatura na saída do escoamento.....	30
Figura 28 - Trocador de calor tubo-aleta com aletas piniformes feito no Salomé.....	31
Figura 29 - Trocador de calor com aletas piniformes. ....	31
Figura 30 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.....	32
Figura 31 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.....	33
Figura 32 - Perfil de temperatura obtido com a ferramenta Countor. ....	33
Figura 33 - Perfil de temperatura na saída do escoamento.....	34
Figura 34 - Trocador de calor tubo sem aletas feito no Salomé. ....	35
Figura 35 - Corte longitudinal do trocador de calor sem aletas. ....	36
Figura 36 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.....	36
Figura 37 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.....	37
Figura 38 - Perfil de temperatura obtido com a ferramenta Countor. ....	37
Figura 39 - Perfil de temperatura na saída do escoamento.....	38
Figura 40 - Volume do trocador com aletas anulares. ....	40
Figura 41 - Volume do trocador de calor com aletas em placas.....	40
Figura 42 - Volume do trocador de calor com aletas planas verticais. ....	40
Figura 43 - Volume do trocador de calor com aletas piniforme. ....	41

Figura 44 - Volume do trocador de calor sem aletas.....	41
---	----

### **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Gráfico obtido pela ferramenta Chart.....	22
Gráfico 2 - Gráfico obtido pela ferramenta Chart.....	26
Gráfico 3 - Gráfico obtido pela ferramenta Chart.....	30
Gráfico 4 - Gráfico obtido pela ferramenta Chart.....	34
Gráfico 5 - Gráfico obtido pela ferramenta Chart.....	38

### **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Comparação de dados .....	42
--------------------------------------	----



## LISTA DE SIGLAS

CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
$\bar{h}$	Coeficiente convectivo médio
Q	Taxa de transferência de calor total
A	Área da superfície de troca térmica
T <sub>s</sub>	Temperatura da Superfície
T <sub>∞</sub>	Temperatura do fluido ou ar adjacente
Re	Número de Reynolds
Fi	Forças de inércia
F <sub>μ</sub>	Forças viscosas F <sub>μ</sub>
d <sub>superficial</sub>	Densidade superficial

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 PROBLEMA .....	2
1.2 HIPÓTESES .....	3
1.3 OBJETIVOS .....	3
1.3.1 Objetivo geral.....	3
1.3.2 Objetivo específico.....	3
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	4
2.1.1 Tipos de trocadores de calor .....	5
2.2 ESCOAMENTO CRUZADO .....	7
2.3 EXPLORAÇÃO DE POSSIBILIDADES NA GEOMETRIA DAS ALETAS .....	10
2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	11
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>12</b>
3.1 DELINEAMENTO.....	12
3.1.1 Do ponto de vista da natureza .....	12
3.1.2 Do ponto de vista de seus objetivos .....	12
3.1.3 Do ponto de vista dos procedimentos técnicos.....	13
3.2 LOCAL .....	13
3.3 DADOS EXPERIMENTAIS .....	14
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>14</b>
4.1 CRIAÇÃO DO LAYOUT EM TRÊS DIMENSÕES.....	15
4.2 CRIAÇÃO DA MALHA .....	15
4.3 SOFTWARE PARA SIMULAÇÃO.....	16
4.3.1 Definição das Condições de Contorno.....	17
4.3.2 Escolha do modelo de turbulência adequado para o cálculo .....	18
4.3.3 Obtenção de solução .....	19
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>19</b>
5.1 ALETAS ANULARES .....	19
5.2 ALETAS DE PLACAS .....	23
5.3 ALETAS PLANAS VERTICAIS .....	27
5.4 TROCADOR DE CALOR COM ALETAS PINIFORMES .....	31
5.5 TROCADOR DE CALOR SEM ALETAS.....	35
5.6 ANÁLISE COMPARATIVA.....	39
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>7 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No âmbito da engenharia os mecanismos de transferência de calor são amplamente estudados, pois existem diversas aplicações como o resfriamento de um líquido refrigerante em automóveis, maquinários industriais, agrícolas e até mesmo o resfriamento de complexos painéis solares e componentes eletrônicos. O processo de transferência de calor pode ocorrer de diferentes formas, sendo uma delas a convecção.

O processo denominado convecção somente é possível quando há o deslocamento de um líquido ou gás e pode ser classificado como convecção forçada quando o escoamento é induzido por meios externos (ventilador, bomba). Já convecção natural ocorre quando as forças de empuxo fazem com que o fluido escoe. A existência de ambas as condições também é possível. Sabe-se que a convecção forçada pode ser aplicada tanto para resfriamento quanto para aquecimento. (INCROPERA, 2008)

Como já dito os trocadores de calor são amplamente usados em indústria de diversos portes, porém cada vez mais é necessário que estes tenham uma boa eficiência e que seu espaço seja otimizado, diminuindo assim os custos de fabricação e diminuindo a área a ser destinada a esses equipamentos. Surge, nesse contexto, a necessidade de se aperfeiçoar o processo de transferência de calor.

Na busca por maneiras de otimizar a troca térmica, uma alternativa é o uso de superfícies estendidas, conhecidas como aletas. Considerando que a superfície de contato influencia diretamente nesse processo de transferência, o uso dessas aletas se faz uma ferramenta ímpar.

As aletas, além de proporcionarem um aumento da área de troca térmica e superfície de contato, também têm grande influência nas características do escoamento, podendo torná-lo mais turbulento, proporcionando uma maior difusividade no sistema. Segundo Chang e Wang (1997), essas superfícies aumentam a taxa de transferência de calor e são utilizadas para melhorar o desempenho térmico dos trocadores de calor refrigerados a ar onde é necessário reduzir a elevada resistência térmica do ar.

Atualmente, com a dinâmica acelerada e os altos custos de produção, altamente influenciados pelo custo energético, busca-se soluções práticas e com

pouco investimento. Nesse contexto, a criação e desenvolvimento de projetos piloto tornam-se não viáveis para casos experimentais. A simulação computacional permite avaliar diversos parâmetros e variáveis de projeto e operação de forma consistente e auxilia na seleção de equipamentos e condições mais adequadas para que a criação de projetos piloto seja mais efetiva e que simule as condições reais de operação.

Existem diversos pacotes computacionais que auxiliam na solução de problemas complexos através de simulações na área de dinâmica dos fluidos, conhecida por *Computacional Fluid Dynamics* - Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Os pacotes computacionais, através de algoritmos, simulam o comportamento dos fluidos.

Tais pacotes permitem a criação de desenhos de equipamentos e objetos, bem como a criação de malhas computacionais desses desenhos. Uma malha computacional é a representação do modelo físico em estudo por meio de linhas e pontos. O tipo de malha utilizado para determinado problema pode ter um impacto significativo na simulação numérica, inclusive na precisão da solução. (MUNSON, 2010)

Alguns desses pacotes são mais completos, como o FLUENT® e o Ansys CFX®, e alguns são utilizados apenas para a construção de geometrias e malhas computacionais tais como o ICEM CFD e o Salomé®. (HERCKERT; S. NETO, 2004).

## 1.1 PROBLEMA

O processo em questão refere-se ao sistema de resfriamento dos tubos em um trocador de calor do tipo tubo-aleta, com escoamento cruzado, onde ocorre a transferência de calor através da convecção forçada, por meio de uma corrente de ar que entra no escoamento com uma temperatura de 25 °C, sendo a velocidade de escoamento de 2 m<sup>2</sup>/s.

O problema consiste em aperfeiçoar um trocador de calor do tipo tubo-aleta, modificando as geometrias de aletas. O qual será desenvolvido com o auxílio dos seguintes softwares:

- Salomé® - software para construção de geometrias e malhas numéricas.

- CFX® - software para simulação utilizando os parâmetros de processo para obtenção dos resultados e então a análise fluido dinâmica dos mesmos.

## 1.2 HIPÓTESES

Acredita-se que das aletas com diferentes geometrias que serão avaliadas, a que apresentará maior eficiência será a de aletas em placas, pois esse é o tipo de aleta mais comumente utilizado em diversos tipos de trocadores de calor.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Investigar, através de simulação computacional, a transferência de calor por convecção forçada em um trocador de calor de escoamento cruzado com diferentes geometrias de aletas, no qual ocorrerá o resfriamento dos tubos e aletas através do escoamento de um fluido frio, que sofrerá, por sua vez, um aquecimento devido à transferência de calor.

### 1.3.2 Objetivo específico

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar os efeitos físicos das diferentes geometrias de aletas.
- Analisar o campo de temperaturas das diferentes geometrias das aletas e seus escoamentos.
- Definir a melhor geometria de aleta para o problema.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

## 2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor ocorre em situações onde existe diferença de temperatura, ou seja, onde há um gradiente de temperatura. Nestas circunstâncias ocorrem mudanças das temperaturas dos fluidos, pois esses tendem a entrar em equilíbrio. Porém, muitas vezes esse equilíbrio não é alcançado devido ao tamanho ou objetivo da transferência de calor.

A transferência de calor, segundo Incropera (2008) é “energia térmica em trânsito devido a uma diferença em temperaturas no espaço”. Corroborando com este pensamento, Çengel e J.ghajar (2012) afirma que é “a forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro em consequência da diferença de temperatura entre eles”.

Essa transferência pode ocorrer de três formas distintas, sendo elas por radiação, condução ou convecção.

A radiação é descrita por Çengel e J.ghajar (2012) como ondas eletromagnéticas emitidas pelo material. Isto ocorre devido à mudança nas configurações eletrônicas tanto dos átomos quanto das moléculas.

Segundo Incropera (2008), a condução pode ser definida como a transferência de calor que ocorre através de um meio estacionário, podendo ser um sólido ou um fluido, quando existir um gradiente de temperatura nesse meio.

Já a transferência de calor por convecção pode ser descrita como a transferência de calor entre um fluido em movimento e uma superfície, ambos em temperaturas diferentes. (INCROPERA, 2008).

O tipo de transferência de calor encontrada nesse problema serão a condução e a convecção, porém para este estudo será considerada apenas a transferência de calor por convecção.

Considerando-se uma superfície relativamente quente, pode-se exemplificar o fenômeno da convecção, pois quando o calor é conduzido da superfície quente para o ar adjacente à superfície, este ar torna-se mais quente que o ar vizinho. O ar quente, por ser menos denso que o ar frio, é então forçado pelo ar frio a subir. Já o ar mais frio que desce é aquecido pela superfície e o processo se repete.

Para encontrar o coeficiente de transferência de calor por convecção é necessário definir o conceito de camada limite térmica. Incropera (2008) diz que

“uma camada limite térmica deve se desenvolver se houver diferença entre as temperaturas do fluido na corrente livre e da sua superfície”.

Segundo Incropera (2008), para um coeficiente convectivo médio ( $\bar{h}$ ), em uma superfície, a taxa de transferência de calor total ( $q$ ) pode ser obtida pela equação a seguir.

$$q = \bar{h}.A.(T_s - T_\infty). \quad (1)$$

Contudo, para se determinar  $\bar{h}$ , deve-se levar em conta as propriedades do fluido, como densidade e viscosidade, a geometria da superfície e as condições do escoamento (INCROPERA, 2008).

A taxa de transferência de calor convectiva sofre uma grande influência da natureza do escoamento, pois a distribuição de velocidade determina o que se chama de componente advectivo do transporte de energia térmica no interior da camada limite (INCROPERA, 2008).

Com isso, percebe-se que o presente problema, não será de fácil estudo, pois deve-se levar em conta diversas propriedades e isto justifica o uso de pacotes computacionais para resolução do mesmo.

### 2.1.1 Tipos de trocadores de calor

Como visto, a transferência de calor pode ocorrer de formas diferentes. Para esse processo utiliza-se usualmente equipamentos denominados trocadores de calor.

Existem diversos tipos de trocadores de calor e esses serão empregados de acordo com o processo e as condições em que ele ocorre. Os principais trocadores de calor são do tipo casca e tubo, tubo duplo e tubo compacto.

O trocador de calor mais comum nas indústrias é o do tipo casca e tubo, nesse tipo de trocador existe um casco em que ocorre o escoamento de um fluido e esse mesmo casco acondiciona diversos tubos menores em que escoam o segundo fluido. Tais trocadores podem ser classificados de acordo com o número de passes tanto no casco quanto nos tubos (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012).

Nos trocadores de calor do tipo tubo duplo ou tubos concêntricos ocorre o escoamento de um fluido por um tubo menor e outro fluido escoar no espaço entre o tubo menor e o maior. O escoamento desses fluidos pode ser em paralelo, ou seja, os fluidos escoando na mesma direção, ou em contracorrente, em que os fluidos escoam em direções opostas (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012).

Incropera (2008) e Çengel e J.ghajar, (2012) trazem, baseando-se nas definições anteriores, outra classificação dos trocadores de calor a qual possuem geometrias densas de tubos aletados, chamados de trocador de calor do tipo compacto, estes possuem uma grande área de troca ocupando um pequeno volume e são tipicamente usados quando um dos fluidos é gás.

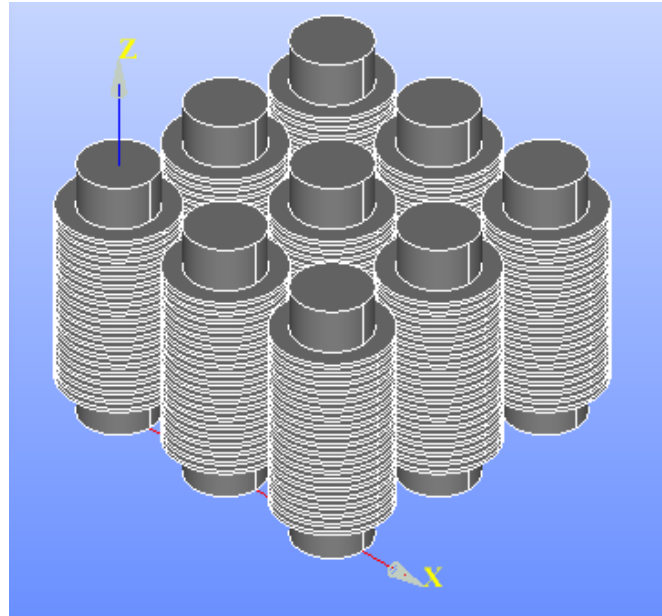
Considerando estas definições e o problema deste trabalho, optou-se por um trocador de calor do tipo compacto.

Tais equipamentos podem ser classificados pelo tipo de escoamento, o qual tem uma subdivisão em quatro grupos, sendo estes, de escoamento de contracorrente, paralelo, cruzado ou ainda de contracorrente cruzada (SCHMIDT, HENDERSON, & WOLGEMUTH, 2004).

O trocador de calor do tipo tubo-aleta é um caso especial do trocador de calor compacto, o que o diferencia dos trocadores de calor compactos convencionais é que externamente a ele escoar um gás (geralmente ar) e internamente escoar um líquido (DINIZ; SILVESTRINI, 2010).

Considerando estas definições e o problema deste trabalho, optou-se por um trocador de calor compacto do tipo tubo-aleta, este pode ser representado pela Figura 1, a seguir:





**Figura 1 - Demonstrativo de trocador de calor.**

**Fonte: próprio autor.**

Onde, os tubos estão a uma temperatura alta ( $90^{\circ}\text{C}$ ) e externamente escoar ar frio ( $25^{\circ}$ ) em regime turbulento. A escolha do ar como fluido externo ocorreu devido às condições de simulação do software usado, além do fato de o ar ser mais utilizado em trocadores de calor compacto. A escolha do material dos tubos seguiu a mesma linha raciocínio, portanto os mesmos são feitos de alumínio o qual possui uma condutividade térmica alta.

Em trocadores de calor compactos podendo ser tubo-aleta ou não, normalmente os dois fluidos circulam perpendiculares um ao outro, e essa configuração de escoamento é chamada escoamento cruzado.

## 2.2 ESCOAMENTO CRUZADO

Deve-se definir o tipo de escoamento do fluido para que este trabalho possa ser realizado, para que esta escolha seja feita, primeiramente precisa-se definir e entender os tipos de escoamento possíveis para um trocador de calor tubo-aleta.

O escoamento de um fluido pode ser classificado como:

- Interno, em canal e externo;
- Laminar, transição e turbulento;

- Compressível e incompressível;
- Viscoso e não-viscoso;

Para este trabalho estudou-se os escoamentos do tipo laminar, transição e turbulento. Pois externamente e internamente haverá um escoamento turbulento.

Em 1883, realizou-se a experiência de Reynolds que demonstrou que existem dois tipos de escoamentos, o escoamento laminar e o turbulento. O escoamento laminar é definido como aquele em que o fluido se movimenta em camadas, ou seja, uma camada escorregando sobre a camada adjacente, onde ocorre somente a troca de quantidade de movimento. As forças viscosas de cisalhamento presentes amortecem a tendência à instabilidade e à turbulência, o que dificulta o movimento entre as camadas adjacentes do fluido (MARIANI, 2012).

Já o escoamento turbulento é aquele em que a velocidade apresenta componentes transversais ao movimento geral do conjunto ao fluido. O escoamento turbulento apresenta características como irregularidade, difusividade, altos números de Reynolds ( $Re$ ), vorticidade e dissipação de energia. A natureza do escoamento influencia diretamente nas taxas de transferência de calor convectivas, considerando que a distribuição de velocidade determina o componente advectivo do transporte de energia térmica (MARIANI, 2012).

A mistura turbulenta promove grandes gradientes de temperatura e de concentração de espécies adjacentes à superfície do sólido, assim como um aumento correspondente nos coeficientes de transferência de calor ao longo da região de transição. (INCROPERA, 2008)

A natureza de um escoamento, isto é, se laminar ou turbulento é indicada pelo número de Reynolds. O  $Re$  é a relação, fornecida por Incropera (2008), entre as forças de inércia ( $F_i$ ) e as forças viscosas ( $F_\mu$ ). A Equação 3 mostra a relação citada.

$$Re = \frac{\Sigma F_i}{\Sigma F_\mu} \quad (3)$$

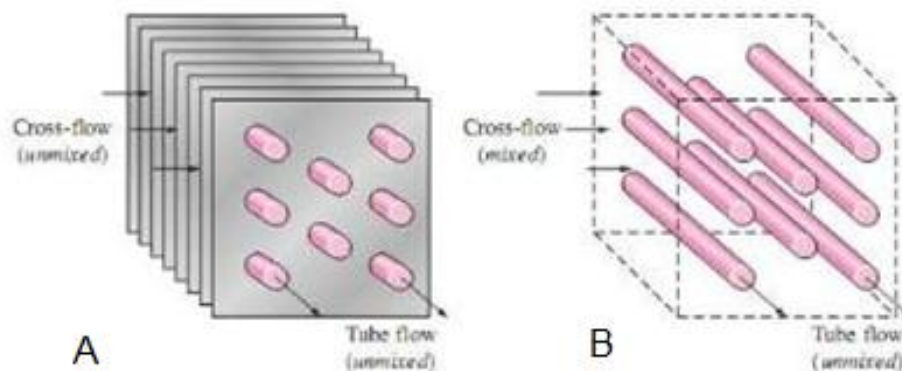
Para fluidos newtonianos, a tensão de cisalhamento é calculada de modo diferente para os dois tipos de escoamento. A troca de energia no interior do escoamento, no regime turbulento, resulta em tensões maiores, dissipando energia por atrito viscoso. Como resultado dos dois efeitos o fluido se comporta como se sua viscosidade fosse aumentada (MARIANI, 2012)

O escoamento que será utilizado na problemática do trabalho será um escoamento turbulento e cruzado.

Considerando que se pode classificar o escoamento cruzado em dois tipos:

- a) Sem mistura: a existência das aletas evita com que o fluido se mova paralelamente ao tubo, ou seja, o mesmo está condicionado no espaço entre as aletas.
- b) Com mistura: Como não há existência de aletas o fluido está livre para se mover na direção transversal, ou seja, paralelamente ao tubo.

Ambos são mostrados na Figura 2, que permite observar esta configuração e diferenciá-los visualmente (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012). Assim, pode-se definir que o utilizado no presente momento será o escoamento cruzado sem mistura.



**Figura 2 - Escoamento cruzado com e sem mistura.**

**Fonte: Çengel e J.ghajar (2012).**

A Figura 2 mostra os escoamentos sem mistura e cruzado, respectivamente. Entende-se, portanto, que no escoamento cruzado, os fluidos escoarão em direções perpendiculares, contudo ocorrerá a mistura desses fluidos, pois não há parede que os separem. No escoamento sem mistura os fluidos também irão escoar de forma perpendicular entre si, porém não ocorrerá mistura entre eles.

### 2.3 EXPLORAÇÃO DE POSSIBILIDADES NA GEOMETRIA DAS ALETAS

Como dito anteriormente, a área de superfície de contato é grande relevância em processos de transferência de calor. Apesar de existirem diversos tipos de equipamentos com essa função, a presença de aletas pode ser, em diversos casos, um diferencial para promover o aumento dessa área.

Essas aletas têm como objetivo aumentar a taxa de transferência de calor nesses equipamentos, pois por definição sabe-se que estas transferem energia por condução e por convecção. (REIS, 2008)

Segundo Chang e Wang (1997), para melhorar o desempenho térmico dos trocadores de calor refrigerados a ar é necessário reduzir a elevada resistência térmica do ar. Assim, utiliza-se superfícies estendidas (como as aletas), pois essas superfícies aumentam a taxa de transferência de calor.

Existem diversas geometrias de aletas, algumas delas estão ilustradas na Figura 3.

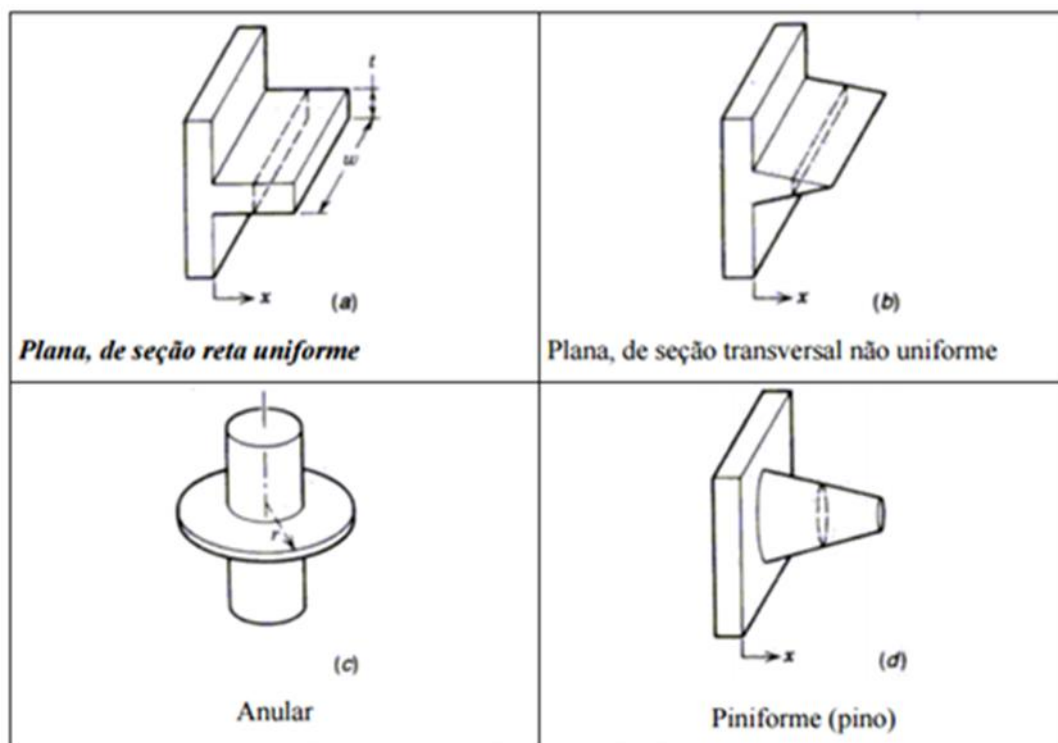


Figura 3 - Diferentes geometrias de aletas.

Fonte: Reis (2008).

A efetividade das aletas ( $\epsilon_f$ ) pode ser calculada, pois a utilização destas somente se justifica se a razão entre a taxa de transferência de calor pela aleta e a taxa de transferência de calor que existiria sem a presença da aleta for maior ou igual a 2 ( $\epsilon_f \geq 2$ ). Deve-se lembrar também que a efetividade de uma aleta aumenta com a escolha de um material de condutividade térmica elevada. (REIS, 2008)

Como visto, as aletas são de extrema importância na transferência de calor, pois estas influenciam diretamente na taxa de transferência de calor ( $\dot{q}$ ), considerando isso e sabendo-se que a geometria influencia na  $\dot{q}$ , chegou-se ao problema deste trabalho.

## 2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Como no caso de trocadores de calor do tipo tubo-aleta é praticamente impossível encontrar uma solução analítica, pois o processo externo é bastante complexo, devido à turbulência presente no mesmo, tais soluções serão encontradas com o auxílio de softwares para a construção de modelos computacionais que simulem as condições reais de operação.

As informações mais confiáveis sobre um processo são obtidas por medição, ou seja, por experimentação. Contudo, uma investigação experimental envolvendo equipamentos em larga escala são caras e inviáveis. Para isso, pode-se utilizar cópias idênticas do equipamento, através de simulação computacional, para realizar tal processo sob as mesmas condições. (PATANKAR, 1980)

A utilização de simulação por CFD pode fornecer flexibilidade na construção de modelos computacionais realistas que são adaptáveis para uma ampla variedade de condições físicas, sem a construção de equipamentos de teste caros. Tais simulações fornecem avaliações quantitativas e qualitativas e permitem prever o comportamento de um produto, processo ou material em determinadas condições assumidas. Existem três ferramentas disponíveis para a resolução e análise desse tipo de problema, sendo elas compostas por métodos analíticos, métodos numéricos e experimentação em laboratório. (BHUTTA, 2012; PATANKAR, 1980; MALISKA, 2012)

Sobre a experimentação numérica ou simulação numérica, Maliska (2012) diz que este tipo de ferramenta pode resolver problemas complexos em condições gerais e apresentar os resultados rapidamente, pois não apresenta grandes restrições. Porém existem dois tipos de erros que podem ser apresentados quando compara-se a simulação com a realidade, sendo o primeiro deles a validação numérica, onde estão os erros numéricos, que normalmente são causados por soluções erradas das equações diferenciais. E o segundo erro é a validação física no qual as equações diferenciais utilizadas não condizem com o problema a ser resolvido.

Esses erros podem ser originados inclusive na criação da malha computacionais, pois essas devem apresentar uma pormenorização que permita calcular os parâmetros físicos relevantes no escoamento. (MUNSON, 2010)

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 DELINEAMENTO**

##### **3.1.1 Do ponto de vista da natureza**

Kauark, Manhães e Medeiros (2010) falam que pesquisa aplicada tem como objetivo gerar conhecimentos para aplicação prática na resolução de problemas específicos.

Pode-se delinear este trabalho como sendo do tipo pesquisa aplicada, pois observando o problema abordado, vê-se que este é um problema específico e que a resolução do mesmo poderá, posteriormente, tornar-se uma aplicação prática.

##### **3.1.2 Do ponto de vista de seus objetivos**

Sabendo-se que o objetivo deste trabalho é descobrir qual será a geometria de aletas mais favorável à transferência de calor para as condições abordadas no problema em questão e considerando o que Gil (2002, p.41) diz sobre a pesquisa exploratória:

Estas pesquisas têm como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses. Pode-se dizer que estas pesquisas têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições. Seu planejamento é, portanto, bastante flexível, de modo que possibilite a consideração dos mais variados aspectos relativos ao fato estudado. Na maioria dos casos, essas pesquisas envolvem: (a) levantamento bibliográfico; (b) entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado; e (c) análise de exemplos que "estimulem a compreensão" (SELLTIZ et al., 1967, p. 63 apud GIL, 2002, p. 41)

Observando esta definição, pode-se afirmar que o tipo de pesquisa a ser realizada neste trabalho é a exploratória.

### 3.1.3 Do ponto de vista dos procedimentos técnicos

Quanto aos procedimentos técnicos, tal trabalho classifica-se como pesquisa experimental, pois segundo Kauark (2010) ao se determinar qual será o objeto de estudo e selecionar as variáveis do processo que podem influenciá-lo, analisando os efeitos dessas variáveis produzidas no objeto, tem-se uma pesquisa do tipo experimental.

Visto que, serão simuladas diferentes geometrias aplicadas às condições de funcionamento e tais simulações serão analisadas a fim de se obter as melhores condições de operação e resolução do problema proposto, assim pode-se dizer que esta será uma pesquisa exploratória.

### 3.2 LOCAL

As simulações serão realizadas na Universidade Tecnológica Federal do Paraná no Campus situado na cidade de Ponta Grossa, Paraná.

### 3.3 DADOS EXPERIMENTAIS

O trabalho consiste na simulação de um trocador de calor no pacote computacional ANSYS o qual inclui o software CFX que será utilizado, o fluido utilizado nas simulações será ar. A corrente desse fluido entrará no trocador de calor com temperatura igual a 25 °C e as paredes do tubo serão de alumínio com temperaturas de 90 °C.

O trocador de calor será do tipo tubo-aleta contendo 6 tubos de diâmetros de 0,1 metros e comprimento de 0,6 metros. As aletas apresentarão as geometrias anular, em placas, planas uniformes e piniforme, sendo que as simulações terão como variável a geometria das mesmas. E para efeito de comparação e cálculo da efetividade será simulado um trocador de calor compacto sem aletas.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

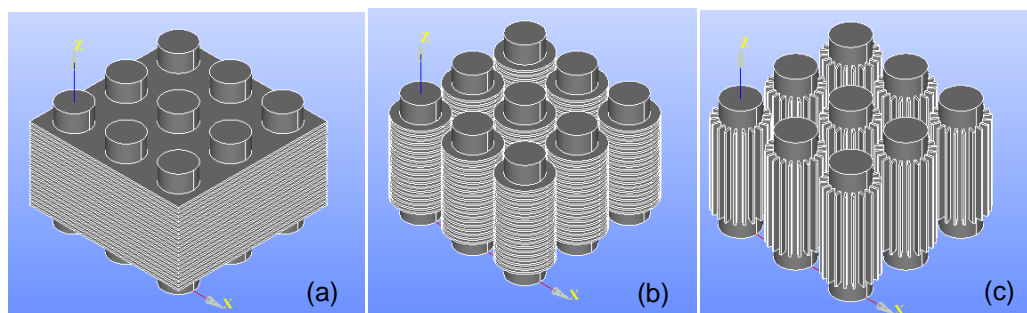
A realização do trabalho se deu por meio de simulação computacional do processo de resfriamento no trocador de calor tubo-aleta. A mesma foi baseada em técnicas na área de fluidodinâmica computacional, seguindo manuais dos softwares utilizados. Foram realizados neste estudo:

- Criação dos desenhos dos trocadores de calor tubo aleta;
- Escolha do tipo de malha numérica mais adequada para a análise;
- Construção das malhas;
- Definição dos elementos que formam o volume de controle;
- Configuração das condições de contorno nos domínios;
- Escolha do modelo de turbulência adequado para o cálculo;
- Obtenção de solução através do software;
- Visualização dos resultados;
- Comparação dos resultados.



#### 4.1 CRIAÇÃO DO LAYOUT EM TRÊS DIMENSÕES

Como o desenho não se trata de um desenho complexo, pode-se utilizar para criação do layout o software Salomé, o qual permite o desenho do trocador de calor com facilidade. Como mostram as figuras a seguir:



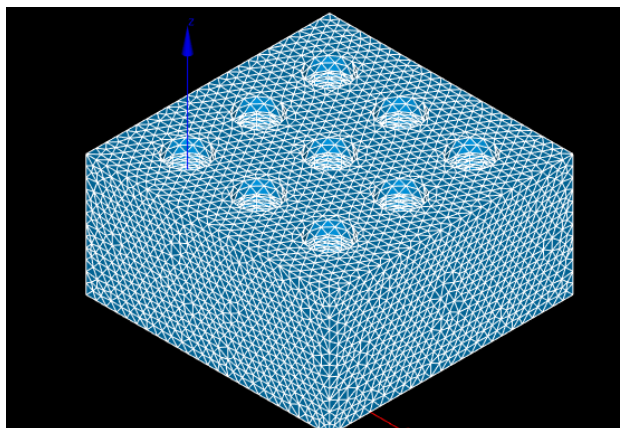
**Figura 4 – Tubos aletados com (a) aletas em placas, (b) anulares e (c) planas uniformes.**

**Fonte: os autores.**

Porém para utilizar os mesmo na simulação desejada, foi necessário desenhar um cubo com 1,2 metros de comprimento, 1,2 metros de largura e 0,6 metros de altura e recortar deste as geometrias citadas a cima, assim obtendo a geometria para criação da malha.

#### 4.2 CRIAÇÃO DA MALHA

Para a geração de malha foi utilizado o software Salomé, que permite criar malhas hexaédricas com facilidade. A criação da malha consiste na divisão do volume de controle em unidades menores. O tamanho desses volumes de controle em que a malha se vai dividir afeta diretamente a precisão dos resultados finais, pois quanto maior o mesh, menos precisos serão os resultados finais, porém mais rápido será o processamento da simulação. Nele foram construídas malhas com mesh igual a 0,05mm. A Figura 5 exemplifica a criação da malha.



**Figura 5 – Exemplo de malha criada no Salomé**

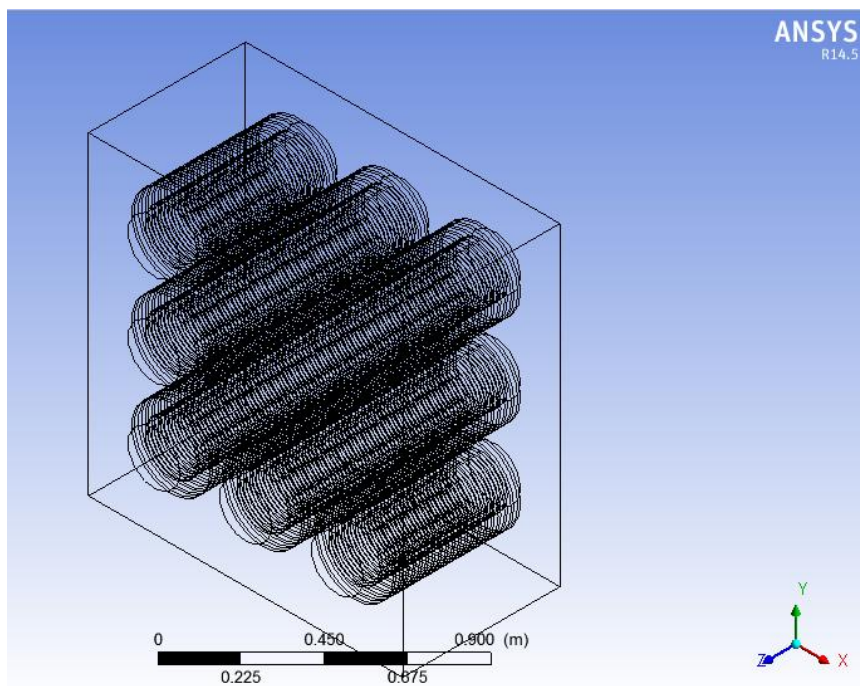
**Fonte: os autores.**

A escolha de uma malha com mesh igual a 0,05mm se deu através de uma avaliação considerando a capacidade de simulação dos computadores utilizados com malhas menores e a precisão dos resultados encontrados. Por fim, optou-se por um valor intermediário. Tal valor, apesar de não proporcionar malhas precisas, permitiu a realização da simulação em um tempo razoável, evitando problemas em etapas posteriores da simulação.

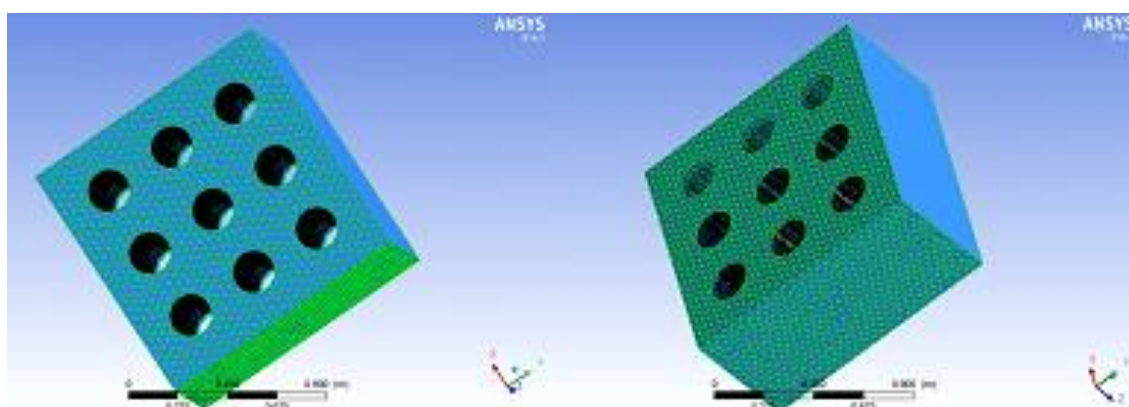
#### 4.3 SOFTWARE PARA SIMULAÇÃO

Tratando-se de um problema fluidodinâmico, a escolha deu-se pelo software comercial ANSYS CFX, disponibilizado pela UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná) a fim de estudo de caso e pesquisa. O software apresenta grande capacidade de análise e boa confiabilidade dos resultados, o que reforça seu uso.

As figuras 6 e 7 mostram as malhas que foram importadas do Salomé para o CFX-Pré, evidenciando a estrutura e a malha hexaédrica.



**Figura 6 - Malha importada no Salomé para o CFX-Pré.  
Fonte: os autores.**



**Figura 7 - Malha hexaédrica da geometria do trocador de calor em planos diferentes.  
Fonte: os autores.**

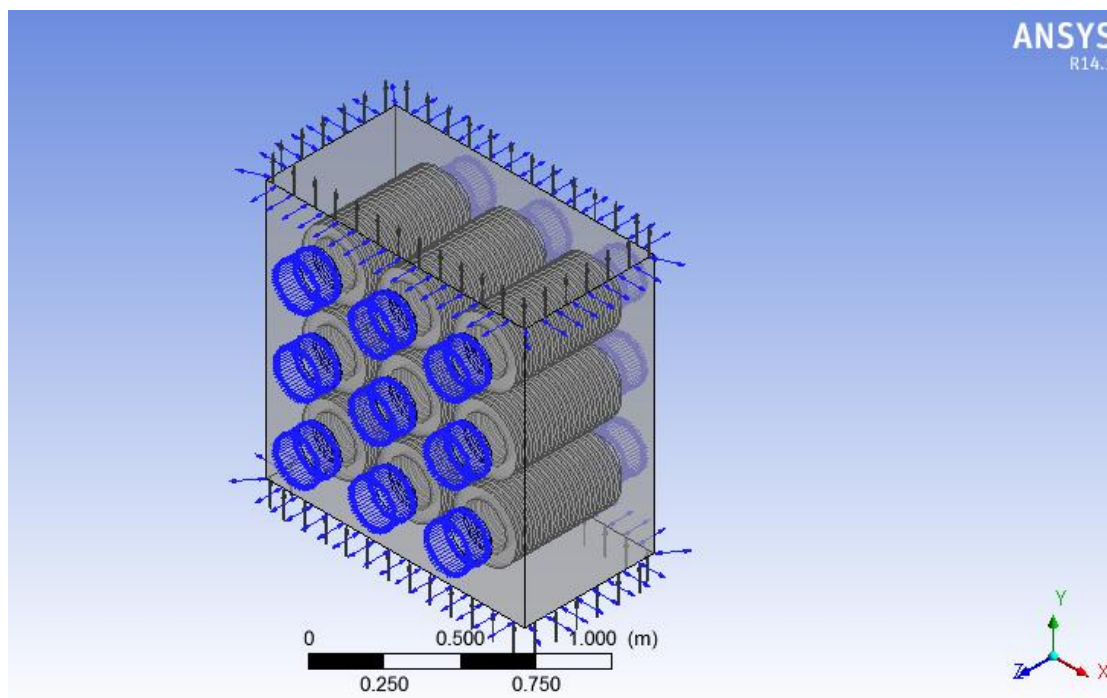
A seguir serão mostrados os parâmetros e condições de contorno utilizados nas simulações realizadas no programa ANSYS CFX.

#### 4.3.1 Definição das Condições de Contorno

Primeiramente, foram definidos os fluxos de entrada e saída do fluido, denominados “inlets” e “outlets”, respectivamente. O módulo utilizado foi o General

no CFX-Pré, que permite importar os arquivos Mesh gerados pelo Salomé com as condições de contorno pré-definidas.

A Figura 8 mostra o mesh importado exibindo as condições de contorno pré-definidas.



**Figura 8 - Condições de contorno pré-definidas pelo Salomé.**  
Fonte: os autores.

Posteriormente, as demais condições (temperatura, pressão, velocidade) foram definidas no Ansys CFX.

A temperatura de entrada da corrente de ar frio foi definida como sendo 25°C e a temperatura das paredes do tubo sendo 90°C. Ambas estando a 1 atm de pressão atmosférica e o fluido com velocidade de 2 m/s em regime permanente.

#### 4.3.2 Escolha do modelo de turbulência adequado para o cálculo

O modelo desenvolvido efetua a solução da forma turbulenta da equação de Navier Stokes e da equação de conservação de energia. A turbulência foi incorporada através do uso do modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  padrão.

Segundo Maliska o modelo  $k$ - $\epsilon$  é estável e numericamente robusto. É considerado um dos mais proeminentes modelos de turbulência e encontra-se

implementando na maior parte dos códigos de CFD. Klein corroborando com Maliska afirma que este é um modelo conhecido por ser o modelo padrão das indústrias.

#### 4.3.3 Obtenção de solução

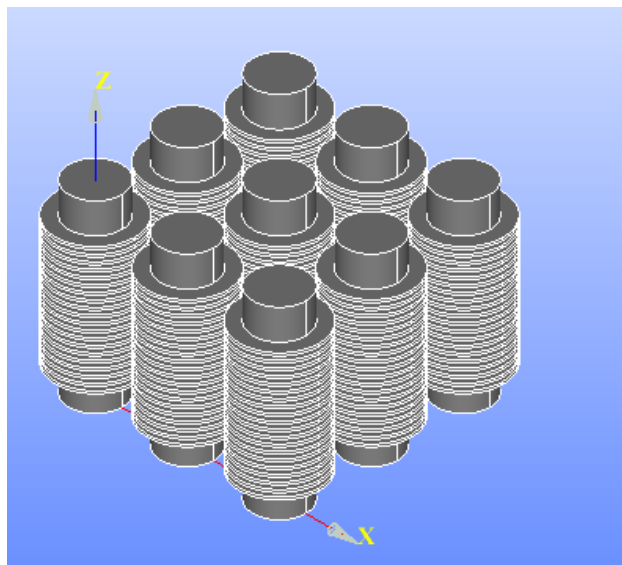
Feita a modelagem de todas as condições de contornos e dos parâmetros de controle de solução no CFX-Pré, o modelo matemático é solucionado no ambiente do CFX-Solver.

O solver resolve todas as variáveis para a simulação do problema especificado no CFX-Pré. Uma das características mais importantes do CFX é a utilização de um solver acoplado, no qual todas as equações fluidodinâmicas são resolvidas como um sistema único.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

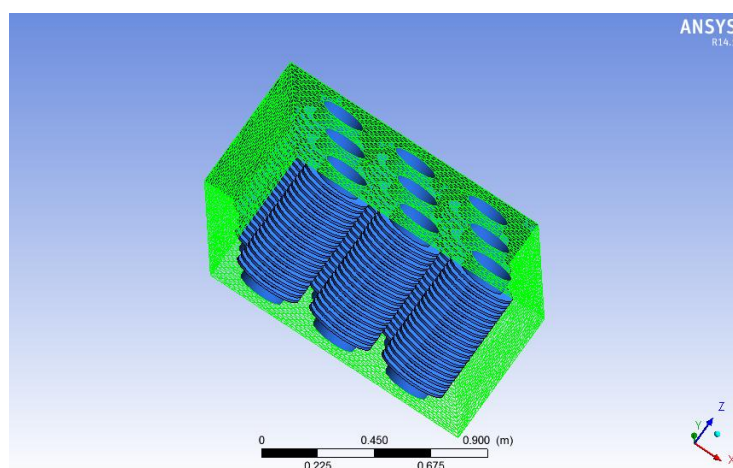
### 5.1 ALETAS ANULARES

As figuras a seguir trazem o desenho do trocador de calor e um corte interno da malha, mostrando os tubos aletados no trocador e o cubo por onde escoará o fluido externo (corrente fria) antes da simulação.



**Figura 9 - Trocador de calor tubo aleta com aletas anulares feito no Salomé.**

**Fonte: os autores.**



**Figura 10 - Corte longitudinal do trocador de calor tubo aleta com aletas anulares.**

**Fonte: os autores.**

Após definir as condições citadas anteriormente e executar o programa, foram plotados planos e pontos para facilitar a visualização do perfil de temperatura do fluido externo.

As figuras a seguir mostram a variação de temperatura em todo o volume do trocador, bem como diferentes cortes do perfil de temperatura.

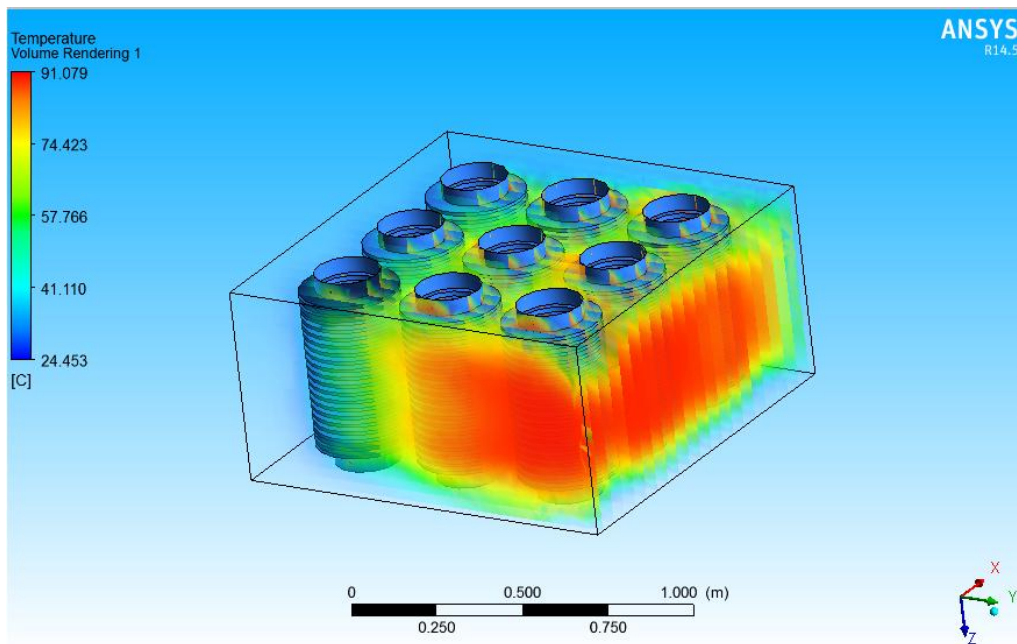


Figura 11 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.  
Fonte: os autores.

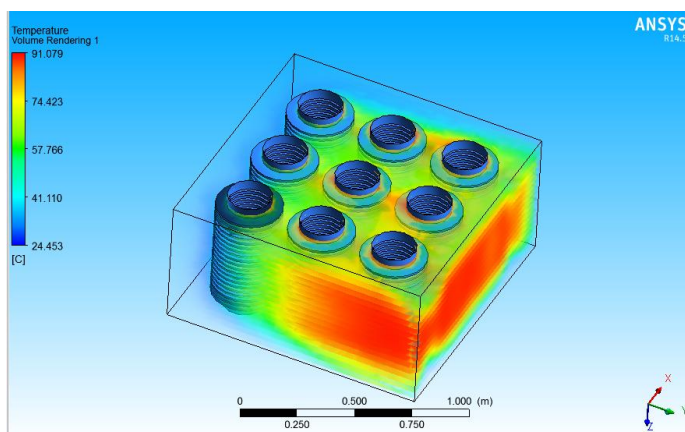


Figura 12 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.  
Fonte: os autores.

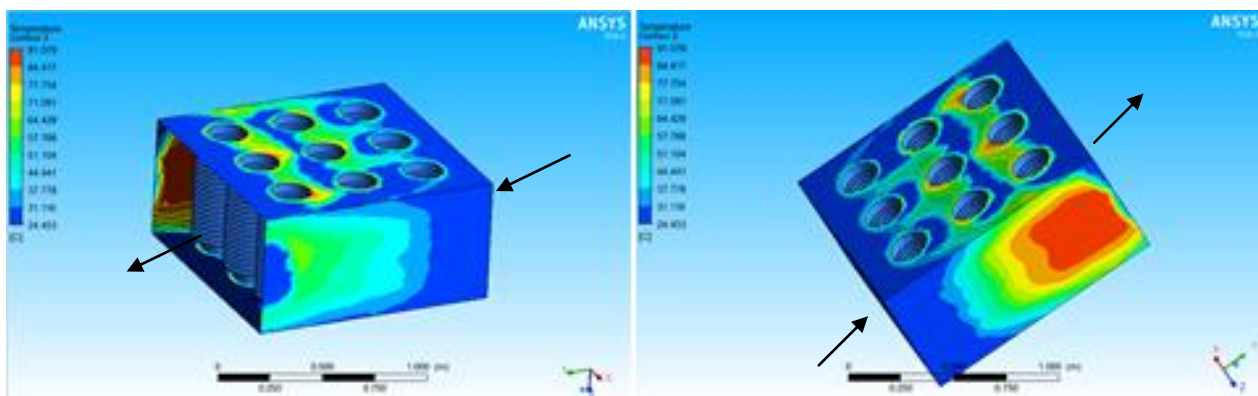
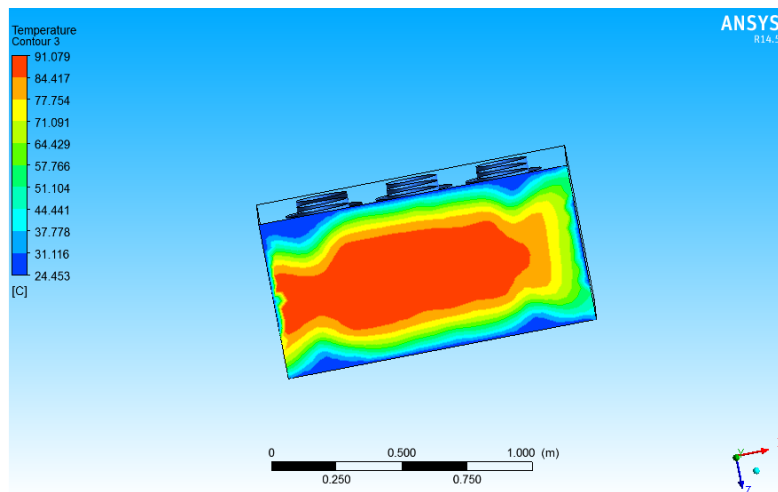


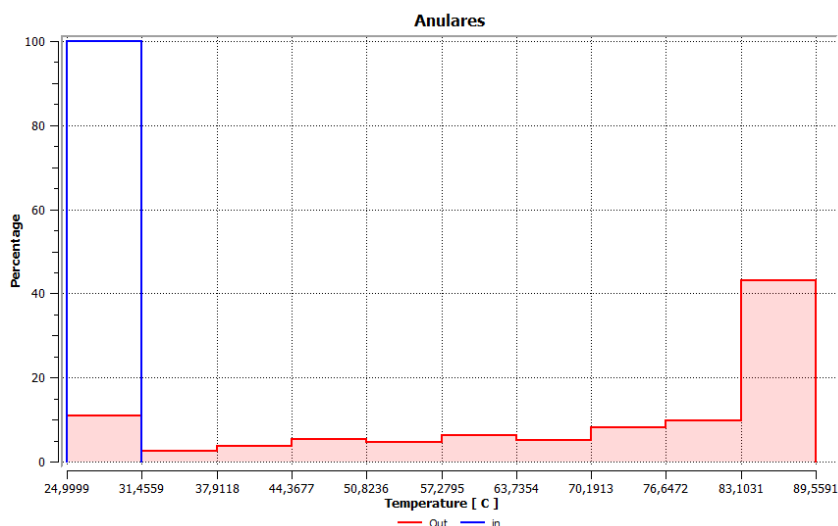
Figura 13 - Perfil de temperatura obtido com a ferramenta Counter.  
Fonte: os autores.

Na Figura 13 podemos observar o perfil de temperatura ao longo do fluxo de ar. Já a Figura 14 nos mostra o perfil de temperatura do ar na saída do trocador de calor.



**Figura 14 - Perfil de temperatura na saída do escoamento.**  
Fonte: os autores.

O Gráfico 1 mostra a variação de temperatura no plano de entrada e de saída do escoamento, sendo a temperatura no plano de entrada representada pela cor azul, enquanto que a temperatura no plano de saída está representada no gráfico pela cor vermelha.



**Gráfico 1 - Gráfico obtido pela ferramenta Chart.**  
Fonte: os autores.

No gráfico 1 pode-se observar que o fluido entra no escoamento com uma temperatura que não ultrapassa os 25°C, representada pela coluna em azul no

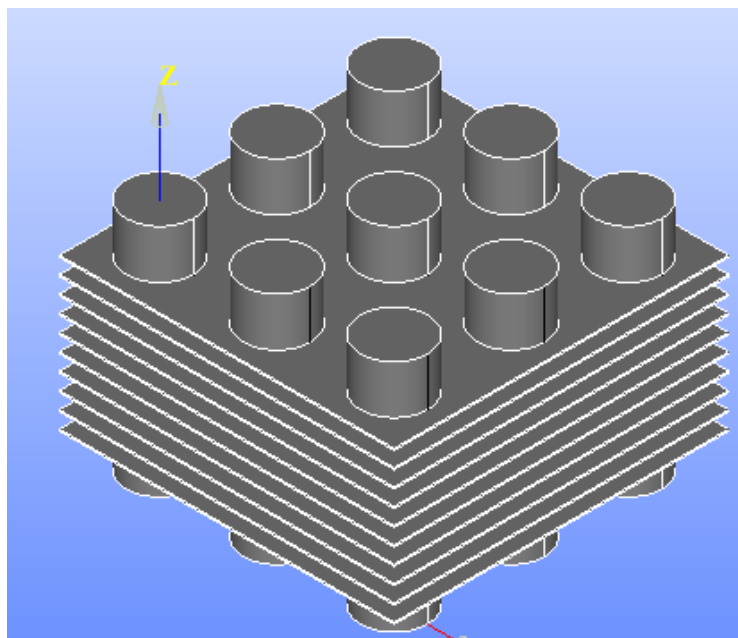


gráfico. Já a temperatura no plano de saída sofre variações causadas pela turbulência do sistema e, conseqüentemente, pela troca de calor no escoamento. A distribuição dessa temperatura está representada no gráfico pelas colunas em vermelho, onde cada uma delas representa a porcentagem de ar que sai do trocador de calor com aquela determinada faixa de temperatura. Assim, pode-se observar que aproximadamente 45% do volume de ar sai do escoamento com temperaturas variando entre  $83^{\circ}\text{C}$  e  $89,6^{\circ}\text{C}$ .

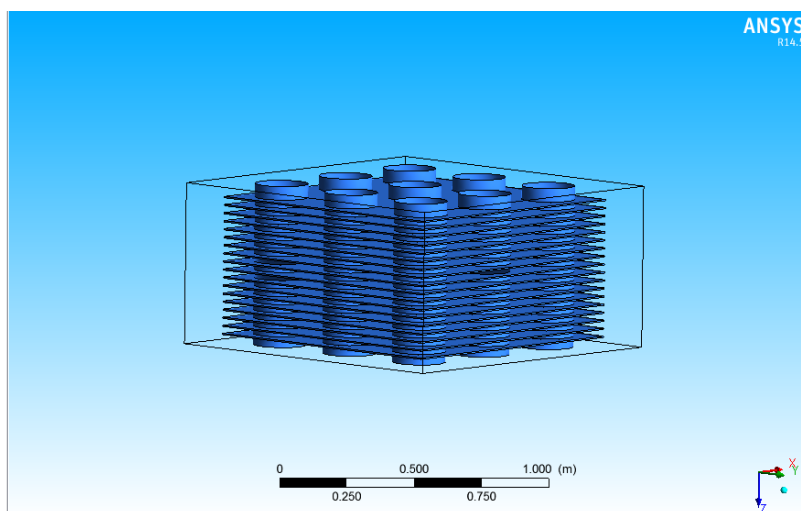
Com este gráfico pode-se realizar a integral da temperatura no plano de saída para obter a temperatura que será utilizada como parâmetro de comparação entre as diferentes geometrias de aletas. A integral da temperatura encontrada para o trocador de calor com aletas anulares foi de  $110,23^{\circ}\text{C}$ .

## 5.2 ALETAS DE PLACAS

As figuras a seguir trazem o desenho do trocador de calor e um corte interno da malha, mostrando os tubos aletados no trocador e o cubo por onde escoará o fluido externo (corrente fria) antes da simulação.



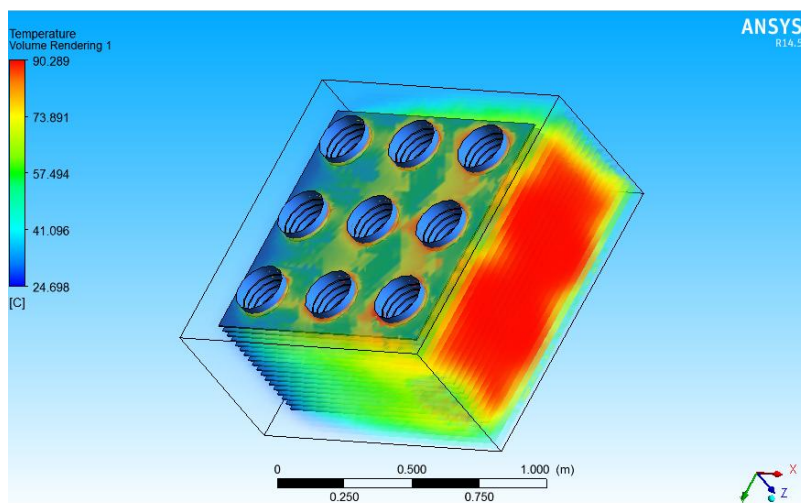
**Figura 15 - Trocador de calor tubo aleta com aletas de placas feito no Salomé.  
Fonte: os autores.**



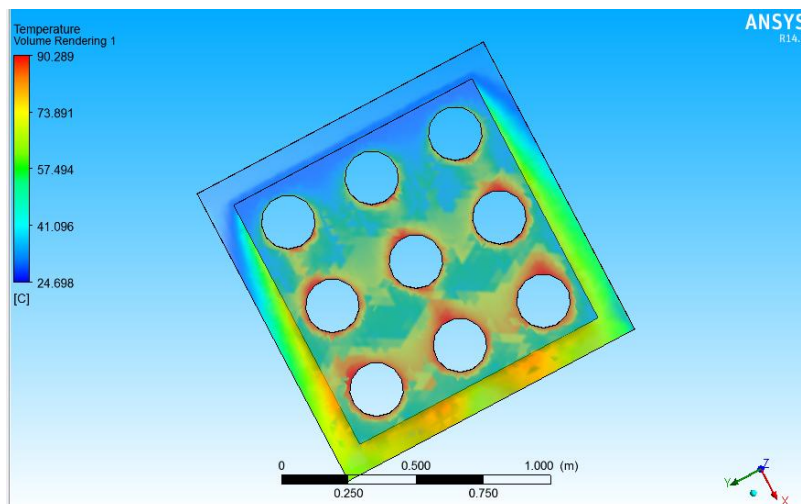
**Figura 16 - Corte longitudinal do trocador de calor tubo aleta com aletas de placas.**  
**Fonte: os autores.**

Após definir as condições citadas anteriormente e executar o programa foram plotados planos e pontos para facilitar a visualização do perfil de temperatura do fluido externo.

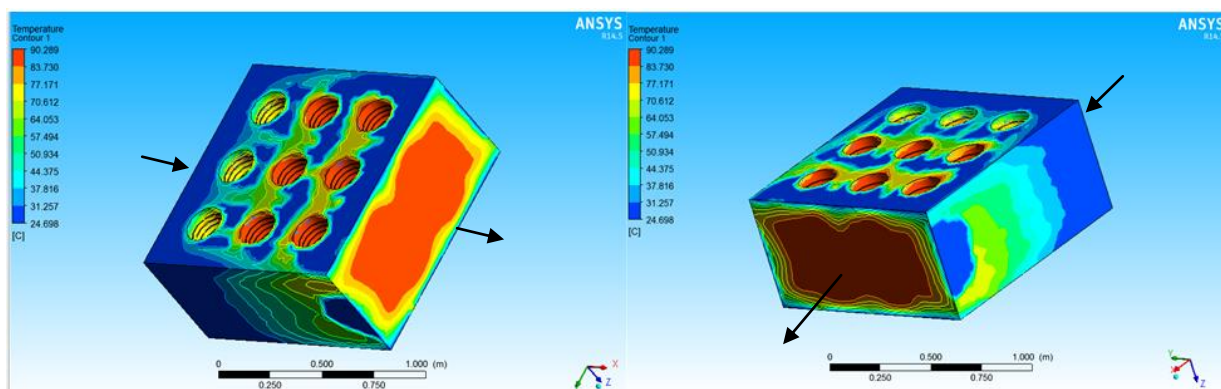
As figuras a seguir mostram a variação de temperatura em todo o volume do trocador, bem como diferentes cortes do perfil de temperatura.



**Figura 17 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.**  
**Fonte: os autores.**

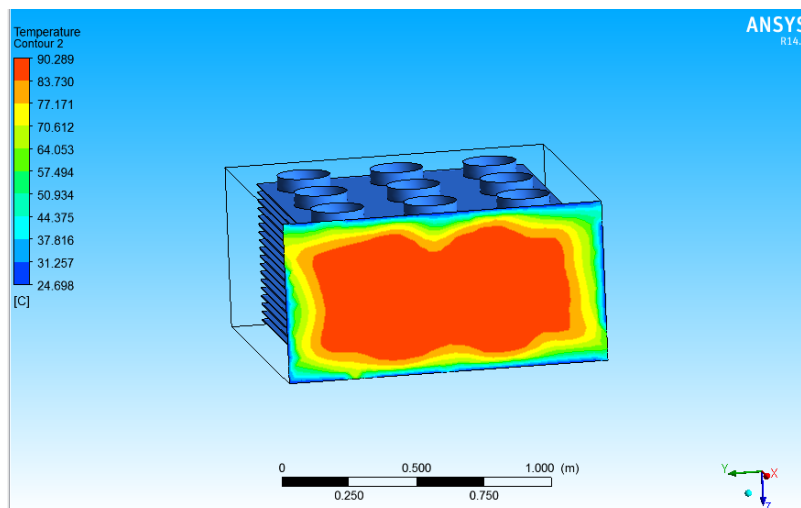


**Figura 18 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.**  
**Fonte: os autores.**



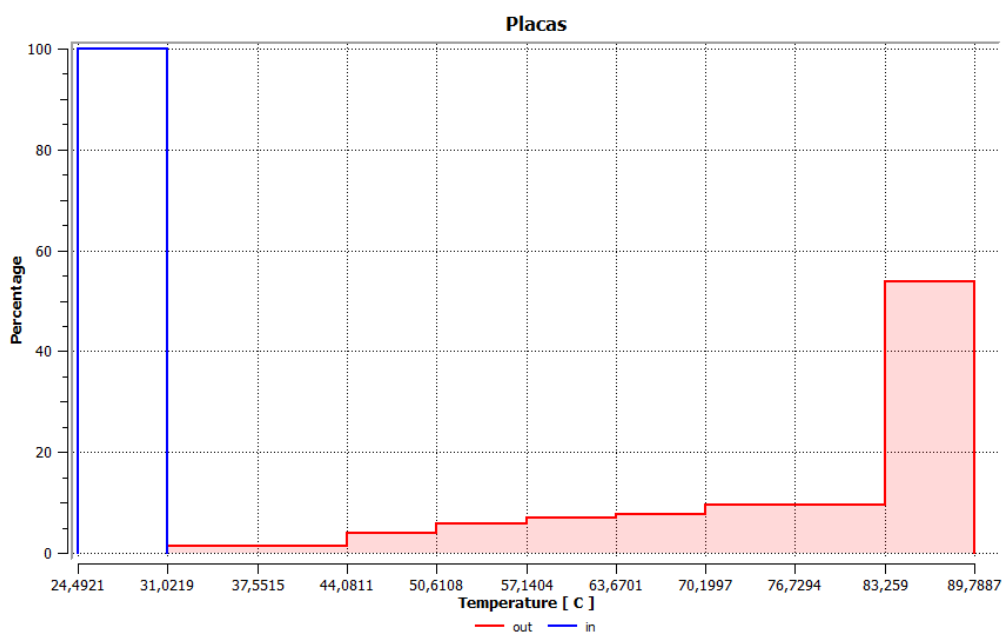
**Figura 19 - Perfil de temperatura obtido com a ferramenta Contour.**  
**Fonte: os autores.**

Na Figura 20 podemos observar o perfil de temperatura ao longo do fluxo de ar. Já a Figura 21 nos mostra o perfil de temperatura do ar na saída do trocador de calor.



**Figura 20 - Perfil de temperatura na saída do escoamento.**  
Fonte: os autores.

O Gráfico a seguir mostra a variação de temperatura no plano de entrada e de saída do escoamento:

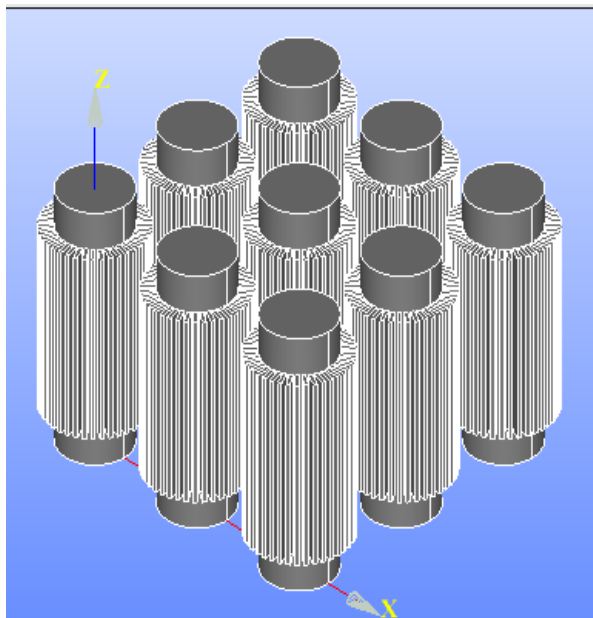


**Gráfico 2 - Gráfico obtido pela ferramenta Chart.**  
Fonte: os autores.

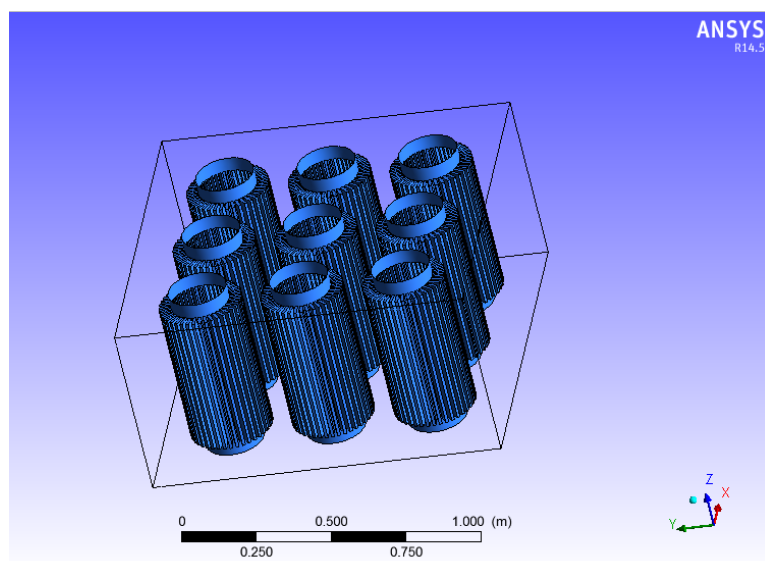
No gráfico 2 pode-se observar que na entrada o ar está 100% a 25°C, porém na saída do mesmo existem diversas temperaturas diferentes o que nos mostra que houve a transferência de calor ao longo do trocador de calor. Com este gráfico pode-se realizar a integral do plano de saída a qual obteve-se o valor de 78,84°C.

### 5.3 ALETAS PLANAS VERTICAIS

As figuras a seguir trazem o desenho do trocador de calor e um corte interno da malha, mostrando os tubos aletados no trocador e o cubo por onde escoará o fluido externo (corrente fria) antes da simulação.



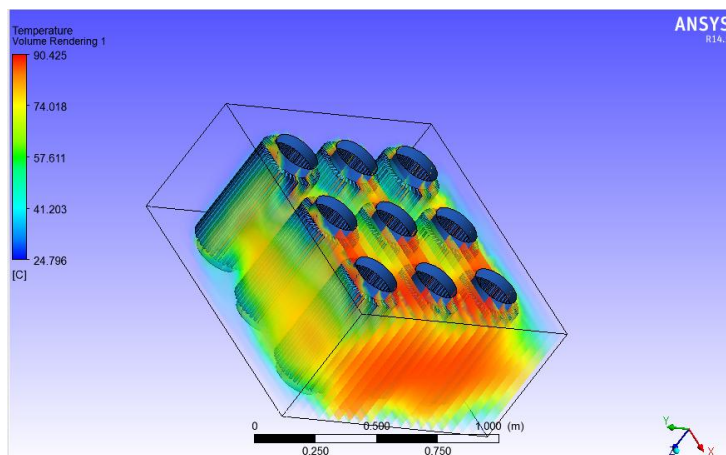
**Figura 21 - Trocador de calor tubo aleta com aletas de planas verticais feito no Salomé.**  
Fonte: os autores.



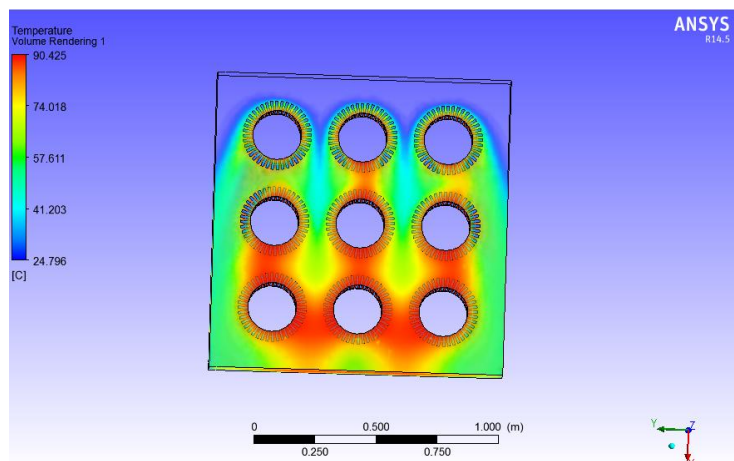
**Figura 22 - Corte longitudinal do trocador de calor tubo aleta com aletas planas verticais.**  
Fonte: os autores.

Após definir as condições citadas anteriormente e executar o programa foram plotados planos e pontos para facilitar a visualização do perfil de temperatura do fluido externo.

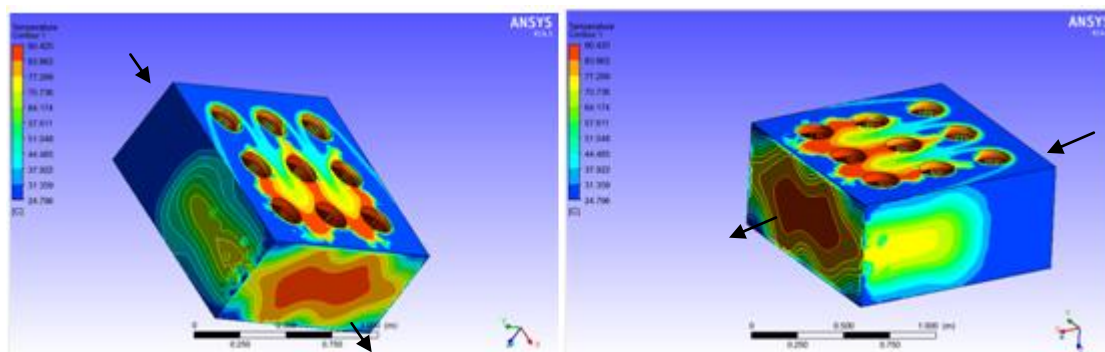
As figuras a seguir mostram a variação de temperatura em todo o volume do trocador, bem como diferentes cortes do perfil de temperatura.



**Figura 23 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.**  
Fonte: os autores.

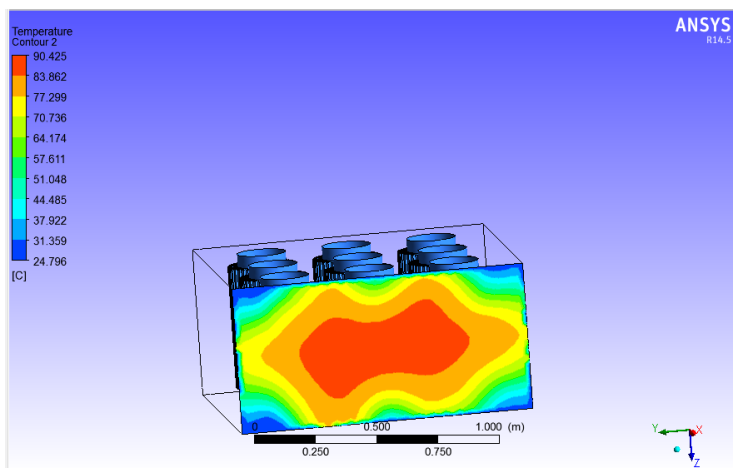


**Figura 24 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.**  
Fonte: os autores.



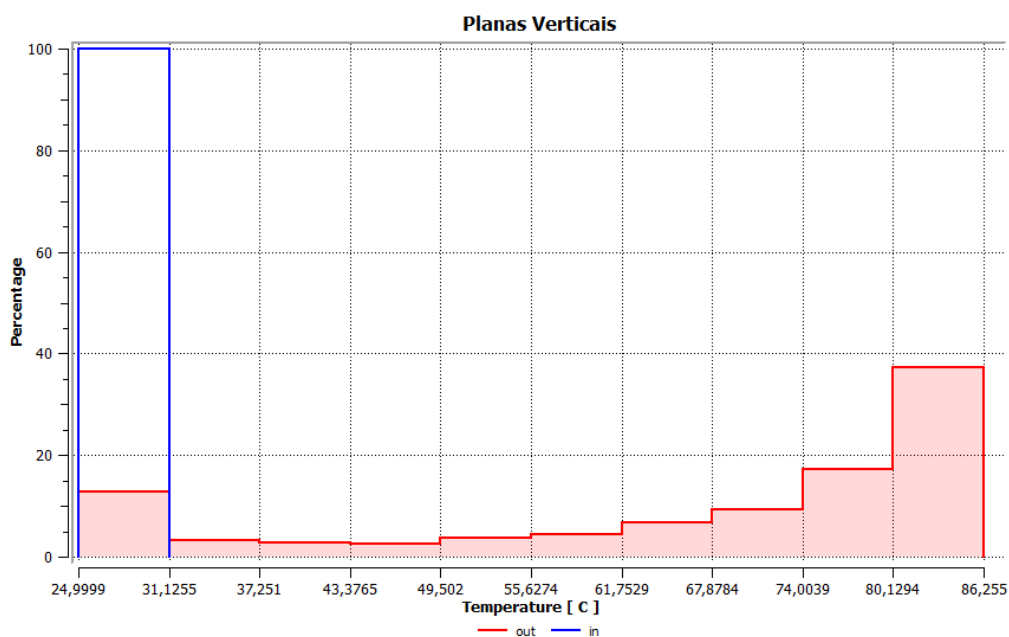
**Figura 25 - Perfil de temperatura obtido com a ferramenta Counter.**  
Fonte: os autores.

Na Figura 26 podemos observar o perfil de temperatura ao longo do fluxo de ar. Já a Figura 27 nos mostra o perfil de temperatura do ar na saída do trocador de calor.



**Figura 26 - Perfil de temperatura na saída do escoamento.**  
**Fonte: os autores.**

O Gráfico a seguir mostra a variação de temperatura no plano de entrada e de saída do escoamento:



**Gráfico 3 - Gráfico obtido pela ferramenta Chart**  
**Fonte: os autores**

No gráfico 3 pode-se observar que na entrada o ar está 100% a 25°C, porém na saída do mesmo existem diversas temperaturas diferentes o que nos mostra que houve a transferência de calor ao longo do trocador de calor. Com este gráfico pode-se realizar a integral do plano de saída a qual obteve-se o valor de 72,05°C.



#### 5.4 TROCADOR DE CALOR COM ALETAS PINIFORMES

As figuras a seguir trazem o desenho do trocador de calor e um corte interno da malha, mostrando os tubos do trocador antes da simulação.

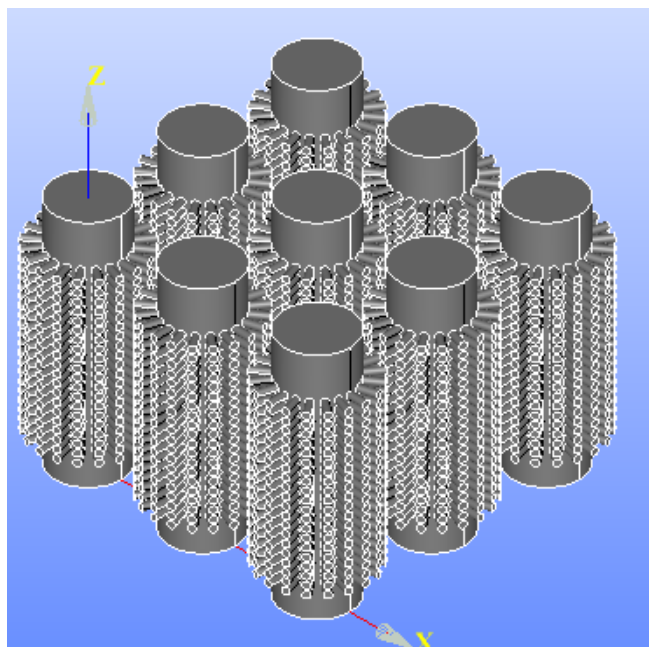


Figura 27 - Trocador de calor tubo-aleta com aletas piniformes feito no Salomé.  
Fonte: os autores.

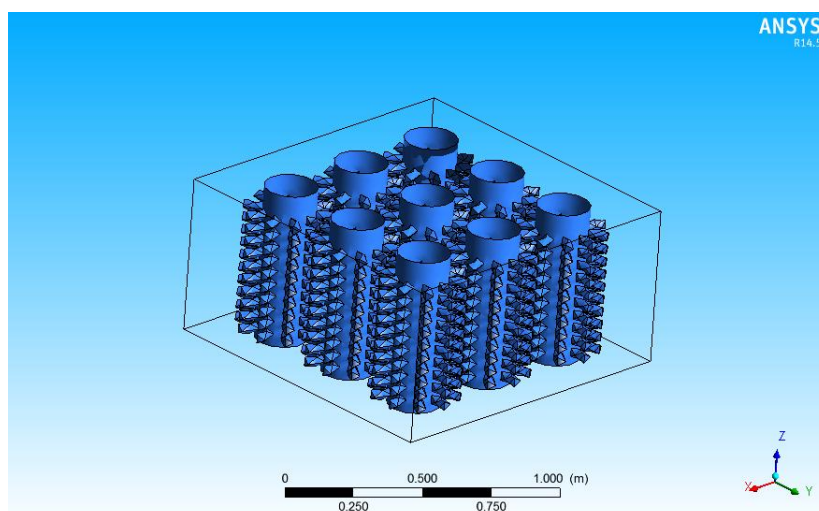
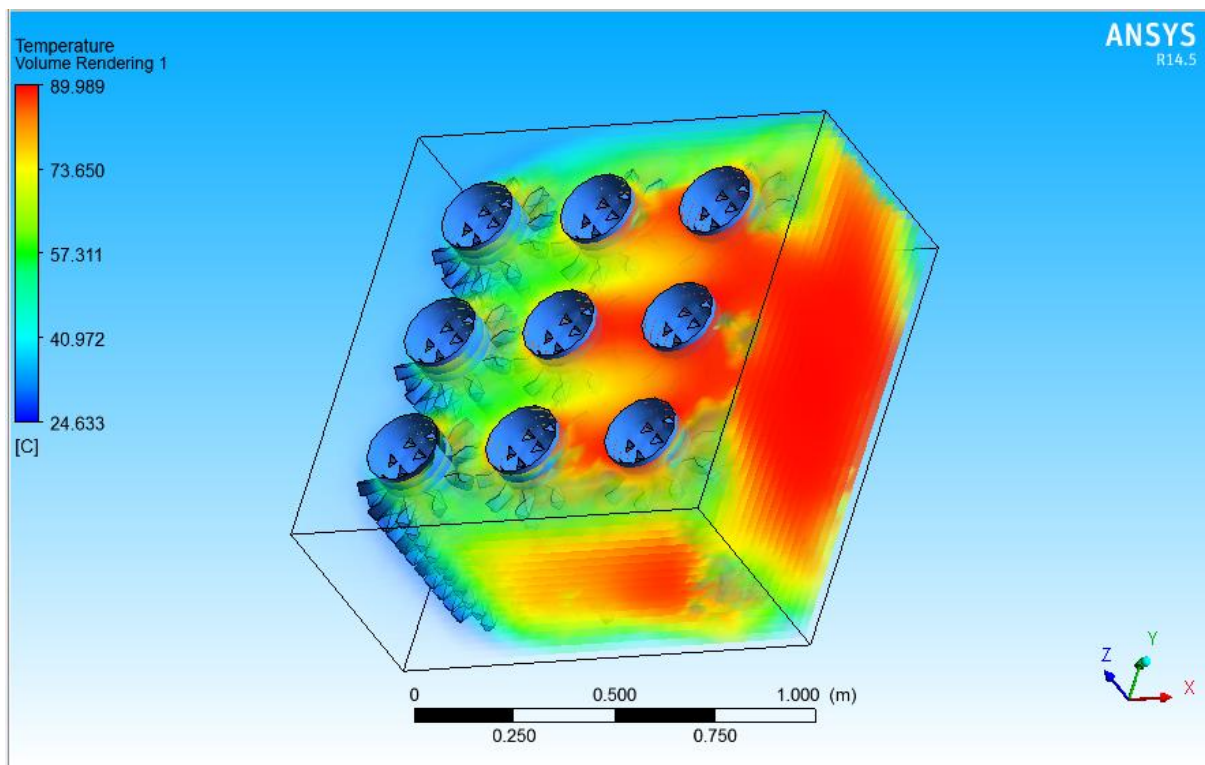


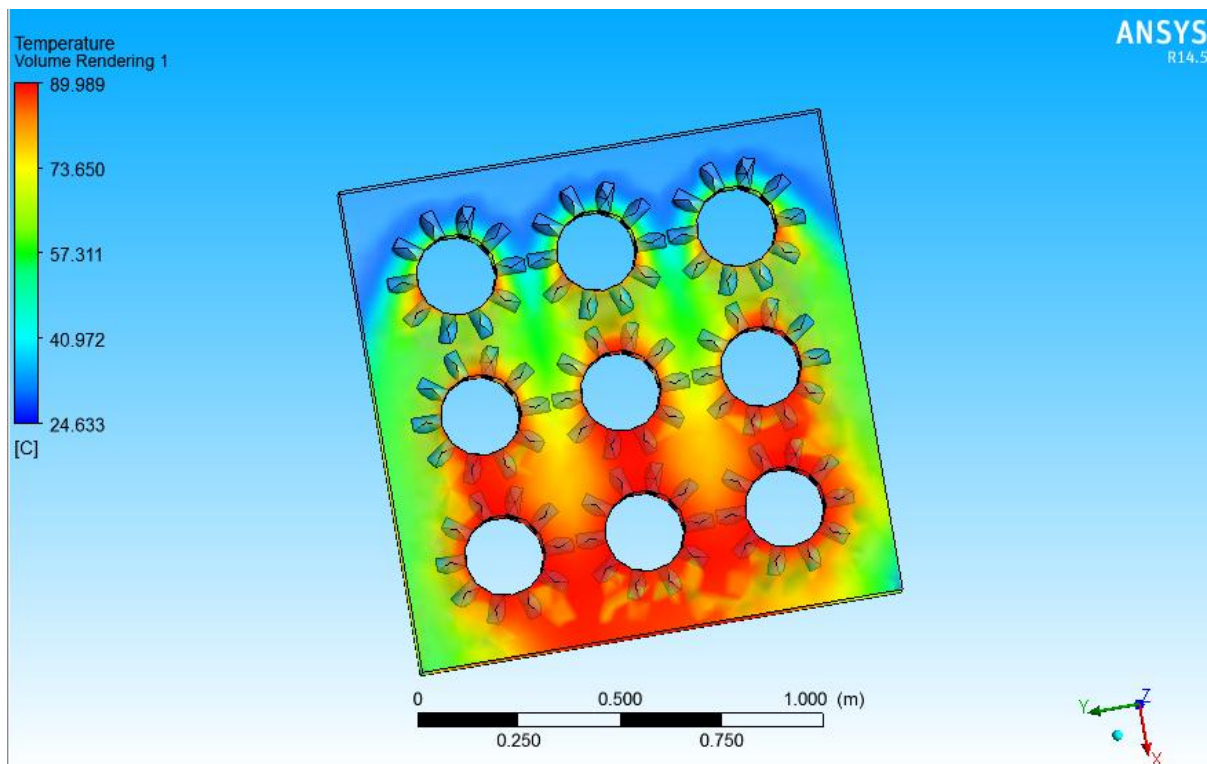
Figura 28 - Trocador de calor com aletas piniformes.  
Fonte: os autores.

Após definir as condições citadas anteriormente e executar o programa foram plotados planos e pontos para facilitar a visualização do perfil de temperatura do fluido externo.

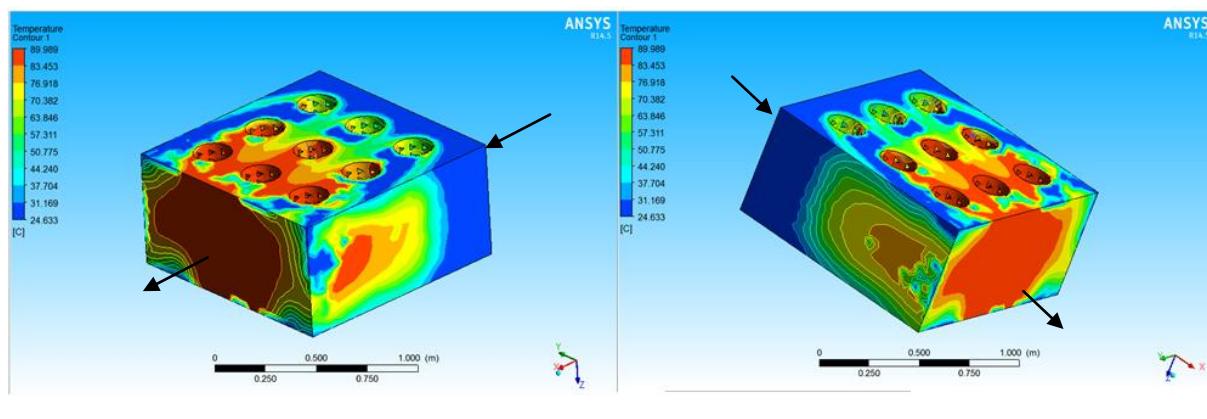
As figuras a seguir mostram a variação de temperatura em todo o volume do trocador, bem como diferentes cortes do perfil de temperatura.



**Figura 29 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.  
Fonte: os autores.**

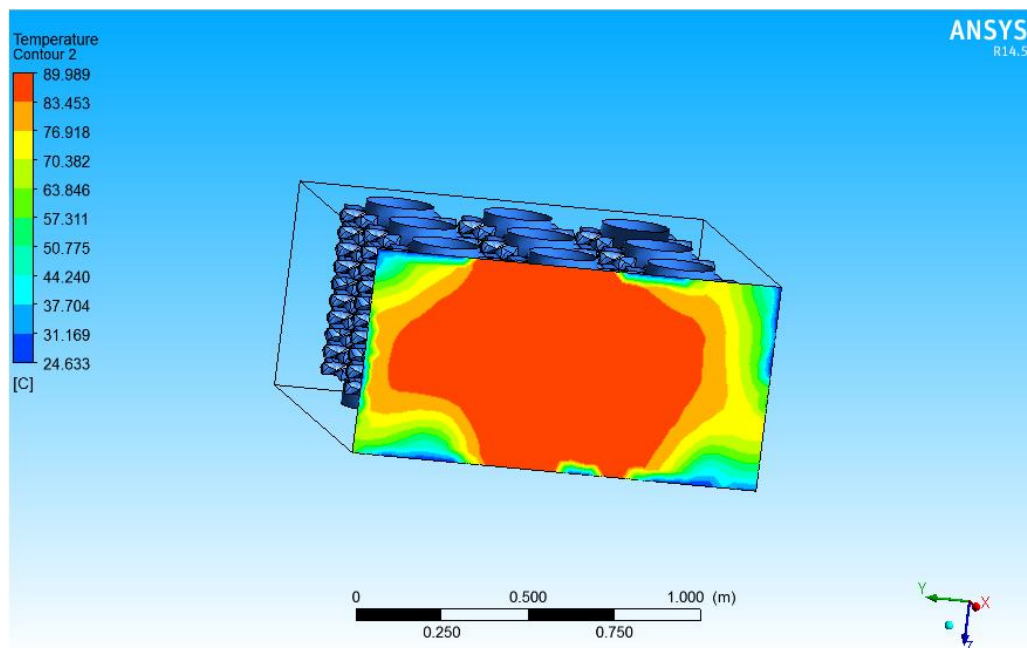


**Figura 30 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.**  
Fonte: os autores.



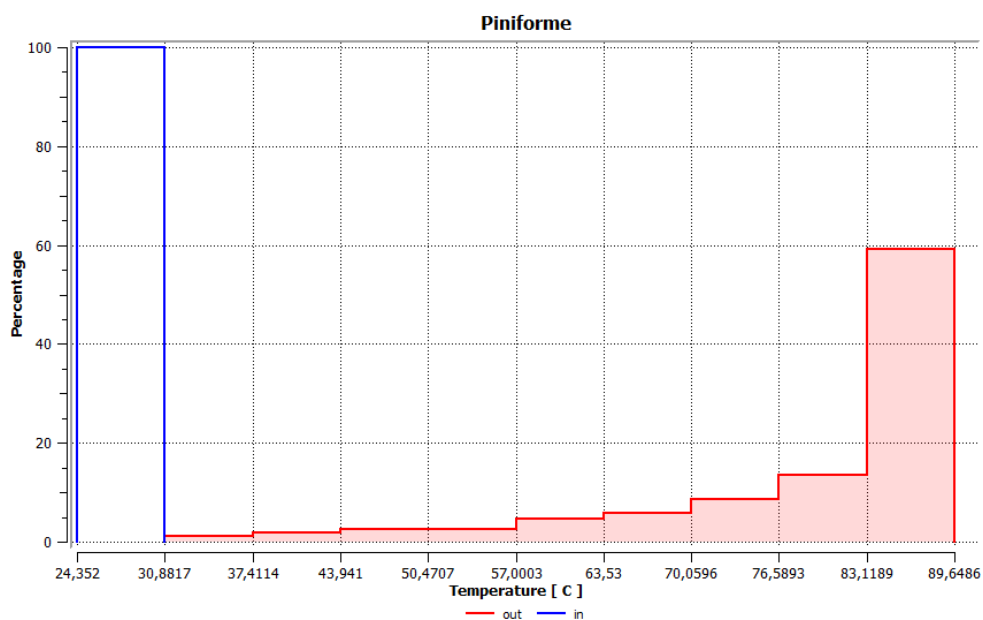
**Figura 31 - Perfil de temperatura obtido com a ferramenta Counter.**  
Fonte: os autores.

Na Figura 32 podemos observar o perfil de temperatura ao longo do fluxo de ar. Já a Figura 33 nos mostra o perfil de temperatura do ar na saída do trocador de calor.



**Figura 32 - Perfil de temperatura na saída do escoamento.**  
**Fonte: os autores.**

O Gráfico a seguir mostra a variação de temperatura no plano de entrada e de saída do escoamento:



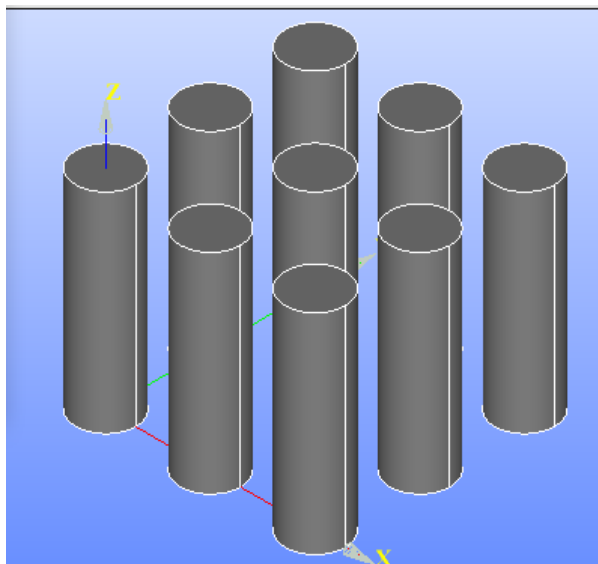
**Gráfico 4 - Gráfico obtido pela ferramenta Chart.**  
**Fonte: os autores**

No gráfico 4 pode-se observar que na entrada o ar está 100% a 25°C, porém na saída do mesmo existem diversas temperaturas diferentes o que nos mostra que houve a transferência de calor ao longo do trocador de calor. Com este gráfico pode-se realizar a integral do plano de saída a qual obteve-se o valor de 80,25°C.

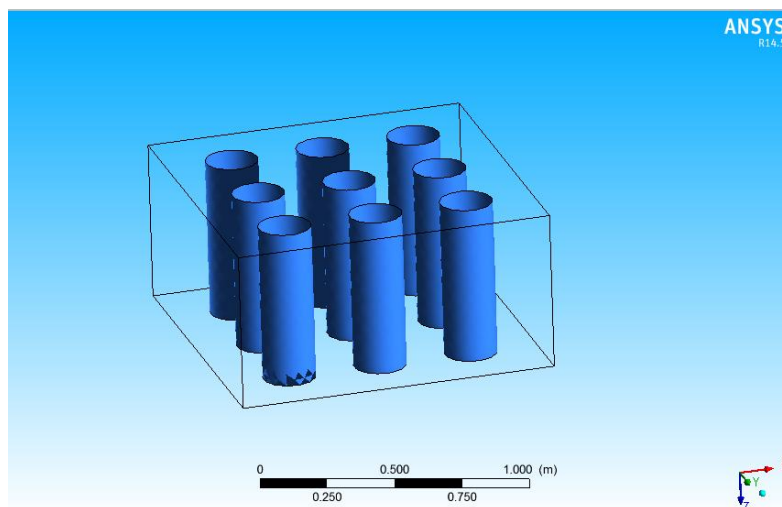
## 5.5 TROCADOR DE CALOR SEM ALETAS

As simulações de um trocador de calor sem aletas foram realizadas apenas para efeito de comparação e justificativa do uso das mesmas.

As figuras a seguir trazem o desenho do trocador de calor e um corte interno da malha, mostrando os tubos do trocador antes da simulação.



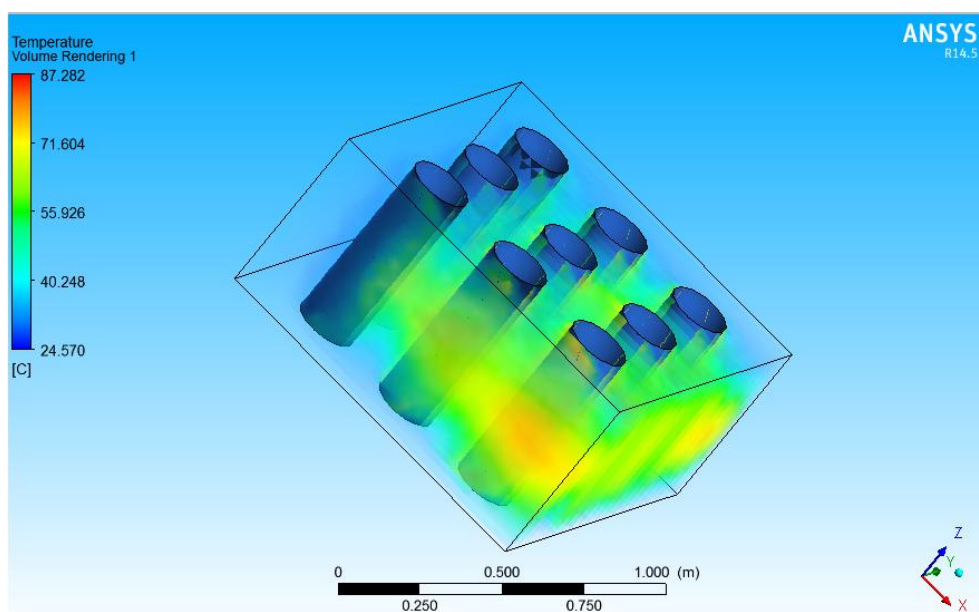
**Figura 33 - Trocador de calor tubo sem aletas feito no Salomé.  
Fonte: os autores.**



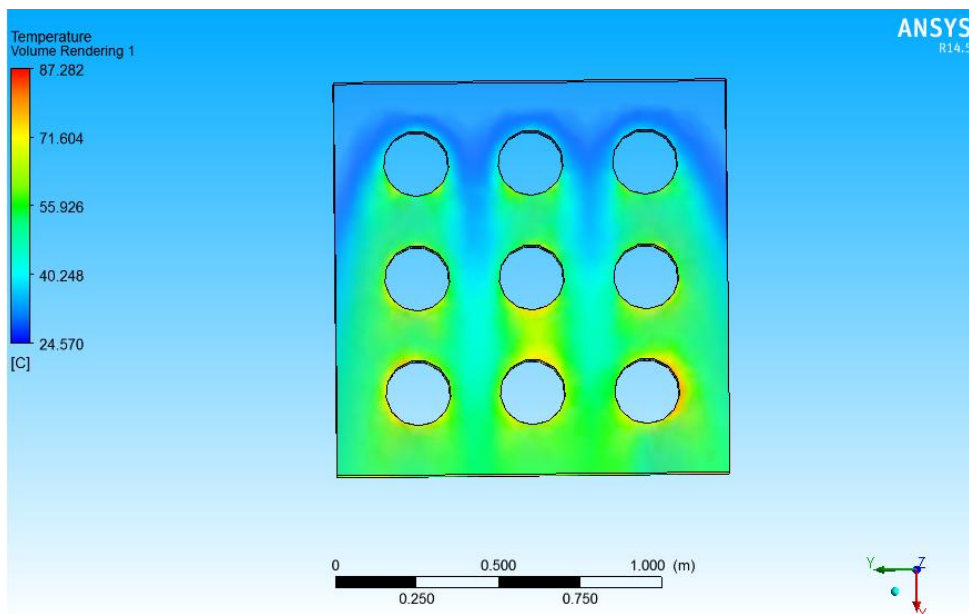
**Figura 34 - Corte longitudinal do trocador de calor sem aletas.**  
Fonte: os autores.

Após definir as condições citadas anteriormente e executar o programa foram plotados planos e pontos para facilitar a visualização do perfil de temperatura do fluido externo.

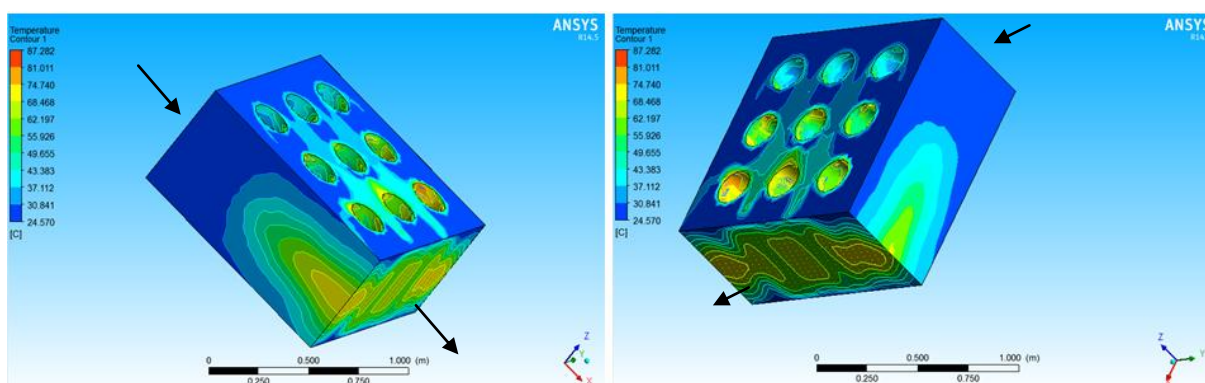
As figuras a seguir mostram a variação de temperatura em todo o volume do trocador, bem como diferentes cortes do perfil de temperatura.



**Figura 35 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.**  
Fonte: os autores.

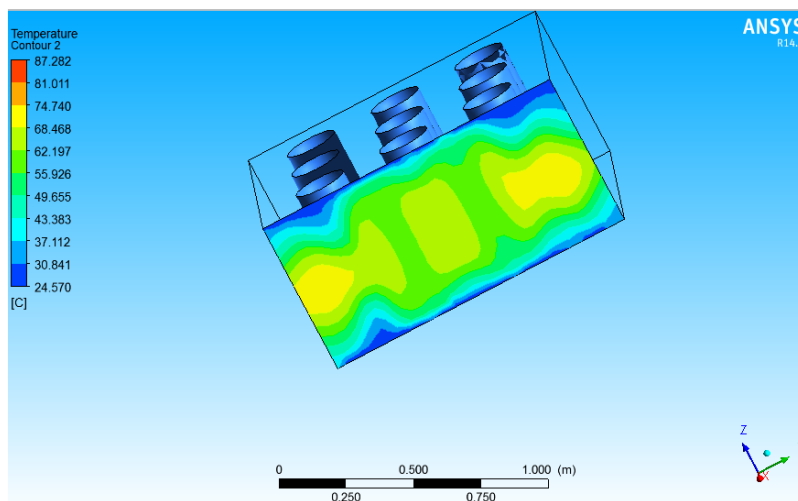


**Figura 36 - Perfil de temperatura obtido com Volume Rendering.**  
Fonte: os autores.



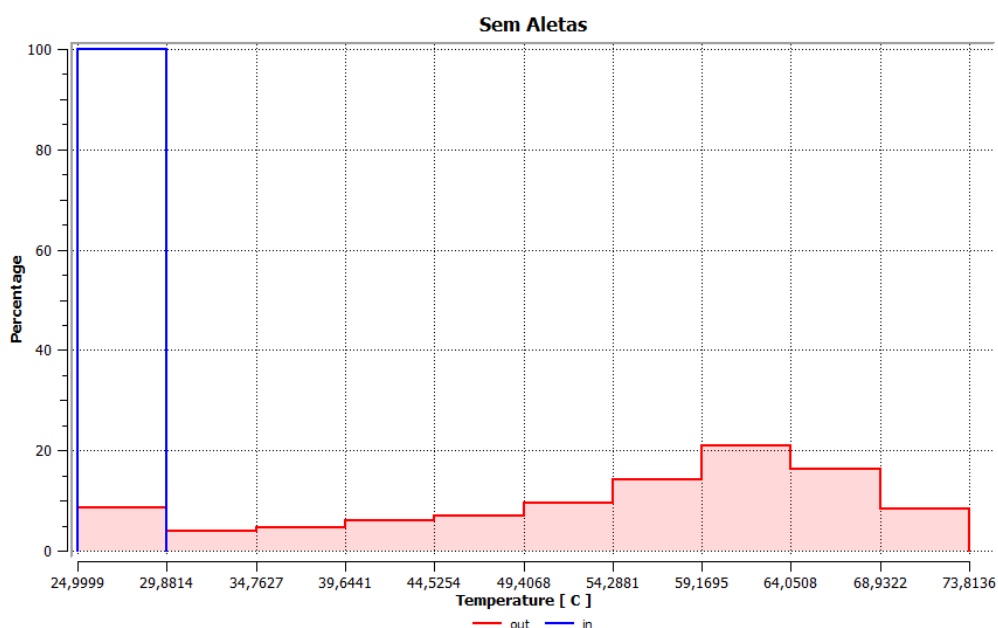
**Figura 37 - Perfil de temperatura obtido com a ferramenta Counter.**  
Fonte: os autores.

Na Figura 38 podemos observar o perfil de temperatura ao longo do fluxo de ar. Já a Figura 39 nos mostra o perfil de temperatura do ar na saída do trocador de calor.



**Figura 38 - Perfil de temperatura na saída do escoamento.**  
**Fonte: os autores.**

O Gráfico a seguir mostra a variação de temperatura no plano de entrada e de saída do escoamento:



**Gráfico 5 - Gráfico obtido pela ferramenta Chart.**  
**Fonte: os autores**

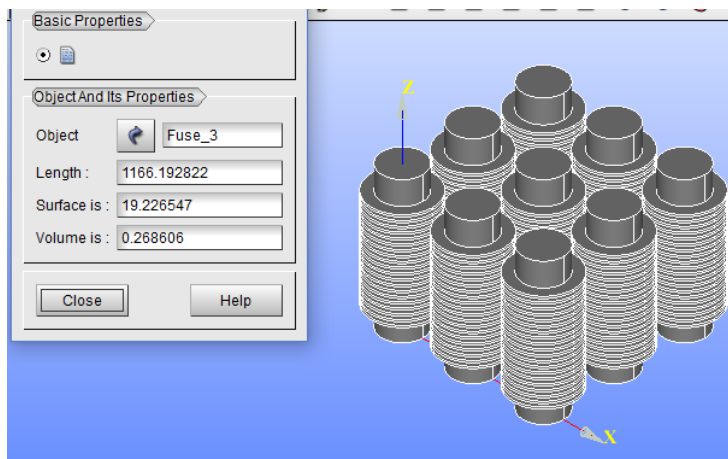
No gráfico 5 pode-se observar que na entrada o ar está 100% a 25°C, porém na saída do mesmo existem diversas temperaturas diferentes o que nos mostra que houve a transferência de calor ao longo do trocador de calor. Com este gráfico pode-se realizar a integral do plano de saída a qual obteve-se o valor de 55,52°C.



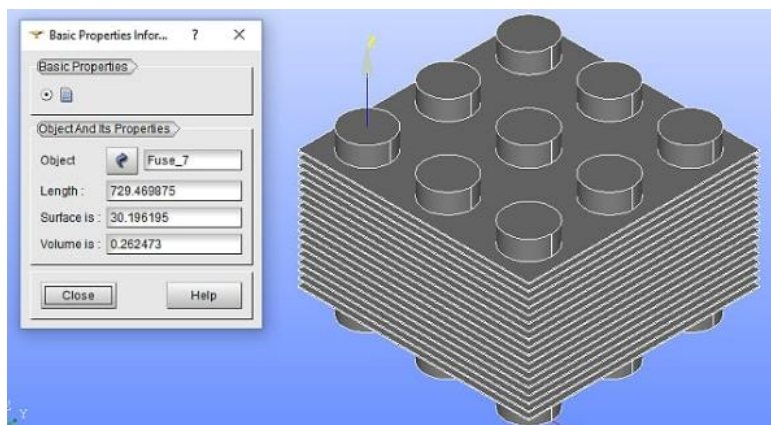
Com essa simulação pode-se perceber a justificativa do uso de aletas, pois neste trocador de calor sem aletas o perfil de temperatura na saída do escoamento é visivelmente mais frio que os demais e isso se comprova com a integral do mesmo.

## 5.6 ANÁLISE COMPARATIVA

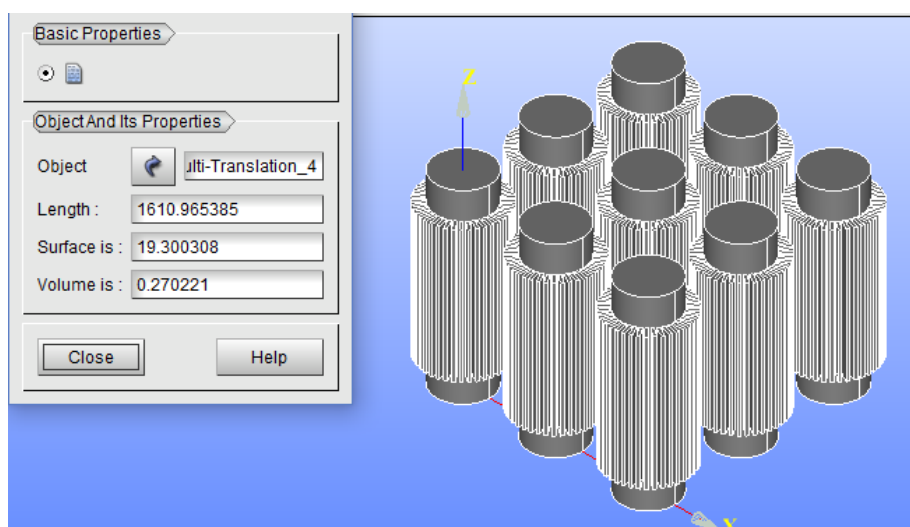
Com o auxílio do software Salomé foi possível obter o volume e a área de troca térmica de cada trocador de calor, como mostram as figuras a seguir, para as geometrias de aletas anulares, de placas, planas verticais, piniformes e do trocador de calor sem aletas, respectivamente.



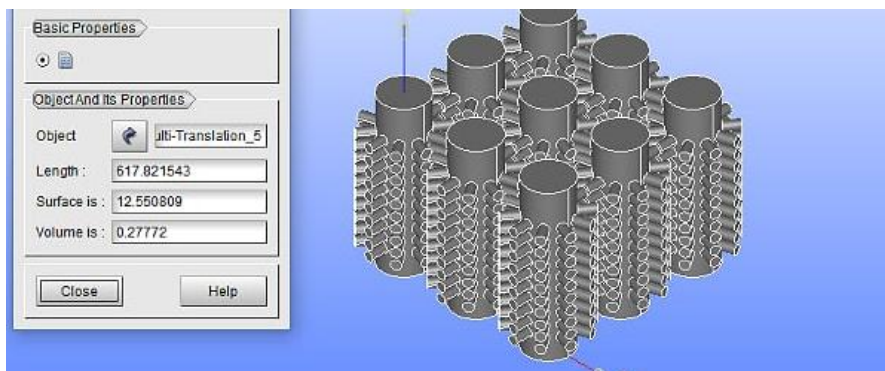
**Figura 39 - Volume do trocador com aletas anulares.**  
**Fonte: os autores.**



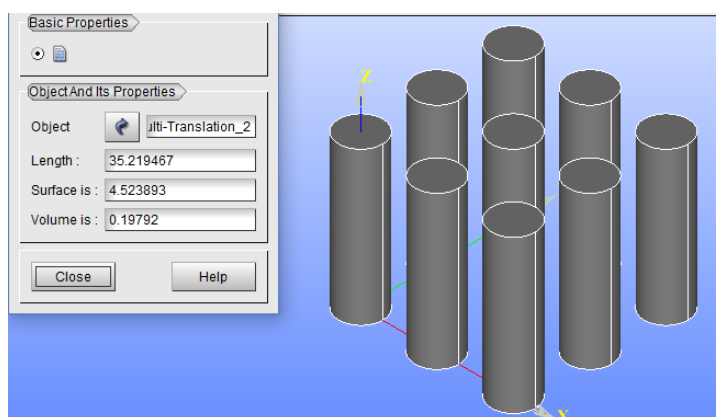
**Figura 40 - Volume do trocador de calor com aletas em placas.**  
**Fonte: os autores.**



**Figura 41 - Volume do trocador de calor com aletas planas verticais.**  
**Fonte: os autores**



**Figura 42 - Volume do trocador de calor com aletas piniforme.**  
**Fonte: os autores**



**Figura 43 - Volume do trocador de calor sem aletas.**  
**Fonte: os autores.**

Com os dados de volume, área de troca térmica presentes nas Figuras 40, 41, 42, 43 e 44 e a integral da temperatura nos planos de saída do escoamento de cada um dos trocadores de calor simulados, efetuada através da ferramenta *Function Calculator* ou da *Expressions* no software CFX-Post, foi possível obter os dados da Tabela 1 a seguir.

Com tais dados pode-se calcular o peso, a taxa de transferência de calor em cada um dos trocadores de calor estudados. Para os cálculos foram utilizados a densidade do alumínio ( $2700 \text{ Kg/m}^3$ ) e o coeficiente de troca de calor por convecção de  $270 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

A taxa de transferência de calor foi calculada através da Equação 4 a seguir.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ar} \times C_{p_{ar}} \times \Delta T$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ar} \times C_{p_{ar}} \times (T_{out} - T_{in}) \quad (4)$$

Sendo,

$\dot{m}_{ar}$ : vazão mássica de ar que entra no escoamento, calculada a partir da massa específica do ar, velocidade de entrada e área do plano de entrada do escoamento ( $\dot{m}_{ar} = 1,008 \text{ kg/s}$ );

$T_{out}$ : integral da temperatura do plano de saída;

$C_{par}$ : Capacidade calorífica do ar atmosférico ( $C_{par} = 1,0048 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ).

Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Comparação de dados**

Variável	Anulares	Placas	Planas Verticais	Piniforme	Sem Aletas
Área troca térmica (m <sup>2</sup> )	19,23	30,20	19,30	12,55	4,52
Volume (m <sup>3</sup> )	0,27	0,26	0,27	0,28	0,20
Peso (kg)	725,24	708,48	729,60	749,79	534,38
Integral da temperatura na saída (°C)	110,23	78,84	72,05	80,25	55,52
$\Delta T$	85,23	53,84	47,05	55,25	30,52
Taxa de Transferência de Calor (J/s)	86,34	54,54	47,66	55,97	30,92

Fonte: os autores.

Analisando os dados da Tabela 1 é possível notar que a partir da construção das geometrias com volumes muito próximos, as aletas anulares são mais eficientes, seguidas pelas piniformes, de placas e só então as planas verticais. Isso se deve a área de troca térmica de cada geometria e à turbulência gerada por elas no escoamento. O volume é uma variável a ser considerada, pois quanto maior a quantidade do material utilizado para construção das mesmas, maior será o valor do mesmo, portanto para efeito de comparação manteve-se o volume o mais próximo possível.

Comparativamente, percebe-se que apesar das aletas anulares e das planas verticais apresentarem volumes muito próximos, a taxa de transferência de calor da anular se mostrou muito acima da plana vertical.

Assim, deve-se avaliar as condições de operação e de projeto simultaneamente, para que o trocador de calor em questão satisfaça as necessidades do processo com o menor custo possível.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou-se como sendo de grande importância, pois o número de trabalhos realizados nessa área são limitados. Além disso, os trocadores de calor são amplamente utilizados em indústria de diversos tipos e portes e tais indústrias necessitam que os mesmos possuem uma boa eficiência e que seu espaço seja otimizado, diminuindo assim os custos de fabricação e funcionamento, bem como a área a ser destinada a esses equipamentos.

Concluiu-se que, das geometrias utilizadas, todas justificam o seu uso devido a sua efetividade, porém a que realiza a transferência de calor de uma forma mais efetiva são as aletas anulares.

## 7 REFERÊNCIAS

BHUTTA, N. Hayat, M.H. Bashir, A.R. Khan, K.N. Ahmad, S. Khan, **CFD applications in various heat exchangers design: a review**, Appl. Therm. Eng. 32 (2012) 1–12.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: Amgh, 2012.

CHANG, Yu-juei; WANG, Chi-chuan. **A generalized heat transfer correlation for louver fin geometry**. International Journal Of Heat And Mass Transfer. Great Britain, p. 533-544. jan. 1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0017931096001160>>. Acesso em: 17 mar. 2015.

DINIZ, Marco Carrilho; SILVESTRINI, Jorge Hugo. **Análise numérica da transferência de calor convectiva no escoamento externo de um trocador de calor tubo-aleta**. 2010. Disponível em: <<http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/graduacao/article/view/6759>>. Acesso em: 06 jun. 2015.

GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2002.

HERCKERT, Matheus Guilherme Reimann; S. NETO, Aristeu da. **Fluidodinâmica computacional e suas aplicações**. 2004. Disponível em: <<http://br.monografias.com/trabalhos/fluidodinamica/fluidodinamica.shtml>>. Acesso em: 22 maio 2015.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008.

KAUARK, Fabiana da Silva; MANHÃES, Fernanda Castro; MEDEIROS, Carlos Henrique. **Metodologia da Pesquisa: Um guia prático**. Bahia: Via Litterarum, 2010. Disponível em: <<http://www.pgcl.uenf.br/2013/download/livrode Metodologia da Pesquisa 2010.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2015.

KLEIN, T. S. **Determinação dos Parâmetros de um Novo Modelo de Turbulência com Aplicação para Fluidos de Petróleo**, Monografia em Engenharia Química, PROGRAMA EQ-ANP, 2006.

MALISKA, Clovis R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012. 453 p. Revista e ampliada.

MARIANI A. L. C. **Noções de Mecânica dos Fluidos: Perda de carga distribuída no escoamento laminar**. 2012. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia Mecânica. Disponível em:

<[http://sites.poli.usp.br/d/pme2033/Arquivos/PME2033\\_Laminar\\_2012.pdf](http://sites.poli.usp.br/d/pme2033/Arquivos/PME2033_Laminar_2012.pdf)>. Acesso em: 09 jun. 2015.

MUNSON, B.R; YOUNG, D.F.; OKIISHI, T.H.; HUEBSCH, W. W., **Fundamental of Fluid Mechanics**, John Wiley & Sons, 2010.

PATANKAR, Suhas V., **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**, Hemisphere Publishing Corporation, Taylor and Francis Group, New York, 1980

REIS, Mara Nilza Estanislau. **Fenômenos de Transporte**. 2008. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/1061862/fenomenos-de-transporte---mecanica-dos-fluidos-e-da-transferencia-de-calor/25>>. Acesso em: 01 jun. 2015

SCHMIDT F. W.; HENDERSON R. E.; WOLGEMUTH C. H. **Termodinâmica, Mecânica dos fluidos e Transferência de Calor**. 2. ed. São Paulo: Blücher, 2004.