UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

THYRSON NIÊNIO RODRIGUES SOUSA

ESTUDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR UTILIZANDO RECURSOS DE MODELAMENTO 3D DO *SOLIDWORKS* E SIMULAÇÃO COM O SUPLEMENTO *FLOW SIMULATION*

SANTOS/SP
2015

THYRSON NIÊNIO RODRIGUES SOUSA

ESTUDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR UTILIZANDO RECURSOS DE MODELAMENTO 3D DO *SOLIDWORKS* E SIMULAÇÃO COM O SUPLEMENTO *FLOW SIMULATION*

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação da Profª. Ma. Dorotéa Vilanova Garcia e coorientação do Prof. Dr. José Carlos Morilla.

SANTOS/SP

2015

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Sousa, Thyrson Niênio Rodrigues.
Método para o Ensino de Transferência de Calor utilizando recursos de Modelagem 3D do *SolidWorks* e simulação com o suplemento *Flow Simulation* / Thyrson Niênio Rodrigues Sousa. - 2015.
116 f.

Orientadora: Profa.Ma. Dorotéa Vilanova Garcia.
Coorientador: Prof.Dr. José Carlos Morilla.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2015.

1. Trocador de Calor. 2. Modelagem 3D. 3.*SolidWorks* 4. *Flow Simulation*. I. Garcia, Dorotéa Vilanova. II. Morilla, José Carlos. III. Método para o Ensino de Transferência de Calor utilizando recursos de Modelagem 3D do *SolidWorks* e simulação com o suplemento *Flow Simulation*

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

Aos meus pais: Maria das Graças e José Luiz e minha irmã: Michele que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida. A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.

AGRADECIMENTOS

À Profª. Ma. Dorotéa Vilanova Garcia que mais que uma orientadora foi uma amiga de buscas, descobertas e aprendizado;

Ao coorientador Prof. Dr. José Carlos Morilla que sempre esteve disposto e disponível no auxílio do desenvolvimento deste trabalho e pela sua paciência e objetividade nas horas de dúvidas;

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Do mesmo modo que o metal enferruja com a ociosidade e a água parada perde sua pureza, assim a inércia esgota a energia da mente”.

Leonardo da Vinci

RESUMO

O trocador de calor é um equipamento utilizado na indústria para aquecer ou resfriar fluidos. É utilizado em processos de produção, como por exemplo: polímeros, cerâmicas, ligas metálicas, fertilizantes, produtos farmacêuticos, papel, tintas, conservantes alimentícios. Ele é um dos principais componentes de refrigeradores, aparelhos de ar condicionado e motores de combustão interna. O projeto consiste na análise desse equipamento que é comumente apresentado nas disciplinas de transferência de calor e operações unitárias dos cursos de engenharia. A motivação do estudo desse relevante tópico pode ser aumentada com o emprego de *softwares* de simulação 3D. A pesquisa teve por objetivo integrar o uso de *software* de simulação 3D com os dados experimentais de um trocador de calor de tubo duplo. Chegou-se aos dados a partir do uso de um equipamento da unidade experimental, é constituída basicamente de um trocador com um tubo central de cobre com um diâmetro interno de 20 mm, externo de 22,5 mm e comprimento útil de 1000 mm. O tubo externo de acrílico possui um diâmetro interno de 44 mm, externo de 50 mm e comprimento total de 932 mm. Os dados de vazão do fluido frio foram obtidos através de rotâmetro. A variação de vazão do fluido quente foi medida de duas maneiras: pela Calha de *Parshall* e pela análise de quociente de massa através do tempo. No presente estudo foram utilizados os resultados de temperatura obtidos no experimento, foi feita uma análise comparativa do trocador de calor real com a modelagem em 3D do mesmo trocador no *Solidworks* e sua posterior simulação feita no suplemento *Solidworks Flow Simulation* para a obtenção de dados comparativos entre o experimento real e a simulação para determinar o melhor tipo de fluxo analisado e a eficiência do *software* de simulação. Conclui-se que a combinação de experimento prático e simulação 3D se obtêm um melhor rendimento na aprendizagem com um melhor entendimento do processo que está ocorrendo no dispositivo em análise. Também há a possibilidade de melhoria do disposto no ambiente virtual, sem ter que alterar o real.

Palavras Chave: Trocador de Calor. Modelagem 3D. *Solidworks*. *FlowSimulation*.

ABSTRACT

The heat exchanger is a device used in industry to heat or cool fluids. It is used in production processes, for example, polymers, ceramics, metallic alloys, fertilizers, pharmaceuticals, paper, paint, food preservatives. He is one of the main components of refrigerators, air conditioners and internal combustion engines. The project consists in the analysis of equipment that is commonly presented in heat transfer disciplines and unit operations of the engineering courses. The motivation of the study of this important topic can be increased with the use of 3D simulation softwares. The research aimed to integrate the use of software 3D simulation with experimental data from a double-tube heat exchanger. It turned to data from use of the experimental equipment unit is basically composed of a heat exchanger with a central tube of copper with an inner diameter of 20 mm, outer 22.5 mm and effective length 1000 mm. The acrylic outer tube has an internal diameter of 44 mm, outer 50 mm and length of 932 mm. The cold fluid flow data were obtained through flowmeter. The variation in flow rate of the hot fluid was measured in two ways: by *Parshall* chute and the mass ratio analysis over time. In this study the temperature results obtained in the experiment were used, it was made a comparative analysis of real heat exchanger with the 3D modeling of the same exchanger in *Solidworks* and its subsequent simulation done in *SolidWorks Flow Simulation* supplement to obtain comparative data between The actual experiment and simulation analysis to determine the best type of flow and simulation software efficiency. It concludes that the combination of practical experiment and 3D simulation are obtained better performance in learning with a better understanding of the process that is occurring on the device in question. There is also the potential for improving the provisions in the virtual environment without having to change the actual.

Key words: Heat Exchanger. 3D Modeling. *Solidworks*. *Flow Simulation*.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: DADOS OBTIDOS DO EXPERIMENTO 01 CONCORRENTES NO TROCADOR DE CALOR DE CASCO DUPLO. 60

TABELA 2: DADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS DO LABORATÓRIO E DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DE CÁLCULO. 62

TABELA 3: DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DOS ENSAIOS NO LABORATÓRIO E DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DE CÁLCULO. 62

TABELA 4: DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DA CALHA DE *PARSHALL.* 63

TABELA 5: DADOS DE VAZÃO DA CALHA DE *PARSHALL* OBTIDAS NO EXPERIMENTO 64

TABELA 6: DADOS MÍNIMOS E MÁXIMOS OBTIDOS DOS SENSORES DA SIMULAÇÃO DO EXPERIMENTO 01 CONCORRENTE 01: 64

TABELA 7: DADOS MÍNIMOS E MÁXIMOS OBTIDOS DOS SENSORES DA SIMULAÇÃO DO EXPERIMENTO 02 CONCORRENTE 02 65

TABELA 8: DADOS MÍNIMOS E MÁXIMOS OBTIDOS DOS SENSORES DA SIMULAÇÃO DO EXPERIMENTO 03 CONCORRENTES 03. 65

TABELA 9: DADOS MÍNIMOS E MÁXIMOS OBTIDOS DOS SENSORES DA SIMULAÇÃO DO EXPERIMENTO 04 CONTRACORRENTES 01 66

TABELA 10: DADOS MÍNIMOS E MÁXIMOS OBTIDOS DOS SENSORES DA SIMULAÇÃO DO EXPERIMENTO 05 CONTRACORRENTES 02 66

TABELA 11: DADOS MÍNIMOS E MÁXIMOS OBTIDOS DOS SENSORES DA SIMULAÇÃO DO EXPERIMENTO 06 CONTRACORRENTES 03 66

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR. 24

FIGURA 2: TROCADORES DE DUPLO TUBO E PASSE SIMPLES, COM CORRENTE PARALELA (CONCORRENTE). 29

FIGURA 3: TROCADORES DE DUPLO TUBO E PASSE SIMPLES, EM CONTRACORRENTE.... 29

FIGURA 4: TROCADOR DE CASCO E TUBO. 30

FIGURA 5: DIVISORES DE PASSES. 30

FIGURA 6: TROCADORES CASCO E TUBO COM UM PASSE NO CASCO E TUBO. APRESENTA ESCOAMENTO COM CORRENTE PARALELA, CHICANAS E DIVERSOS TUBOS INTERNOS NO CASCO DO TROCADOR. 31

FIGURA 7: TROCADOR DE TUBO EM U. 31

FIGURA 8: DESIGNAÇÃO TEMA PARA TROCADORES CASCO E TUBOS 32

FIGURA 9: TROCADOR DE CALOR DE ALETAS. 34

FIGURA 10: MODELO DO TROCADOR DE CALOR DE CASCO-TUBO MODELADO EM 3D NO *SOLIDWORKS* 2014 35

FIGURA 11: SISTEMA ESTUDADO: 1 – TORRE DE RESFRIAMENTO, 2 – TROCADOR DE CALOR (DISPOSITIVO DO ESTUDO), 3 – TANQUE DE ÁGUA QUENTE (COR VERMELHA), 4 – CALHA DE *PARSHALL* E TANQUE DE RECEPÇÃO PARA A ÁGUA QUENTE VOLTAR AO SISTEMA, 5 – RECIPIENTE DE MEDIÇÃO, 6 – AQUECEDOR COM RESISTÊNCIA ELÉTRICA, 7 – ROTÂMETRO E SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA QUENTE, 8 – MEDIDORES DE TEMPERATURA (ENTRADA E SAÍDA) DO TROCADOR DE CALOR, 9 – SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA FRIA. 36

FIGURA 12: TRAJETO DO FLUXO CONCORRENTE (A) DE CONTRACORRENTE (B) 38

FIGURA 13: MODELAGEM DO TROCADOR DE CALOR UTILIZADO NA SIMULAÇÃO. 39

FIGURA 14: CAMINHO PARA O COMANDO *CREATELIDS* (PARA TAMPAR AS ABERTURAS DO TROCADOR DE CALOR) 39

FIGURA 15: SELEÇÃO DOS FUROS DE ENTRADA E SAÍDA DE FLUIDO DO TROCADOR DE CALOR PARA A CRIAÇÃO DAS TAMPAS. 40

FIGURA 16: INTERFACE DO *WIZARD* QUE SERVE PARA AUXILIAR O INÍCIO DA CONFIGURAÇÃO DA SIMULAÇÃO 40

FIGURA 17: ESCOLHA DO SISTEMA DE UNIDADES QUE O *SOFTTWARE* VAI UTILIZAR... 41

FIGURA 18: CONDIÇÕES AVANÇADAS DE PROJETO. 42

FIGURA 19: DETERMINAÇÃO DE FLUIDOS PARA A SIMULAÇÃO E DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRABALHO DESSE FLUIDO. 43

FIGURA 20: CONDIÇÃO DE PAREDE COM O AMBIENTE EXTERNO 43

FIGURA 21: CONDIÇÕES INICIAIS DA SIMULAÇÃO. 44

FIGURA 22: DETERMINAÇÃO DA CÉLULA PARA O TEMPO COMPUTACIONAL DE ANÁLISE, QUANTO MAIOR A CÉLULA MAIOR O TEMPO DE ANÁLISE. 45
FIGURA 23: DOMÍNIO DA SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE. 46
FIGURA 24: COMANDO CONDIÇÃO DE CONTORNO. 46
FIGURA 25: ENTRADA DO FLUXO DE MASSA DO FLUIDO QUENTE. 47
FIGURA 26: COMANDO PARA INSERIR AS CONDIÇÕES DE CONTORNO. 47
FIGURA 27: SAÍDA DO FLUIDO QUENTE NA PRESSÃO AMBIENTE E TEMPERATURA DE SAÍDA DE 44,3ºC. 48
FIGURA 28: CONDIÇÃO DE CONTORNO DA ENTRADA DO FLUIDO FRIO. 48
FIGURA 29: CONDIÇÕES DE CONTORNO DA SAÍDA DO FLUIDO FRIO. 49
FIGURA 30: SISTEMA CONCORRENTE CONFIGURADO NA SIMULAÇÃO, TANTO OS FLUIDOS (ÁGUA) QUENTES E FRIAS PERCORREM DE FORMA PARALELA DENTRO DO TROCADOR DE CALOR. 49
FIGURA 31: ATIVANDO A INTERFACE DE CONTROLE DE COMPONENTES. 50
FIGURA 32: RETIRANDO OS PARAFUSOS E PORCAS DA ANÁLISE. 50
FIGURA 33: COMANDO PARA INSERIR OS SENSORES GLOBAIS. 51
FIGURA 34: JANELA COM AS OPÇÕES DE SENSORES GLOBAIS. 51
FIGURA 35: OPÇÕES ESCOLHIDAS PARA OS SENSORES DE SUPERFÍCIE. 52
FIGURA 36: SENSORES SELECIONADOS PARA ANÁLISE E SIMULAÇÃO. 53
FIGURA 37: INÍCIO DA ANÁLISE DE SIMULAÇÃO. 53
FIGURA 38: INTERFACE INICIAL PARA O INÍCIO DA SIMULAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR E ANÁLISE DE DADOS DA SIMULAÇÃO. 54
FIGURA 39: INTERAÇÕES DAS ANÁLISES. 54
FIGURA 40: COMANDO *INSERT* NO *CUTPLOTS* EM *RESULTS*. 55
FIGURA 41: DETERMINAÇÃO DO PLANO DE VISUALIZAÇÃO. 56
FIGURA 42: MOSTRA A MALHA CRIADA NO TROCADOR DE CALOR. 56
FIGURA 43: MALHA CRIADA JUNTAMENTE COM O CONTORNO DE TEMPERATURA NO TROCADOR DE CALOR. 57
FIGURA 44: CONFIGURAÇÃO DA TRAJETÓRIA DOS FLUIDOS. 57
FIGURA 45: SELEÇÃO DOS PLANOS PARA A CIRCULAÇÃO DO FLUIDO. 58
FIGURA 46: DETERMINAÇÃO DA APARÊNCIA E O QUE SE QUER DETERMINAR, NO NOSSO CASO TEMPERATURA. 58
FIGURA 47: DEMONSTRA COMO FICA O SISTEMA COM O FLUIDO CIRCULANDO E SUA TEMPERATURA. 58
FIGURA 48: EXTRAINDO OS RESULTADOS DOS SENSORES. 59

FIGURA 49: SELECIONANDO TODOS OS SENSORES E EXPORTANDO PARA O EXCEL. . 59

FIGURA 50: GRÁFICO CRIADO PELO PROGRAMA, RELAÇÃO DE TEMPERATURA DO FLUIDO X INTERAÇÕES. 60

FIGURA 50: SIMULAÇÃO Nº 01 - ENSAIO CONCORRENTE 01: SIMULAÇÃO DO FLUIDO COM A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA E VISUALIZAÇÃO COM ZOOM. 66

FIGURA 51: SIMULAÇÃO Nº 02- ENSAIO CONCORRENTE 02: SIMULAÇÃO DO FLUIDO COM A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA E VISUALIZAÇÃO COM ZOOM. 67

FIGURA 52: SIMULAÇÃO Nº 03- ENSAIO CONCORRENTE 03: SIMULAÇÃO DO FLUIDO COM A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA E VISUALIZAÇÃO COM ZOOM. 68

FIGURA 53: SIMULAÇÃO Nº 04- ENSAIO CONTRACORRENTE 01: SIMULAÇÃO DO FLUIDO COM A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA E VISUALIZAÇÃO COM ZOOM. 69

FIGURA 54: SIMULAÇÃO Nº 05- ENSAIO CONTRACORRENTE 02: SIMULAÇÃO DO FLUIDO COM A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA E SIMULAÇÃO COM ZOOM. 70

FIGURA 55: SIMULAÇÃO Nº 06 – ENSAIO CONTRACORRENTE 03: SIMULAÇÃO DO FLUIDO COM A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA E SIMULAÇÃO COM ZOOM. 71

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔT é a diferença de temperaturas de saída e entrada do fluido quente (ºC);

C_p é o calor específico do fluido quente $\frac{J}{kg°C}$;

m é a massa do fluido em quilogramas;

m_r é a massa do recipiente (kg), tara de 0,365 quilogramas .

$m_{líq}$ é a massa de líquido pesada (kg);

m_t é a massa total de líquido mais a massa do recipiente (kg);

Q é o fluxo de calor (W);

Q_f é o fluxo de calor fornecido pelo fluido quente;

Q_{final} é a diferença entre o fluxo de calor fornecido e recebido pelo sistema;

Q_q é o fluxo de calor fornecido (fluido quente);

Q_r é o fluxo de calor recebido (fluido frio);

t é o tempo em hora;

T_e é a temperatura de entrada do líquido quente;

t_e é a temperatura saída do líquido frio;

T_s é a temperatura de saída do líquido quente;

t_s é a temperatura de entrada do líquido frio;

W é a vazão mássica do fluido (kg/s);

W_r é a vazão mássica do recipiente (não conta o peso do recipiente vazio);

W_c é a vazão mássica da calha.

SUMÁRIO

1 **INTRODUÇÃO** 18
1.1 JUSTIFICATIVA 20
1.2 RELEVÂNCIA DO TEMA 21
1.3 OBJETIVOS 21
1.3.1 OBJETIVO GERAL: 21
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS: 21
1.4 IMPORTÂNCIA DO PROJETO 22
1.5 LIMITAÇÕES DO PROJETO 22
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 22
2 **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** 24
2.1 FORMAS DE TROCA DE CALOR 24
2.1.1 CONDUÇÃO 25
2.1.2 CONVECÇÃO 25
2.1.3 RADIAÇÃO 26
2.2 EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CALOR EM FLUIDOS 26
2.3 TROCADORES DE CALOR 28
2.4 CLASSIFICAÇÕES DOS TROCADORES DE CALOR 28
3 **MATERIAL E MÉTODOS** 35
3.1 PROCEDIMENTOS 38
3.2 CONFIGURAÇÕES PARA A SIMULAÇÃO 38
3.3 PRIMEIROS PROCEDIMENTOS 39
3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO 46
3.4.1 SENSORES (*GOALS*) 51
3.4.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS 55
3.5 METODOLOGIA DE ANÁLIDE DE DADOS 60
4 **RESULTADOS** 61
4.1 BASES DE CÁLCULO UTILIZADAS NO EXPERIMENTO PRÁTICO 61
4.2 RESULTADOS DO EXPERIMENTO 62
4.3 RESULTADOS OBTIDOS NO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO 64
4.4 ANÁLISES DOS RESULTADOS PRÁTICOS E TEÓRICO 72
5 **CONCLUSÃO** 73

5.1 TRABALHOS FUTUROS 74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 75
APÊNDICE I – GUIA PARA A MODELAGEM DO TROCADOR DE CALOR 77
APÊNDICE II – GUIA DE MONTAGEM DO TROCADOR DE CALOR 101

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o meio industrial tem recorrido a diversas formas de aproveitar o calor de seus processos industriais. Uma das formas mais empregadas é o uso de trocadores de calor, que também são chamados de permutadores, eles são importantes nos processos de: aquecimento, resfriamento, evaporação e condensação de diversos tipos de fluidos.

O trocador de calor, também conhecido como permutador, foi inventado por John Gorrie em 1851 e refinado por Charles William Siemens em 1857 (TIMMERHAUS; REED, 2007). Segundo, Shah; Sekukic (2003) o trocador de calor é um dispositivo que faz a transferência de calor entre dois ou mais fluidos de temperaturas diferentes que são separados por uma parede sólida, essa parede é chamada de superfície de transferência ou superfície de troca de calor.

Para se construir um trocador de calor devem-se satisfazer várias normas e conformidades. (INCROPERA; DEWITT, 1998). Nas versões mais simples de trocadores de calor, eles constituem de apenas dois tubos um dentro do outro de diferentes diâmetros, nos mais complexos possuem vários tubos internos com a finalidade de aumentar a área onde ocorre a troca térmica (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Basicamente os projetos de trocadores de calor são divididos em três partes (INCROPERA; DEWITT, 1998).

a) Análise Térmica – a parte principal nesse item é definir a área de transferência de calor, tendo como referência a temperatura e o escoamento dos fluidos.
b) Projeto Mecânico Inicial – são considerados os seguintes requisitos: a pressão, a temperatura, o grau de corrosão de um ou mais fluidos, as tensões térmicas relativas e, a relação de troca de calor em que o trocador está exposto no processo industrial.
c) Projeto de Fabricação – necessita das características físicas e suas dimensões, além das especificações dos métodos de fabricação.

Na indústria um dos tipos de trocadores de calor mais utilizados é o de casco tubo, além dele existem outros tipos muito empregados como o de duplo tubo, serpentina e trocador de placas. O trocador de casco tubo é basicamente constituído de um tubo dentro de um casco cilíndrico, ele serve para separar os fluidos e fazer a

transmissão de calor. Um dos fluidos percorre o lado interno do tubo e o outro percorre o casco. Neste tipo de trocador de calor possui duas possibilidades de fluxo dos fluidos: com correntes paralelas (concorrentes), onde os fluidos entram pelo mesmo lado do trocador de calor e saem do outro lado, ou seja, correm sempre na mesma direção e sentido; e contracorrente, em que os fluidos entram e saem pelos lados opostos do trocador, correm na mesma direção, só que em sentidos opostos. Referente à funcionalidade deste trocador ele é do tipo 1-1, ou seja, ocorre uma passagem pelo casco e uma pelo tubo, no tipo 1-2 (ocorre uma passagem pelo casco e duras pelo tubo), ou seja, n–m (n passagens pelo casco e m passagens pelos tubos), (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). No estudo foi analisado o tipo 1-1.

O desenvolvimento da informática foi uma evolução marcante na história da humanidade, assim como outras invenções importantes como, por exemplo, a eletricidade, telefone que estão entre as invenções que melhoram a vida em sociedade como também nas atividades do seu dia a dia nas indústrias. Com esse avanço na tecnologia surgiu diversas invenções e descobertas recentes (FIALHO, 2013).

Na década de 70, houve a disputa de várias empresas que buscavam aplicações científicas para a evolução da informática. A intenção inicial era criar máquinas capazes de substituir o ser humano em processos de equacionamento matemáticos exaustivos e também nos equacionamentos astrológicos empregados na corrida armamentista e espacial. A *Hewllet-Packard* foi à primeira empresa que apresentou uma interface gráfica com aplicações na engenharia, apresentando um dos primeiros *softwares CAD*, que serve como uma das primeiras ferramentas utilizadas por engenheiros em projetos, ele permitia projetar, visualizar os componentes em diferentes vistas, como também fazer modificações e dimensionar o projeto. Simultaneamente foram desenvolvidas interfaces gráficas de *softwares* de análises de estruturas, que serviram de base para a tecnologia CAE (FIALHO, 2013).

Referente à etapa de processo de modelagem 3D, no mercado atual existem diversos *softwares*, entre eles *Auto CAD* 3D®, *Inventor*®, *Pro Engenharia*®, *Solidworks*®, etc. A modelagem e a Simulação no *Solidworks*® 2014 será a plataforma de desenvolvimento neste projeto.

Desde o início do século XX era necessário construir um protótipo em tamanho real do que se estava projetando, se levava tempo e dinheiro no projeto, uma das

evoluções da tecnologia da informática surgiu com a invenção dos *softwares* de simulação 3D na década de 60, um dos mais recentes foi o *software Solidworks,de 2005,* que tem como objetivo se ter um aumento de produtividade e diminuição do tempo dos projetistas e engenheiros para uma definição, mas rápida de seus projetos. A vantagem da utilização do *software* é que se pode criar a simulação de peças com diferentes materiais, fazer alteração de dimensões, criando uma dinâmica no projeto e redução do custo na produção (3DS *SOLIDWORKS*, 2011). Também diminui os custos de produção e também acaba diminuindo os danos ambientais.

O suplemento *Solidworks Flow Simulation é um importante instrumento de simulação CFD* (*Computational Fluid Dynamics*) que é utilizado de forma unificada ao *Solidworks*. A área de atuação dessa ferramenta é a mecânica de fluidos e a termodinâmica, ela permite a análises internas de tubulações e de ambientes externos, como exemplos pode-se citar um túnel de vento, a ação do vento sobre uma torre. O *Solidworks Flow Simulation* tem vários recursos, o projetista pode obter diversos dados como: pressão, força, rendimento em qualquer ponto do dispositivo estudado. O *software* também possui ferramentas gráficas que permitem a análise de linhas de fluxo e suas peculiaridades (3DS *SOLIDWORKS – FLOW SIMULATION*, 2011). Além de ele ter uma interface amistosa e intuitiva, diante de uma complexidade da dinâmica computacional dos fluidos.

A simulação 3D para as empresas é um recurso muito importante na escolha do melhor equipamento de processo, permitindo a simulação de funcionamento deste na planta industrial, com isso se obtém um custo mais acessível no valor do produto final produzido. No âmbito educacional serve como uma grande ferramenta para o aprendizado, facilitando a compreensão do funcionamento de mecanismos e conceitos de mecânica dos fluidos e termodinâmicos.

1.1 JUSTIFICATIVA

O trabalho serve para facilitar a compreensão do comportamento de fluidos (água) em um trocador de calor através de experimentos práticos combinados com modelagem e simulação no *Solidworks* para melhor entendimento do funcionamento do dispositivo estudado.

1.2 RELEVÂNCIA DO TEMA

O tema é relevante uma vez que possibilita:

a) Analisar e determinar experimentalmente a eficiência de troca térmica do trocador de calor, utilizando como parâmetros de análise a vazão, e as temperaturas de entrada e saída dos fluidos quentes e frios;
b) Modelar trocador de calor no *Solidworks*;
c) Simular no suplemento *Solidworks Flow Simulation*;
d) Comparar os resultados com os dados obtidos experimentalmente.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo desse projeto foi integrar o uso do *software* de simulação 3D, com dados experimentais de um trocador de calor de tubo duplo.

1.3.1 Objetivo geral:

O estudo teve como objetivo geral demonstrar a utilização do *software Solidworks* para a modelagem do dispositivo para análise, ou seja, o trocador de calor e com o uso do suplemento o simulador *Solidworks Flow Simulation* como ferramenta para o auxílio do estudo do comportamento térmico dos fluidos.

1.3.2 Objetivos específicos:

Os objetivos específicos foram:

a) Avaliar as características técnicas da simulação em relação ao experimento real;
b) Promover um modelo de simulação que facilite sua utilização no processo ensino-aprendizagem do trocador de calor utilizado no laboratório de operações unitárias da Universidade Santa Cecília;

1.4 IMPORTÂNCIA DO PROJETO

O projeto vai contribuir com os seguintes quesitos:

a) Possibilitar a integração de diferentes disciplinas do curso de engenharia;
b) Facilitar a demonstração do funcionamento do trocador de calor em aula. O professor poderá obter um maior aproveitamento no processo de ensino-aprendizagem do aluno;
c) Possibilitar um estudo para a melhoria do projeto do trocador de calor, através simulações e análises de modificações e correções do projeto original.
d) Contribuir com a redução do desperdício utilizando a melhor forma os recursos naturais, com a eliminação da necessidade de diversos protótipos, podendo ainda evitar as falhas de projeto antes mesmo de se construir o dispositivo final.

1.5 LIMITAÇÕES DO PROJETO

As restrições do projeto são:

a) Necessidade do aluno de possuir conceitos e ter uma base tecnológica em desenho técnico mecânico (2D e 3D), projeto mecânico e também em transferência de calor;
b) Requer que o usuário tenha também o conhecimento do funcionamento do *software Solidworks*, tanto para a confecção e modelagem. Assim como também é exigido do seu suplemento *Flow Simulation* para a simulação.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Com a intenção de alcançar o objetivo proposto neste trabalho, esta dissertação apresenta a seguinte estrutura:

No Capítulo 2: é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema desenvolvido nesta dissertação.

No Capítulo 3: fornece as etapas de como foi realizada a configuração para simulação do trocador de calor utilizando o suplemento do *SolidWorks*, o simulador *Solidworks Flow Simulation.*

No Capítulo 4: é feita uma análise dos resultados da comparação dos dados obtidos no experimento prático com os resultados obtidos no simulador e ainda é apresentado as imagens térmicas da simulação do trocador de calor obtidos do *software Solidworks* com o seu suplemento *Solidworks Flow Simulation,* imagens estas de cada um dos experimentos.

No Capítulo 5: são prestadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

Esta dissertação inclui anexos

No Apêndice I: É explicado como foi realizado o modelamento de cada um dos componentes do trocador de calor.

No Apêndice II: É apresentado como foi realizada a montagem de cada peça do trocador de calor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre formas de troca de calor e trocadores de calor que servirá de base para o desenvolvimento do método algébrico do presente trabalho.

2.1 FORMAS DE TROCA DE CALOR

Calor é a energia térmica em trânsito, movida por uma diferença de temperatura, sendo transferida sempre do meio mais quente para o meio mais frio. Quando há dois ou mais fluidos com diferentes temperaturas se pode dizer que haverá um fluxo de calor entre o fluido com maior temperatura (fluido quente) que irá ceder calor ao fluido mais frio.

Conforme Kern (1999) existem três tipos de transferência de calor:

a) Condução – acontece quando a transferência de energia das partículas ocorre por interação entre elas.

b) Convecção – advém quando a transferência é feita entre a superfície de um sólido e um fluido.

c) Radiação – ocorre quando as superfícies de corpos sólidos emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas trocando calor com outro corpo sem contato físico.

Em condições onde há diferença de temperatura no interior de um sistema, ou que dois sistemas, onde diferentes temperaturas foram colocadas em contato, ocorrem alterações das temperaturas entre os mesmos, tendendo ao equilíbrio, este processo é chamado de transferência de calor, como mostra a Figura 1.

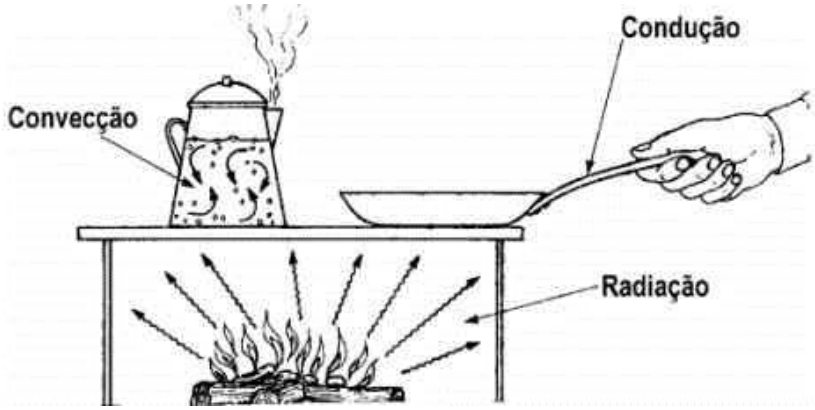


Figura 1: Mecanismos de transferência de calor.
Fonte: Grimm (2015).

2.1.1 Condução

Segundo Çengel e Ghajar (2012), o fenômeno de condução térmica se dá pela propagação de calor, portanto ela ocorre quando a energia térmica é transmitida partícula por partícula, esse fenômeno não há a ocorrência do transporte de matéria. A condução se dá em metais em sua forma sólida, líquidos e gases, pois uma de suas principais características é que são bons condutores térmicos. Nos gases esse fenômeno se dá por causa das colisões e difusões de moléculas quando ocorrem os movimentos randômicos. Nos sólidos a condução se dá por causa da combinação das vibrações moleculares, a energia acaba sendo transportada pelos elétrons livres. Um exemplo que pode ser lembrado é a de uma colher sobre a chama de uma vela, com o tempo a pessoa que está segurando a colher vai sentir que o cabo da colher está quente.

2.1.2 Convecção

Em (INCROPERA, 1998), convecção ocorre com a transferência da energia de uma superfície sólida e um fluido adjacente. Pode-se ser classificado em dois subtipos:

a) Convecção forçada: um exemplo que pode ser citado é o do ar condicionado. Para se conseguir uma melhor eficiência de resfriamento, o ar condicionado deve ser instalado na parte superior da sala. O motivo é que o ar frio que é mais denso é lançado no ambiente da sala, por isso ele desce para a parte inferior, e acaba forçando o ar quente que é menos denso que está na parte inferior a subir, portanto cria-se assim uma corrente de convecção;

b) Convecção natural (ou livre): um exemplo simples é o da água para ferver no fogo. A água que é aquecida na parte inferior do recipiente se torna menos densa e acaba subindo, e a água fria que está na superfície do recipiente é mais densa, e é forçada a descer criando assim uma corrente de convecção que com o tempo aquece a água do recipiente como um todo.

2.1.3 Radiação

Segundo Çengel e Ghajar (2012), a radiação são ondas eletromagnéticas que se propagam transmitindo calor, não precisam de um meio de transmissão podendo ser transmitido pelo vácuo, são conhecidos como raios infravermelhos. Um exemplo prático é o da estufa de plantas que é feita de vidro, por ela ser transparente deixa a energia solar entrar, mas retém os raios infravermelhos. Assim a estufa se mantém quente, mesmo com uma temperatura mais baixa no ambiente externo, permitindo o cultivo de plantas tropicais em países frios.

2.2 EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CALOR EM FLUIDOS

No cálculo da quantidade de calor trocada em um fluido, tem relação direta com o seu fluxo de massa, ao seu calor específico e à variação de temperatura. Esta quantidade de calor é mostrada na equação 1, apresentada por Perry (2007).

$$\boldsymbol{Q = W.Cp.\Delta T} \qquad \textbf{(1)}$$

Sendo:

Q é o fluxo de calor (W);

W é a vazão mássica do fluido quente (kg/s);

Cp é o calor específico do fluido quente $\frac{J}{kg°C}$;

ΔT é a diferença de temperaturas de saída e entrada do fluido quente (ºC).

O calor fornecido e o recebido foram calculados pelas equações 2 e 3:

$$\textbf{Qq = W. cp. (Ts -Te)} \qquad \textbf{(2)}$$

$$\textbf{Qr = W. cp. (te – ts)} \qquad \textbf{(3)}$$

Em que:

Q_q é o fluxo de calor fornecido (fluido quente)

Q_r é o fluxo de calor recebido (fluido frio)

W é a vazão mássica

c_p é o calor específico do liquido

T_e é a temperatura de entrada do liquido quente

T_s é a temperatura de saída do liquido quente

t_s é a temperatura de entrada do liquido frio

t_e é a temperatura saída do liquido frio

A equação 4, é utilizada para o cálculo da vazão mássica do fluido quente.

$$\boldsymbol{W_c = \frac{m}{t}\left(\frac{Kg}{h}\right)} \qquad \textbf{(4)}$$

$$\boldsymbol{W_r = \frac{m}{t}\left(\frac{Kg}{h}\right)} \qquad \textbf{(5)}$$

Sendo:

W é a vazão mássica

W_c é a vazão mássica dada pela calha

W_r é a vazão mássica obtida com o recipiente (não foi conta o peso do recipiente vazio)

m é a massa do fluido em Kg

t é o tempo em hora

A equação 6 é utilizada na obtenção do fluxo de calor perdido, conforme apresentada por Perry (2007).

$$\boldsymbol{Q_{perdido} = Q_f - Q_r} \qquad \textbf{(6)}$$

Em que:

$Q_{perdido}$ é a diferença entre o fluxo de calor fornecido e recebido pelo sistema.

Q_f é o fluxo de calor fornecido pelo fluido quente;

Q_r é o fluxo de calor recebido pelo fluido frio.

A equação 7, serve para determinar a massa do líquido foi quantificada.

$$\boldsymbol{m_{líq} = m_t - m_r} \qquad \textbf{(7)}$$

Sendo:

$m_{líq}$ a massa de líquido pesada (kg);

m_t a massa total de líquido mais a massa do recipiente de plástico (kg);

m_r a massa do recipiente de plástico (kg), tara de 0,365 Kg .

2.3 TROCADORES DE CALOR

Os equipamentos que são utilizados na indústria para a transferência de calor, são conhecidos como permutadores ou trocadores de calor. A utilização dos trocadores é necessária, sempre que houver uma diferença de temperatura entre dois fluidos, por exemplo, sendo que a transferência de calor faz com que a temperatura destes fluidos seja alterada, de forma geral um dos fluidos é resfriado enquanto o outro é aquecido. Na indústria o trocador de calor tem a função de aquecer ou esfriar um determinado fluido e isso é de suma importância para a eficiência do processo como um todo.

Para Çengel e Ghajar (2012), a transferência de calor ocorre em um trocador de calor envolvendo a convecção em cada fluido e condução através da parede que separa os dois fluidos. Na análise de trocadores de calor, deve-se trabalhar com o coeficiente global de transferência de calor (U), ele representa a contribuição de todos estes efeitos sobre a transferência de calor.

2.4 CLASSIFICAÇÕES DOS TROCADORES DE CALOR

Para selecionar um determinado trocador de calor é necessário fazer uma análise térmica para definir o tamanho e a geometria necessária para atender os requisitos de aquecimento ou resfriamento de um dado fluido. É importante ressaltar que ao especificar um dispositivo se tem a necessidade de possuir um determinado conhecimento dos modelos e conceitos de trocadores de calor existentes para definir o mais adequado ou correto ao processo industrial.

Os trocadores de calor podem ser classificados segundo: o processo de transferência de calor, grau de compactação da superfície, tipo de construção e da disposição das correntes dos fluidos – escoamento (INCROPERA; DEWITT, 1998).

Pela classificação por processo de transferência de calor, os trocadores de calor são classificados em contato indireto e direto. Também podem ser classificados pelo grau de compactação, representa alta razão entre a área de

transferência de calor e o volume do trocador. Pelo tipo de construção, são classificados em tubulares, de placas, de superfície estendida e regenerativa.

2.3.1 Tipos de trocadores de calor

Em função da disposição das correntes dos fluidos, ou seja, através de seu escoamento, os trocadores de calor podem ser classificados como – trocadores de Correntes Paralelas e trocadores contracorrente, como mostrado sequencialmente nas figuras 2 e 3.

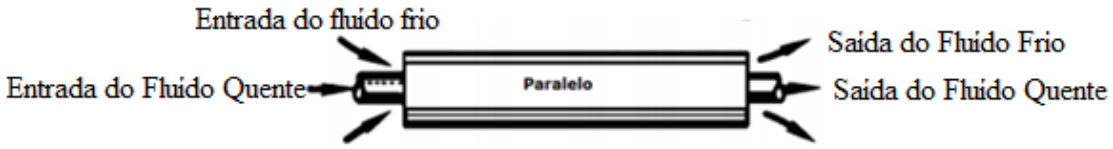


Figura 2: Trocadores de duplo tubo e passe simples, com corrente paralela (concorrente). Fonte: Lienhard – 2003, adaptado.

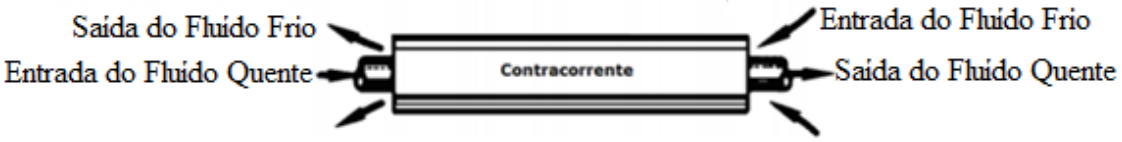
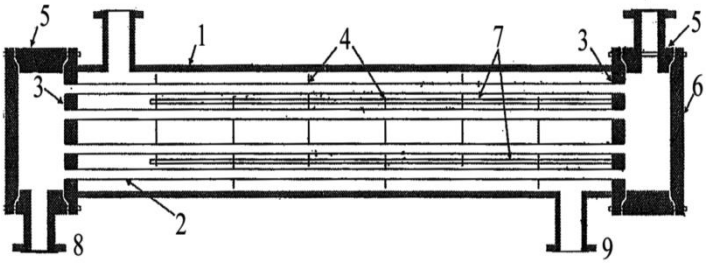


Figura 3: Trocadores de duplo tubo e passe simples, em contracorrente. Fonte: Lienhard – 2003, adaptado.

Conforme, Pereira (2011): Uma forma de classificação de trocadores de calor pode ser feita pelo tipo de construção. Um exemplo que se pode citar é o trocador de duplo tubo, que é composto de dois tubos (um externo e um interno), eles são simples de construir, montar, expandir a área de troca térmica e limpar, exemplo desse modelo é representado na figura 2.

Outro modelo muito utilizado são os trocadores de casco e tubo, ou multi-tubulares (figura 4), que apresentam um casco e tubos internos dispostos paralelamente à longitude do casco. Eles se diferenciam quanto à quantidade de passes no casco e nos tubos, podem ser de um passe no casco e com um nos tubos; ou um passe no casco e dois passes nos tubos; também existem os de dois passes no casco, quatro passes nos tubos, figura 5.



1 - Casco ou carcaça
2 - Tubos
3 - Espelho
4 - Chicanas
5 - Carretel
6 - Tampa do carretel
7 - Espaçadores de chicanas
8 - Bocal (Lado tubo)
9 - Bocal (Lado casco)

Figura 4: Trocador de casco e tubo.
Fonte: ARAUJO, 2002.

Figura 5: Divisores de passes.
Fonte: REIS, 2002.

Os trocadores de casco e tubo, ou multi-tubulares possuem arranjos dos divisores de passes, de acordo com a figura 5, e de acordo com o número em que são dispostos no arranjo é o que determina a velocidade do fluido, ou seja, quanto se aumenta o número de passes pelo tubo e pelo casco, maior a velocidade do fluido e a troca térmica do mesmo (REIS, 2002). Além disso, esses trocadores podem ter ou não chicanas com a finalidade de aumentar a turbulência e a troca térmica, figura 6. Também se pode optar em ter um misturador estático dentro do tubo para aumentar a turbulência e melhorar a eficiência da troca térmica.

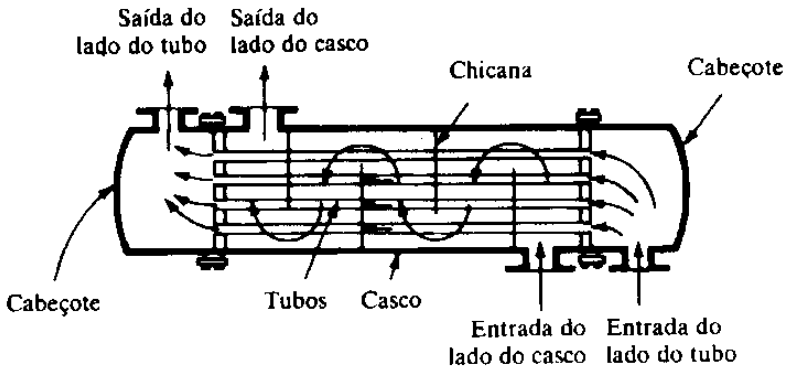


Figura 6: Trocadores casco e tubo com um passe no casco e tubo. Apresenta escoamento com corrente paralela, chicanas e diversos tubos internos no casco do trocador. Fonte: Çengel e Ghajar (2012)

Os trocadores de calor de casco e tubo são basicamente constituídos de um feixe de tubos envolvidos por um casco, que é normalmente cilíndrico, com fluidos circulando um externamente ao feixe e outro pelo interior do tubo. Os componentes principais são o cabeçote de entrada e de retorno, o casco e o feixe de tubos.

O cabeçote de entrada pode ser chamado também de estacionário, fica ligado ao feixe de tubos e serve para admissão e/ou descarga do fluido dos tubos. Já o cabeçote de retorno ou de saída promove o retorno e/ou descarga do fluido dos tubos e dá o acabamento no casco.

O feixe de tubos pode ser reto ou com forma de U, o feixe é preso por suas extremidades com discos metálicos que recebem o nome de espelhos, que servem para manter os tubos em suas posições. Conforme Reis (2002) o trocador de tubos em U, conforme a figura 7 possui um feixe de tubos curvados em forma de “U” e mandrilados ao espelho.

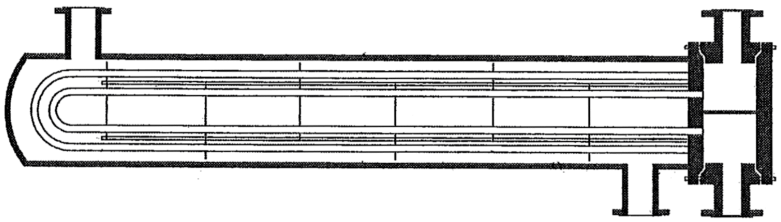


Figura 7: Trocador de tubo em U. Fonte: ARAUJO, 2002.

Neste tipo de trocador o feixe pode ser removido do casco para a limpeza da parte externa dos tubos, porém apenas os tubos externos podem ser substituídos, pois o feixe é construído com tubos em U com diferentes raios de curvatura

(ARAÚJO, 2002). O fluido que percorre no lado dos tubos não pode possuir impurezas, para evitar acúmulo de incrustações nos mesmos (REIS, 2002).

Existem diversos tipos de cabeçotes de entrada e de retorno, que e foram padronizados pela norma TEMA, na figura 8 é mostrada a classificação de trocadores por tipo, casco e tubo – figura N-1.2 da TEMA – “Heat exchanger nomeclature” (*Tubular Exchanger Manufacturers Association*, 1988).

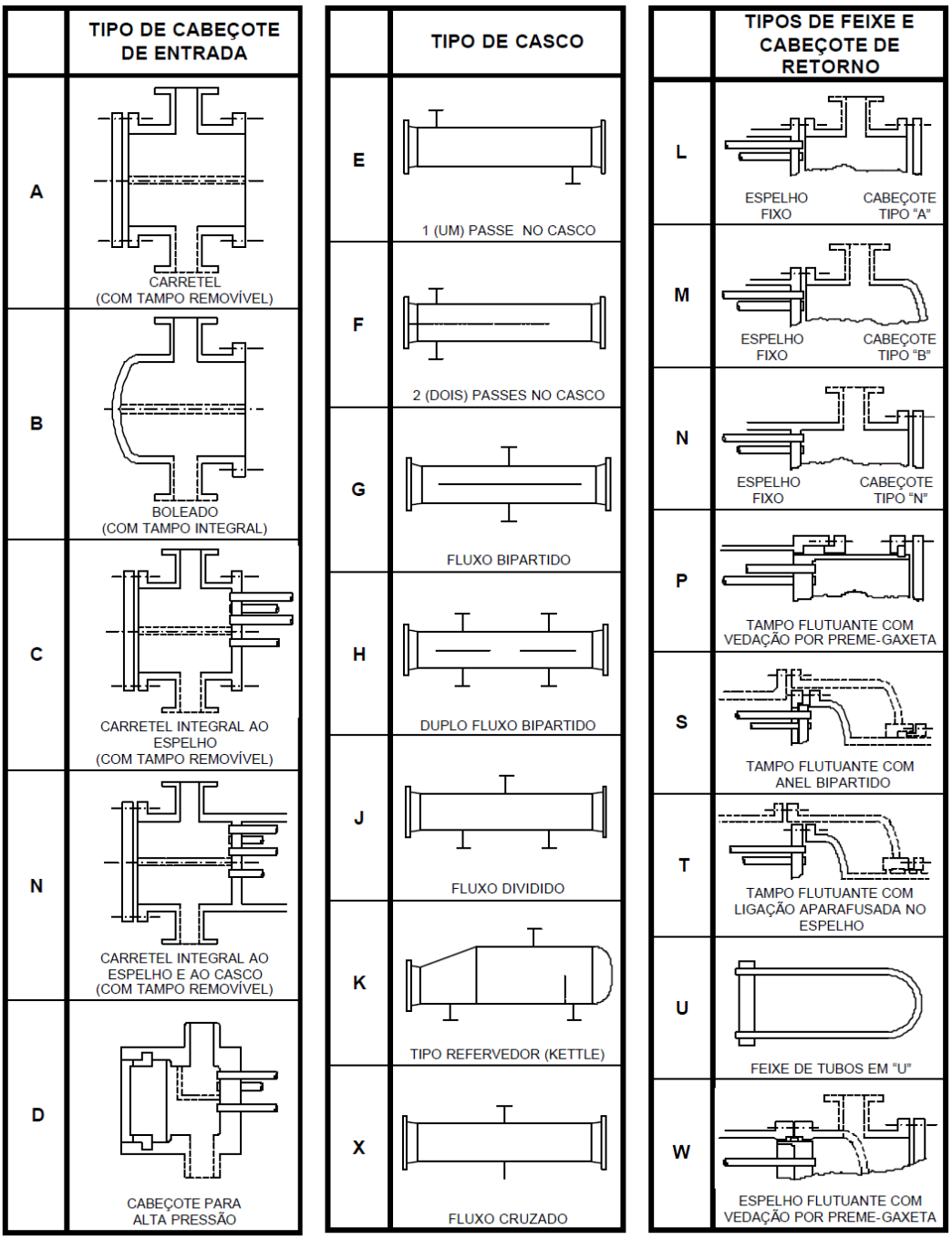


Figura 8: Designação TEMA para trocadores casco e tubos
Fonte: Mukherjee (1998). Com adaptações.

A norma classifica de forma alfabética cada uma das partes e formas construtivas de um trocador de calor. Os trocadores de casco e tubos são classificados por três letras referentes às partes: O cabeçote estacionário que é indicado pelas letras A, B, C, N e D, o modelo do casco que é representado pelas letras E, F, H, J, K e X, e o modelo de cabeçote de retorno que é selecionado pelas letras L, M, N, P, S, T, U e W.

O tamanho do trocador é recomendado por meio de números que demonstram o diâmetro interno do caso e comprimento nominal do trocador.

Os trocadores de calor de casco tubo são analisados por três classes que dependem da aplicação em que se destina. Nas normas TEMA, essas classes são nomeadas conforme as características de projeto, fabricação, materiais utilizados para a construção do trocador de calor, etc.

As classes nomeadas pela norma TEMA para os trocadores de calor são:

a) **Classe R –** classificam-se como a classe de trocadores de calor que trabalham com condições severas no processamento de petróleo.

b) **Classe C –** nessa classe é dos trocadores de calor que trabalham em condições moderadas de operação, por exemplo, processos de refrigeração.

c) **Classe B –** é a classe de trocadores de calor destinada a atividades de processamento químico.

As normas Standards para as três classes têm pouca diferença, essas alterações estão nas classes: A classe R que tem o seu foco nas características de construção que são mais conservadores e mais pesadas. A classe B que para trocadores mais leves e de metal mais fino feitos de aço inoxidável e alto liga, para a confecção de componentes não críticos.

As normas padrão TEMA são divididas em dez secções:

1. Nomenclatura
2. Tolerâncias de fabricação
3. Dados gerais de fabricação, informação e desempenho
4. Instalação, operação e manutenção

5. Standards mecânicos TEMA Classe R C B trocadores de calor
6. Fluxo de vibração induzida
7. Relações térmicas (incluindo incrustações e gráficos de fator de correção de configuração logarítmica da diferença de temperatura média).
8. Propriedades físicas dos fluidos
9. Informações gerais (como exemplo, as dimensões da tubulação, tubos, conexões e flanges, classificação de pressão e temperatura, fatores de conversão, etc.)
10. Recomendações de boas práticas.

Observação: A norma TEMA não determina os métodos para design térmico-hidráulico, isso fica a cargo do fabricante do trocador de calor que vai utilizar seus métodos de fabricação ou configurações digitais disponíveis comercialmente.

Existem trocadores de calor de superfície estendidas por aletas, eles possuem como matrizes tubos ou placas aletadas, esse modelo é empregado quando o fluido é um gás. É um tipo de trocador mais leve e compacto, e são empregados com uma pressão nos tubos considerada elevada, mas não deve ultrapassar 30 atm. de pressão e temperaturas de 850ºC, um alerta é que não se pode utilizá-lo com alta pressão e temperatura ao mesmo tempo. (Godoy, 2008), figura 8.

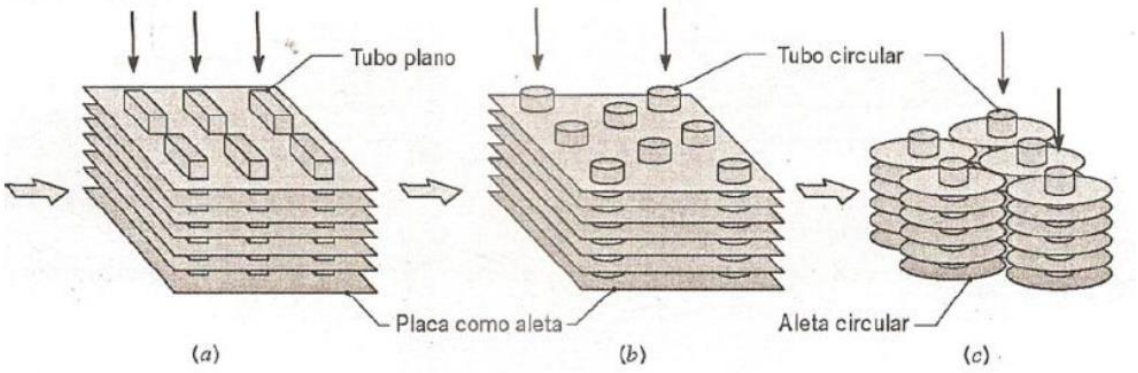


Figura 9: Trocador de calor de aletas.
Fonte Incropera e Dewitt (1998)

No capítulo 3 é apresentada todo o sistema estudado e as etapas da configuração da simulação do trocador de calor utilizando o suplemento do *SolidWorks*, o simulador *Solidworks Flow Simulation.*

3 MATERIAL E MÉTODOS

No experimento foi empregado um trocador de calor didático do tipo casco tubo. Ele é constituído por um tubo externo de acrílico que é o casco do trocador, o acrílico serve para facilitar a visualização do fluxo de água fria. O tubo interno de cobre (que é um bom condutor de calor) serve para o fluxo do fluido quente (água quente) que vai ser resfriado. Entre o casco e o tubo existem diversas chicanas que forçam a água fria, a circular pelo tubo e com isso acaba aumentando à área de troca térmica e o tempo de circulação do fluido frio, o trocador se compõem conforme demonstrado na Figura 10.

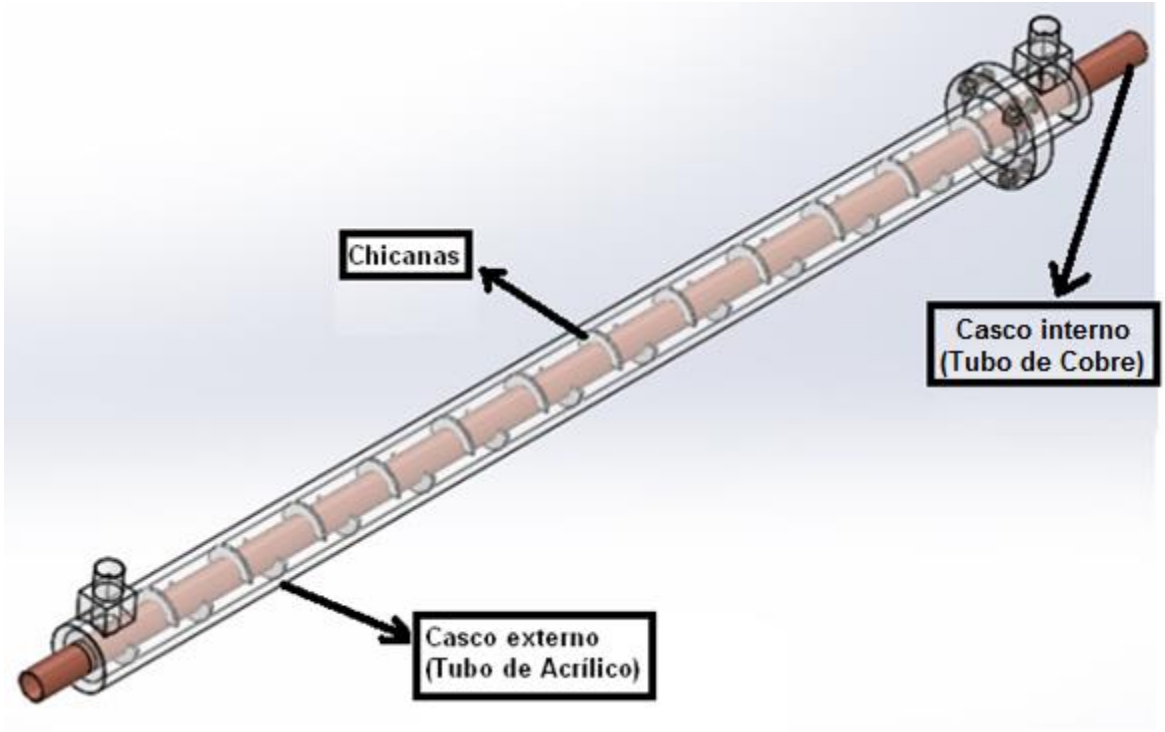


Figura 10: Modelo do trocador de calor de casco-tubo modelado em 3D no *Solidworks* 2014

A figura 11 mostra e ajuda na visualização para a explicação do funcionamento do sistema total do estudo, que está localizado no laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília onde foram realizados três experimentos concorrentes e três experimentos contracorrente, para posterior modelagem e simulação.

Figura 11: Sistema estudado: 1 – Torre de resfriamento, 2 – Trocador de calor (dispositivo do estudo), 3 – Tanque de água quente (cor vermelha), 4 – Calha de *Parshall* e tanque de recepção para a água quente voltar ao sistema, 5 – Recipiente de medição, 6 – Aquecedor com resistência elétrica, 7 – Rotâmetro e sistema de bombeamento de água quente, 8 – Medidores de temperatura (entrada e saída) do trocador de calor, 9 – Sistema de Bombeamento de água fria.

O Sistema simula de forma didática e resumida uma planta industrial. Conforme a figura 10 pode se analisar o procedimento de funcionamento, foi da seguinte forma:

a) Ao iniciar os procedimentos, liga-se primeiramente o sistema de bombeamento do fluido frio (9). O bombeamento é ligado primeiro para evitar danos internos no trocador de calor e nos sensores que estão instalados. Esses sensores estão localizados na entrada e saída dos fluidos do trocador (no total são quatro sensores) e podem sofrer danos se for ligado o bombeamento de fluido quente primeiro. O fluido frio, representado pelo fluido de cor verde, inicia no sistema sendo bombeando do fundo da torre de resfriamento (1), ele passou por um rotâmetro (7), que é um medidor de vazão industrial utilizado para medir a taxa de vazão de líquidos e gases. A vazão do fluido frio que foi para trocador ficou regulada através do rotâmetro para uma vazão constante de cinco litros por minuto. A partir

do rotâmetro existem duas tubulações que o fluido pode seguir para o trocador de calor, basta abrir ou fechar determinadas válvulas para se obter um fluxo concorrente ou contracorrente no trocador de calor. Saindo do trocador de calor o fluido frio vai para a torre de resfriamento (1), ela pode ser considerada como um trocador de calor de contato direto, ou seja, o ar que entra pelas aberturas inferiores nas laterais da torre foi forçado a subir por causa da sucção causada por um ventilador, que ao subir entrou em contato com o fluido que foi descendo por efeito da gravidade e na forma pulverizada, havendo assim uma troca térmica que acabou resfriando o fluido e no sistema ele também serve como reservatório inicial do fluido frio.

b) Em seguida foi ligado o bombeamento do fluido quente (7), que foi bombeado de um reservatório (representado pelo fluido em vermelho na figura 10, item 4), ele passou por um aquecedor com uma resistência elétrica de 3.500 Watts (6) que serve para fazer o aquecimento do fluido (água), da resistência o fluido aquecido foi para o trocador de calor – passou pelo tubo de cobre que possui um sensor de calor na entrada e outro na saída para medir a temperatura do fluido quente, sendo apresentada as medições pelos medidores de temperatura (8). Do trocador de calor o fluido quente foi para a calha de *Parshall (4)*, essa calha é utilizada para a medição da vazão em canais abertos com líquidos fluindo com a ação da gravidade. Foi com a calha que se determinou o cálculo da massa pelo tempo, foi utilizado um recipiente (5) com uma massa conhecida e um cronômetro para a medição. Quando não se está utilizando a calha de *Parshall,* o fluido quente volta para o tanque inicial (4), voltando para o sistema.

O presente estudo foi feito comparando os dados reais obtidos no experimento realizado no laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília, com os resultados simulados no programa *Flow Simulation* do *Solidworks*, o estudo na simulação do sistema foi referente apenas ao trocador de calor que foi a parte principal do componente do sistema a ser analisado.

No próximo capítulo será explicado como foi feito os procedimentos de configuração para a simulação com o suplemento *Solid Works Flow Simulation.*

3.1 PROCEDIMENTOS

O primeiro procedimento realizado foi o experimento prático no laboratório de Operações Unitárias do Unisanta com a obtenção dos dados que foram utilizados na simulação, após isso foi realizado uma medição de todos os componentes do trocador de calor de casco duplo.

Após o término da medição a etapa seguinte foi da modelagem das peças que compõem o trocador de calor, que é exibido no apêndice 01, e montagem do dispositivo para a simulação, que é apresentado no apêndice 02.

A seguir será apresentada como foi realizada a configuração para a simulação do trocador de calor.

3.2 CONFIGURAÇÕES PARA A SIMULAÇÃO

De todo o sistema, foi utilizado apenas o modelo do “Trocador de Calor” e para a comparação foi empregado os dados obtidos no experimento para contemplar os recursos envolvendo passagens internas de fluxo. O objetivo da análise foi avaliar o volume de entrada em função do volume de saída, velocidade, diferença de temperatura, entre outros recursos.

Inseriu-se a entrada e saída volumétrica de água, refinamento de malha, controle de componentes e sensores de fluxo. A visualização dos resultados será por meio de ferramentas de plotagens planares e trajetória de fluxos animados, figura 12.

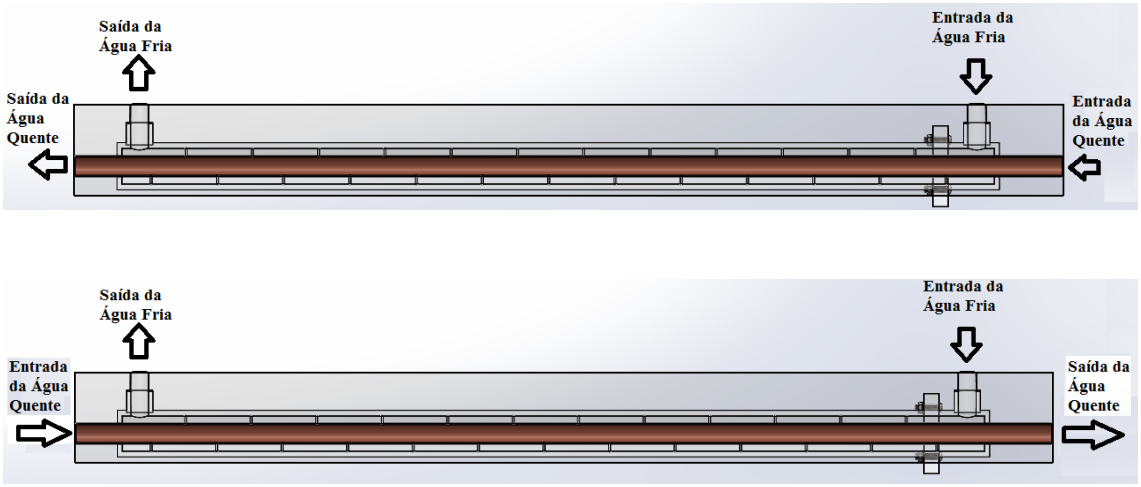


Figura 12: Trajeto do fluxo concorrente (a) de contracorrente (b)

3.3 PRIMEIROS PROCEDIMENTOS

Ao iniciar o estudo, abriu-se o modelo chamado “Trocador de Calor” mostrado na figura 13.

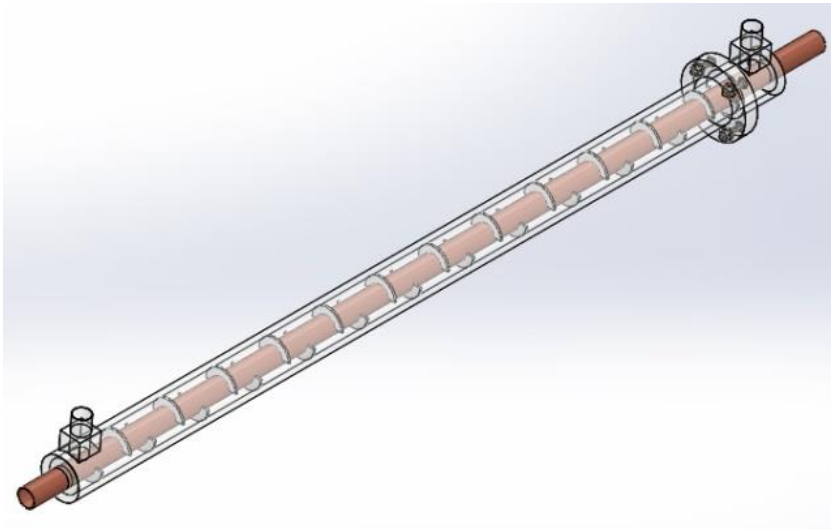


Figura 13: Modelagem do trocador de calor utilizado na Simulação.

Com o *Solidworks Flow Simulation* foi ativo na aba de “Suplementos” iniciou-se o passa-à-passo. Foram analisados os efeitos do fluido internamente no modelo, fecharam-se as aberturas existentes com a ferramenta “*Lids*”.

Para tanto, no menu, clicou-se na opção *Flow Simulation* em seguida *Tools*, *Create Lids,* conforme mostrado na figura 14.

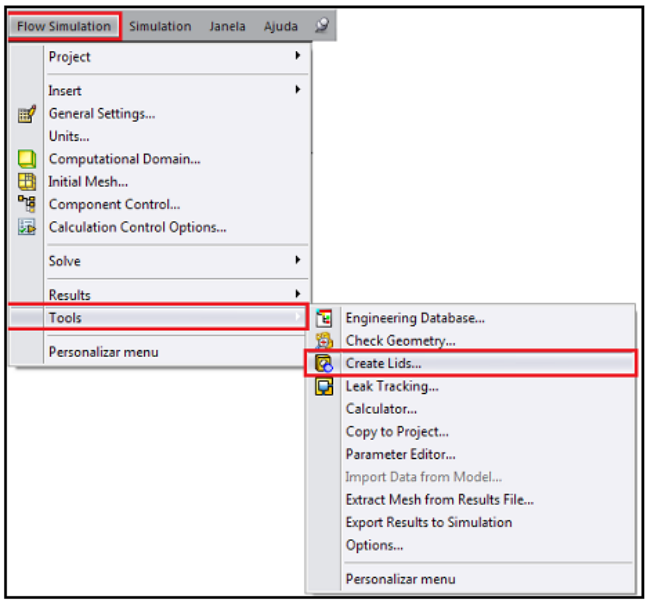


Figura 14: Caminho para o comando *CreateLids* (para tampar as aberturas do trocador de calor)

Para definir as tampas, selecionou-se a superfície onde foi localizado o furo, como demonstrado na figura 15. O recurso reconhece automaticamente a abertura, cria o corpo e atribui uma espessura base para a tampa. Essa espessura é de pouca relevância para a análise.

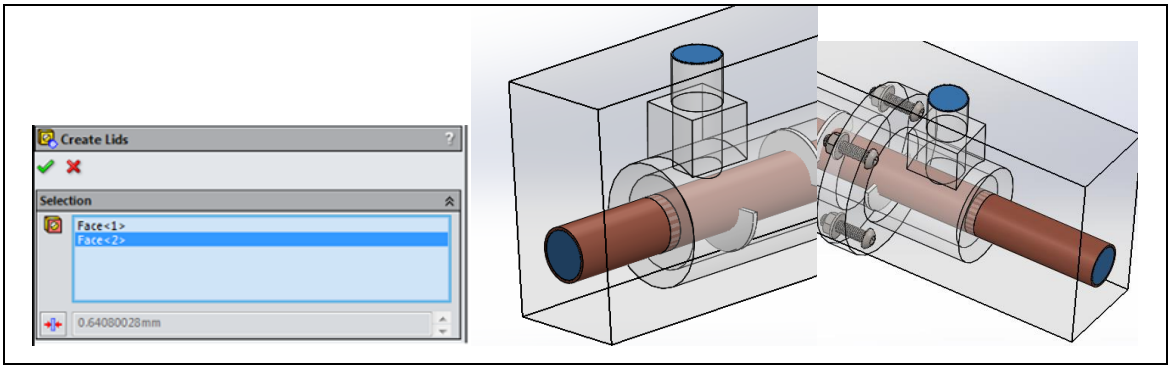


Figura 15: Seleção dos furos de entrada e saída de fluido do trocador de calor para a criação das tampas.

O modelo está vedado, agora foi iniciada a criação da análise. Para isso, foi utilizada uma ferramenta de auxílio para criação de estudo no *Flow Simulation*, este é chamado de "*Wizard*".

Nas ferramentas do *menu*, selecionou-se as opções nessa ordem, a saber: "*Flow Simulation"*, depois *"Project"* e finalmente *"Wizard*".

Com isso foi aberta a seguinte interface, mostrada na figura 16:

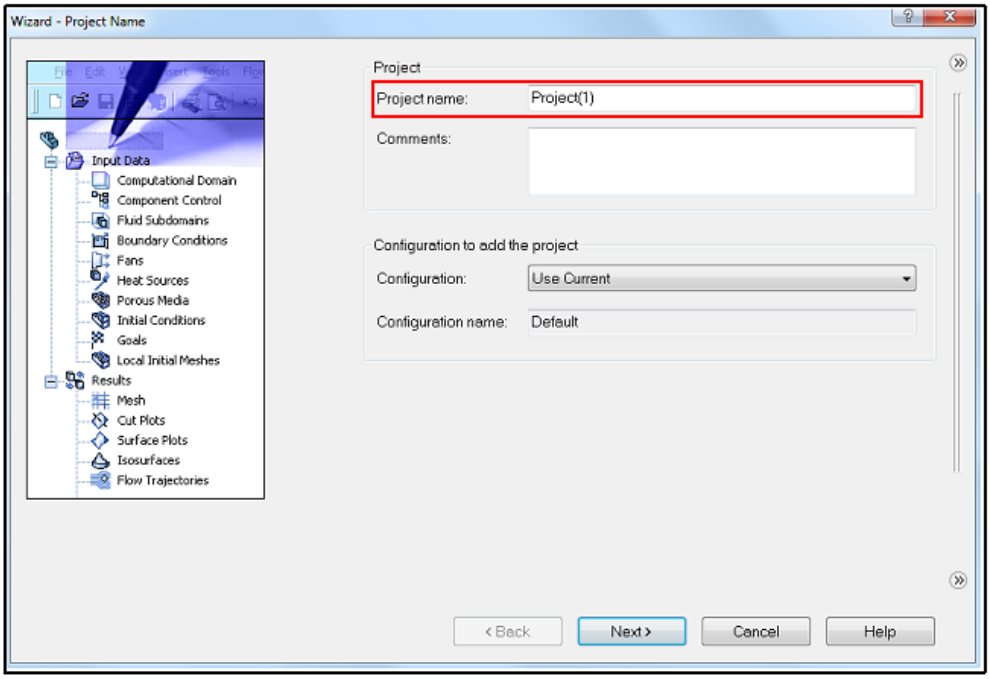


Figura 16: Interface do *Wizard* que serve para auxiliar o início da configuração da simulação

O primeiro passo foi definir o nome do projeto, é a identificação do próprio nome do estudo.

O estudo inicial teve como nome: “Trocador de Calor CC”. Uma vez que foi definido o nome se pressionou *Next*.

Foi constituído o sistema de unidades que se trabalhou. Para tanto, foi selecionado “Sistema SI” entre as diversas opções que o programa oferece, conforme a figura 17.

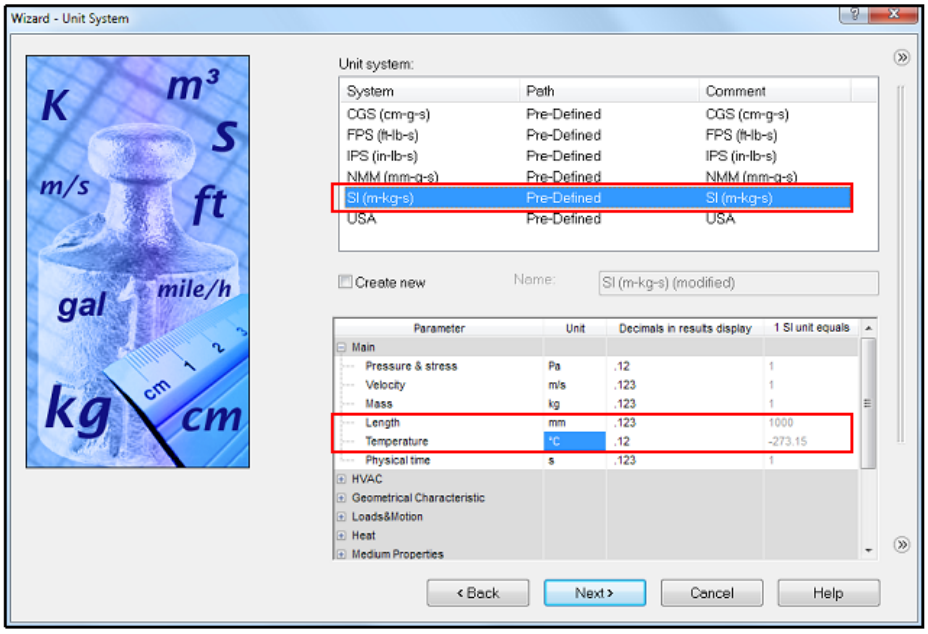


Figura 17: Escolha do sistema de unidades que o *softtware* vai utilizar.

Alguns ajustes nos parâmetros se fizeram necessários, a conhecer, a temperatura incialmente estava sinalizada em Kelvin “K”, no modelo foi utilizado Celsius “ºC”. Outra alteração constituiu-se no parâmetro *length* que se inicia em metros “m” e no caso ficou alterado para milímetros “mm”. Uma vez que foi feita às alterações necessárias se deu prosseguimento ao pressionar o botão *Next*.

Foi definido o tipo de análise, ou seja, se o fluxo trabalhou dentro ou fora do modelo. Além disso, foi possível deliberar condições mais avançadas no projeto, que serão tratadas na sequência, figura 18.

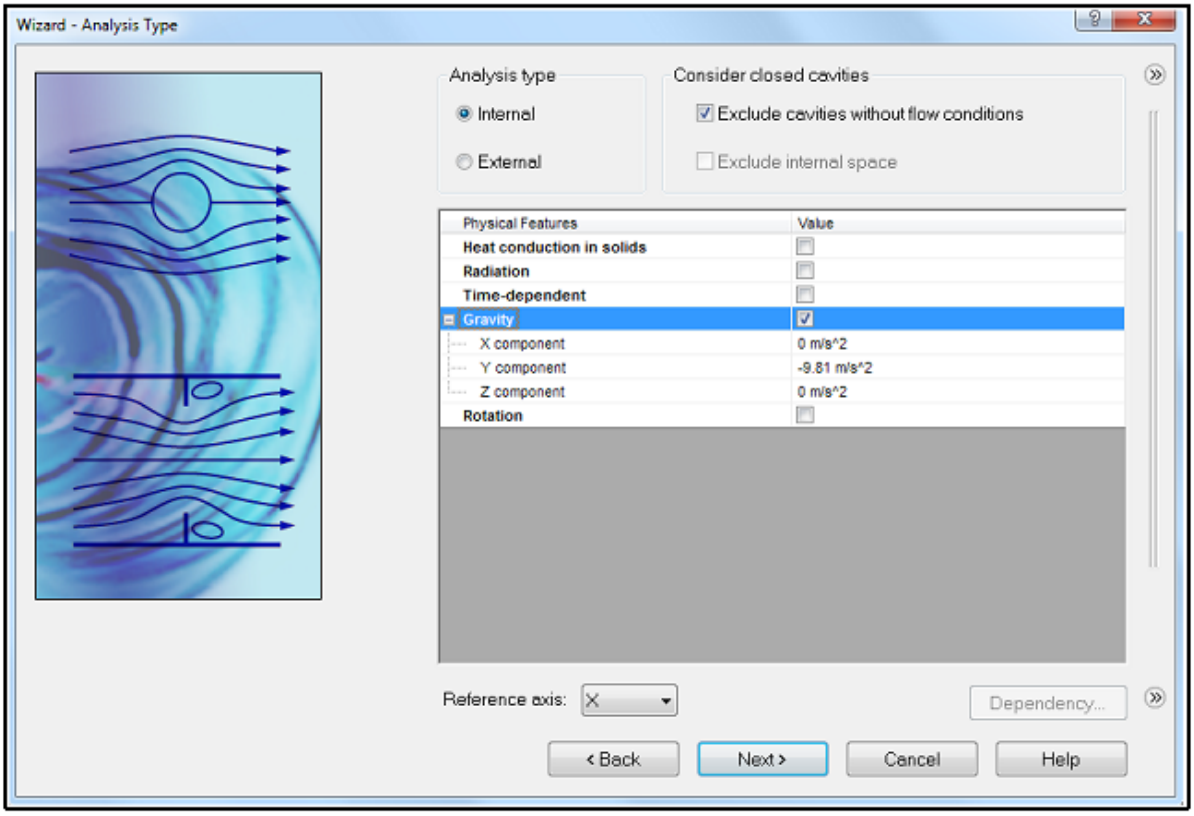


Figura 18: Condições avançadas de projeto.

Em *Analysis Type* definiu-se como fluxo *Internal*. Na sequência, tem-se a opção *Exclude cavities with out Flow conditions*, ou seja, pequenos espaços onde o fluxo não alcançou foram desconsiderados. Deixou-se esta opção habilitada.

Quanto aos *Physical Features* (recursos físicos) foi ativada apenas a *Gravity* (gravidade). Isso influenciou no comportamento da água dentro do trocador de calor, pois sua densidade foi considerada.

Concluída a configuração dessa opção, clicou-se no botão *Next* e foi selecionado o fluido que será utilizado na análise.

Optou-se pelo fluido *Water*, para isso, escolheu dentro da pasta *Liquids*, deu-se um *Add*. Em seguida, definiu-se a característica do fluido, ou seja, se era laminar ou turbulento.

Conforme foi definido no estudo teve a ocorrência do efeito da cavitação no experimento. Foi selecionado o líquido do experimento sendo a água, conforme figura 19.

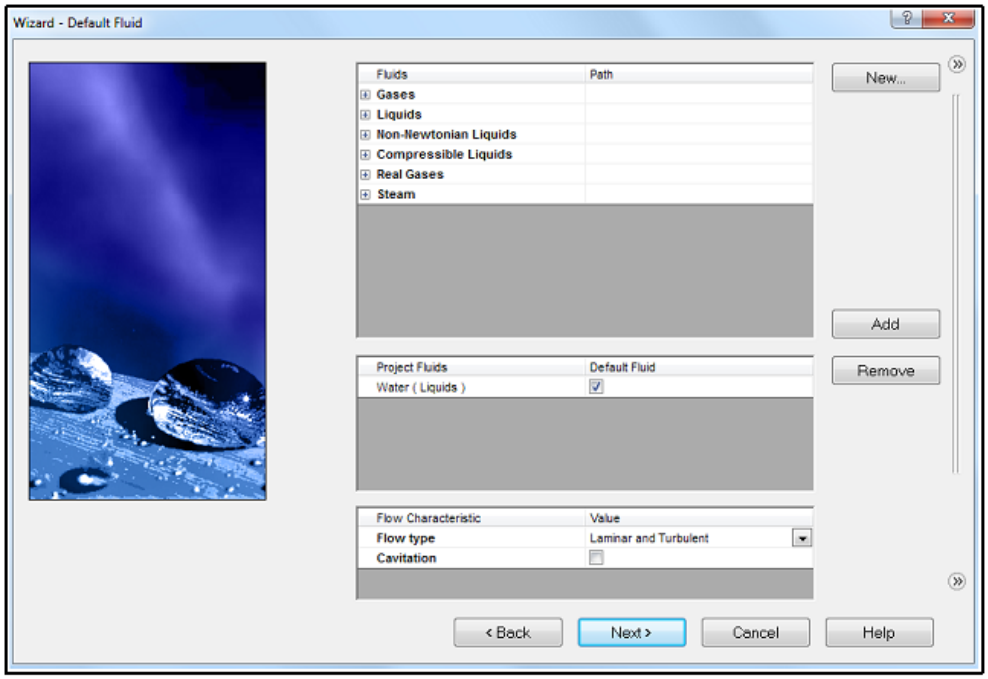


Figura 19: Determinação de fluidos para a simulação e determinação das condições de trabalho desse fluido.

Em seguida constituiu-se a definição das condições de parede. Foi possível determinar condições de rugosidades e propriedades de temperatura para as faces.

Adotou-se uma rugosidade “Zero”, por que com as dimensões reduzidas do dispositivo analisado a sua rugosidade será um fator muito pequeno para influenciar o cálculo, e condições térmicas na parede como *Adiabatic Wall*, ou seja, o sistema foi termicamente isolado, não houve troca térmica com o meio externo. Conforme demonstrado na figura 20.

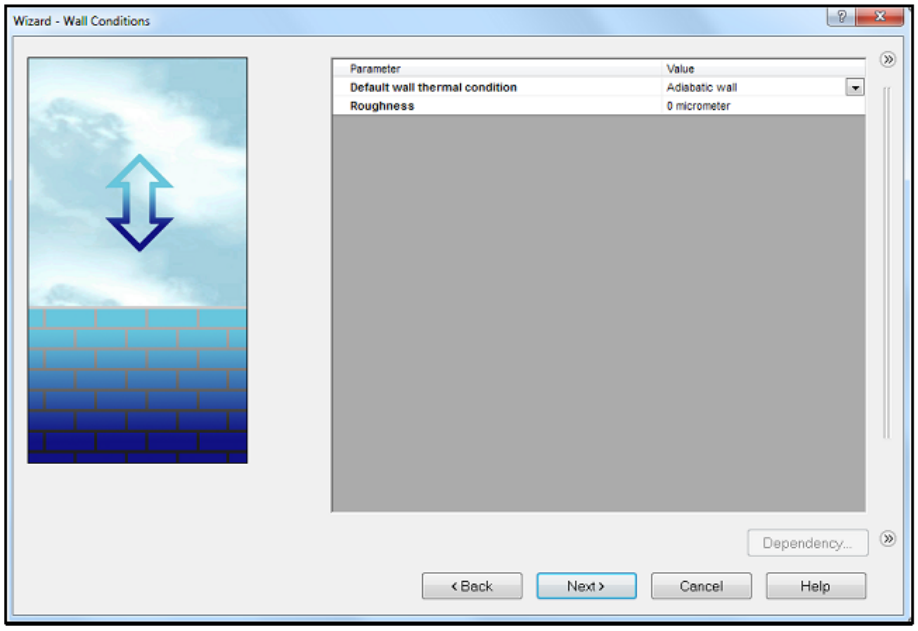


Figura 20: Condição de parede com o ambiente externo.

O passo seguinte foi um resumo das condições iniciais do estudo. Definiu-se a temperatura e pressão ambiente, se o fluxo teve uma velocidade inicial, determinou-se a intensidade de turbulência, entre outros, figura 21.

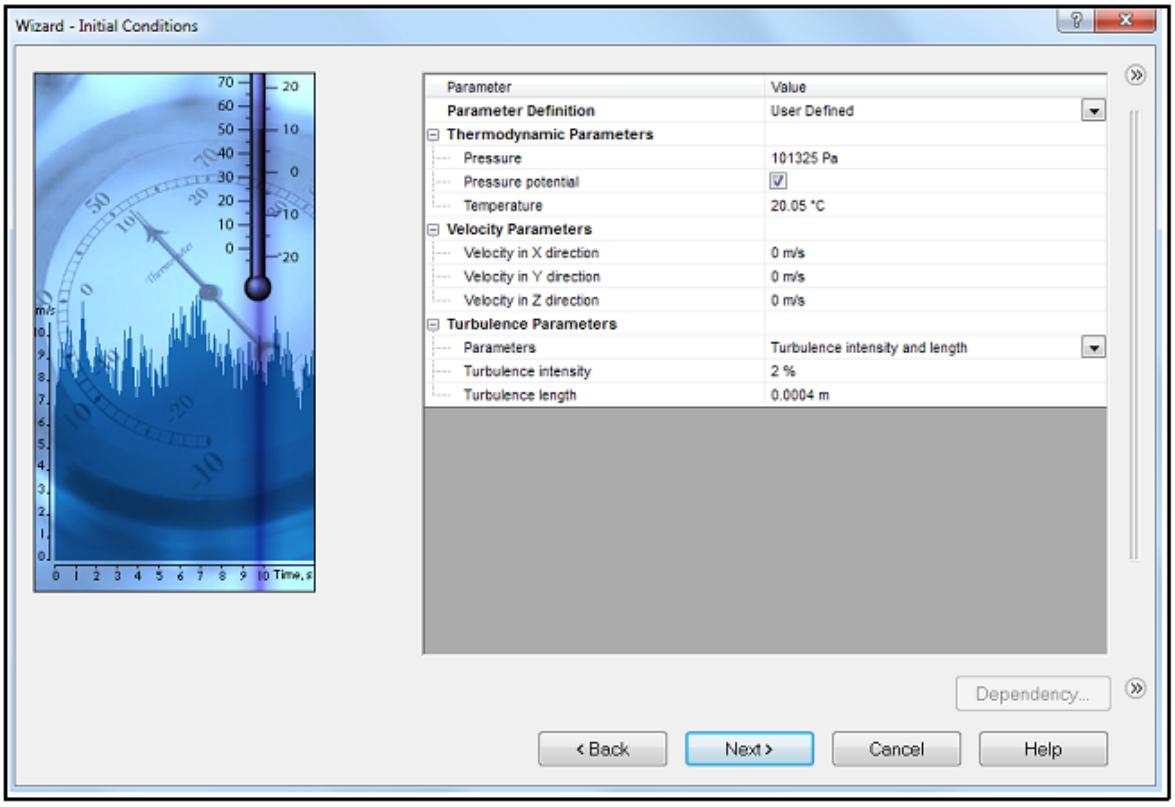


Figura 21: Condições iniciais da simulação.

Nesse caso, as definições padrões foram mantidas e não houve alteração de configuração.

Por último, apresentou-se a interface de malha inicial. Nesta interface foi possível determinar a qualidade, ou nível de detalhe das células de cálculo do estudo. Este nível é chamado no *Flow Simulation* de *Result Resolution*, ou resolução da célula.

Essa resolução afeta diretamente o tamanho da célula bem como tempo computacional, figura 22.

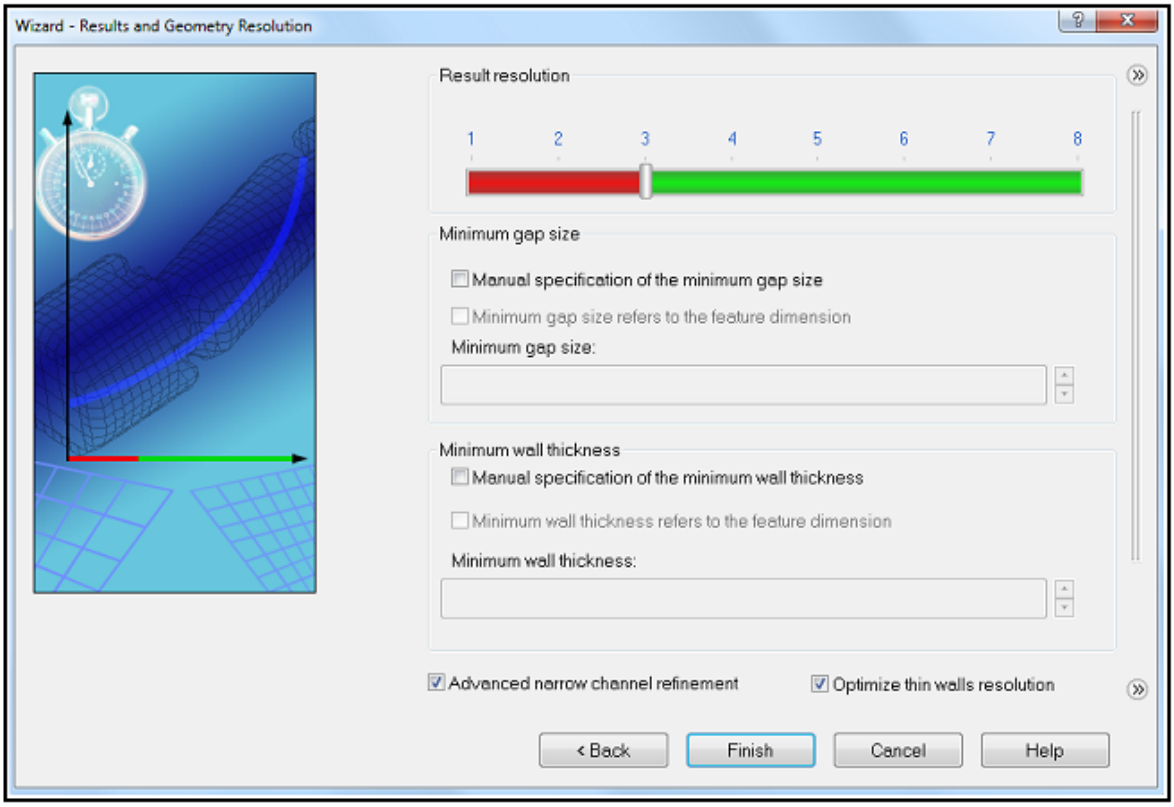


Figura 22: Determinação da célula para o tempo computacional de análise, quanto maior a célula maior o tempo de análise.

Foram utilizados os ajustes já definidos, ou seja, *Resul Tresolution* em “3”. Também se pode definir manualmente a menor abertura e menor espessura de parede. Essas opções estão no centro da interface.

Na parte inferior, foi possível habilitar os *flags*: *Advanced narrow channel refinement* e *Optimize thin Walls Resolution*.

As duas opções foram habilitadas. Com isso o próprio *software* identificou e aperfeiçoou as células nos canais e nas paredes finas. Após isso se deu um *Finish* e as definições iniciais do estudo já foram definidas.

Note que um domínio computacional foi criado envolvendo o modelo. Todo o volume interno está dentro do domínio, mostrado na figura 23.

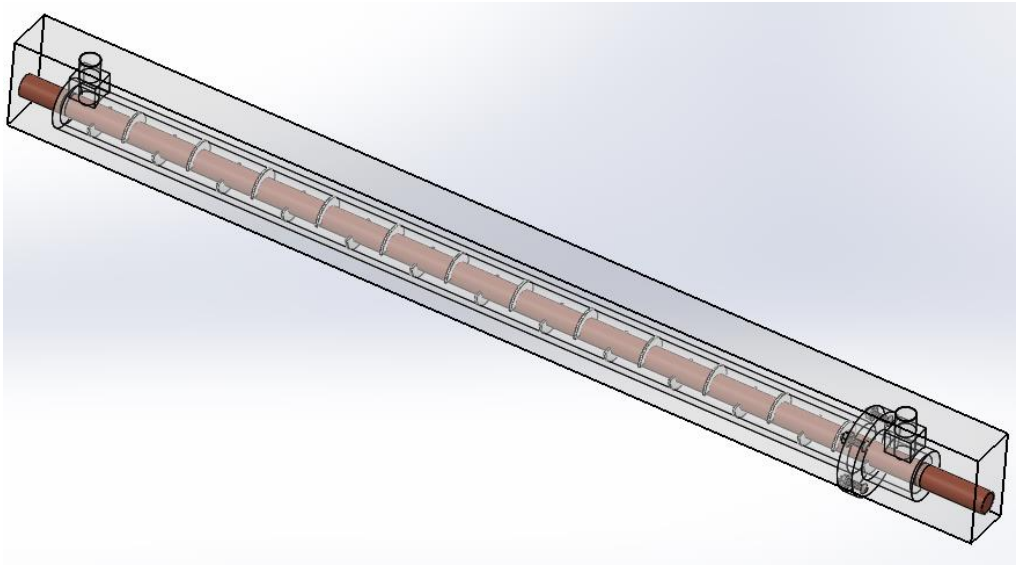


Figura 23: Domínio da simulação para análise.

O projeto ficou pronto para ser analisado. O que foi feito é alimentar o modelo com fluido. Estes recursos fizeram parte das condições de contorno do projeto. Este recebe o nome de *Boundary Conditions*.

3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno foram às entradas e saídas de fluxo. Elas ficaram inseridas nas superfícies internas dos *Lids* (tampa), conforme figura 24. Mas antes, clicou-se com o botão direito no recurso *Boundary Conditions* na árvore da análise e selecionou *Insert Boundary Conditions.*

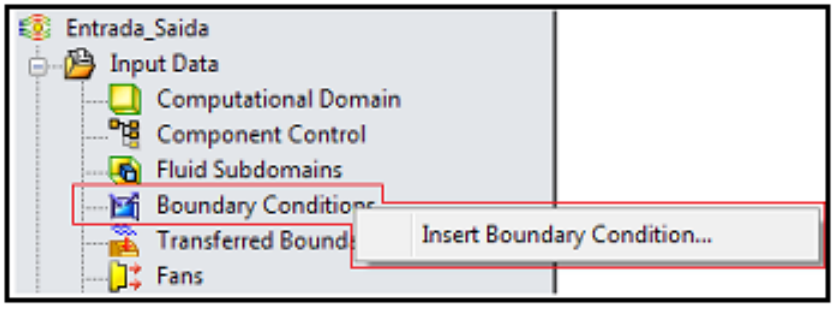


Figura 24: Comando condição de contorno.

Uma interface de opções foi aberta. Foram utilizados os recursos disponíveis de acordo com a aplicação do projeto. Inicialmente definiu-se o *Flow Openings*, ou seja, a entrada de fluxo na tampa indicada.

Selecionou-se a face da tampa e na caixa *Flow Openings* se definiu uma entrada do fluxo de massa, ou seja, *Inlet Mass Flow* com o valor de 0.178 Kg/s, conforme a figura 25.

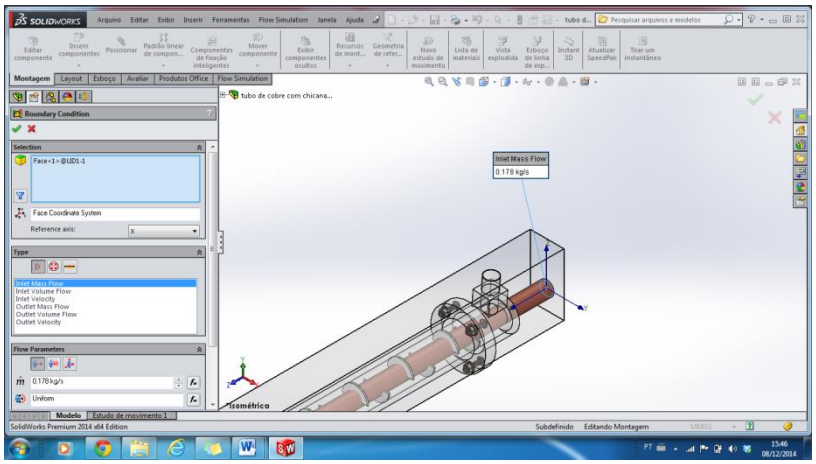


Figura 25: Entrada do fluxo de massa do fluido quente.

Feito isso, deu-se um OK.

Uma vez definido a entrada de fluxo, precisou definir a saída. Para tanto, clicou-se novamente com o botão direito sobre *Boundary Conditions* e selecionou-se a opção *Insert Boundary Conditions*, conforme a figura 26.

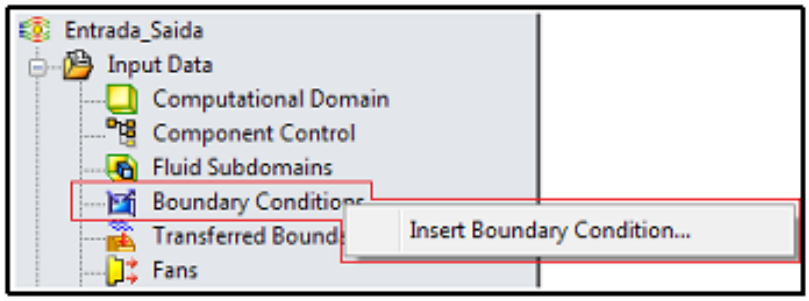


Figura 26: Comando para inserir as condições de contorno.

Na interface de condições de contorno, se elegeu a tampa oposta, ou seja, o orifício por onde saiu o fluxo. Em seguida, na caixa *Type* modificou-se a escolha para *Pressure Openings* e definiu uma *Environment Pressure*, ou seja, aberto para o ambiente, figura 27.

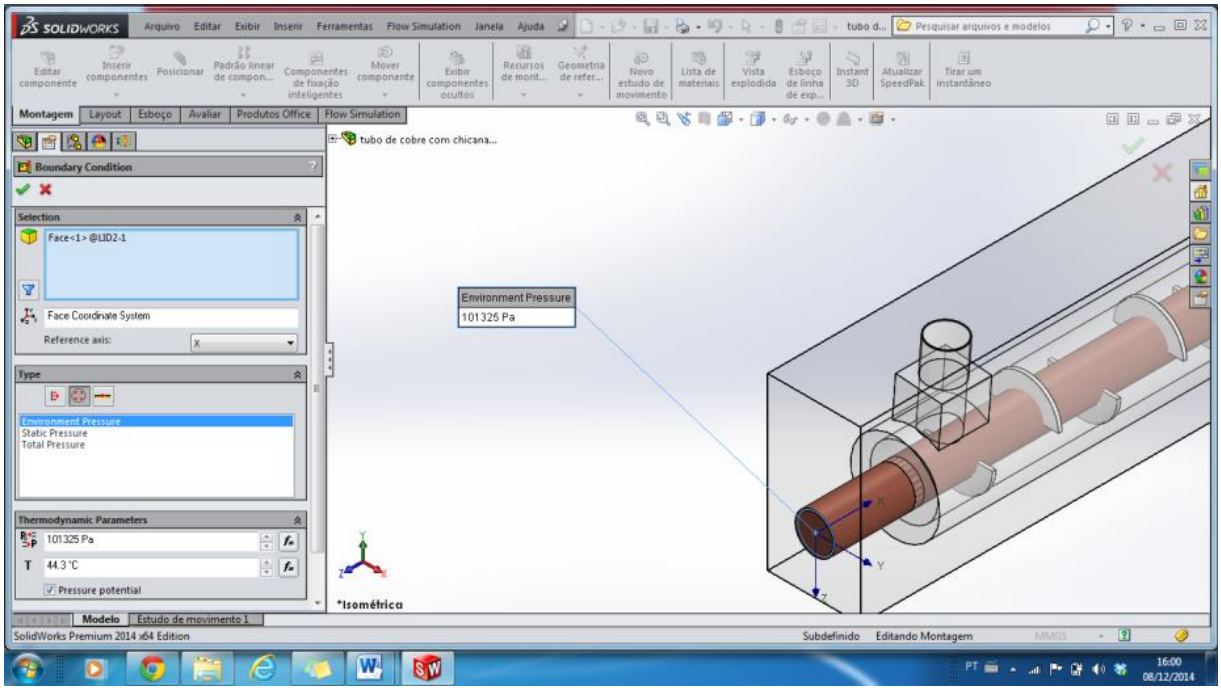


Figura 27: Saída do fluido quente na pressão ambiente e temperatura de saída de 44,3ºC.

Note que quando foi definida a saída do fluxo, o *Flow Simulation* já se insere os valores de pressão e temperatura ambiente, se alteraram a temperatura de saída do fluido quente para 44,3ºC que foi definido na configuração inicial do estudo prático.

Nesse momento foram determinadas as condições de contorno para o fluido frio. Selecionou a face da tampa e na caixa "*Flow Openings*" definiu uma Velocidade de Entrada, ou seja, *Inlet Velocity* na ordem de "0.03128 Kg/s".

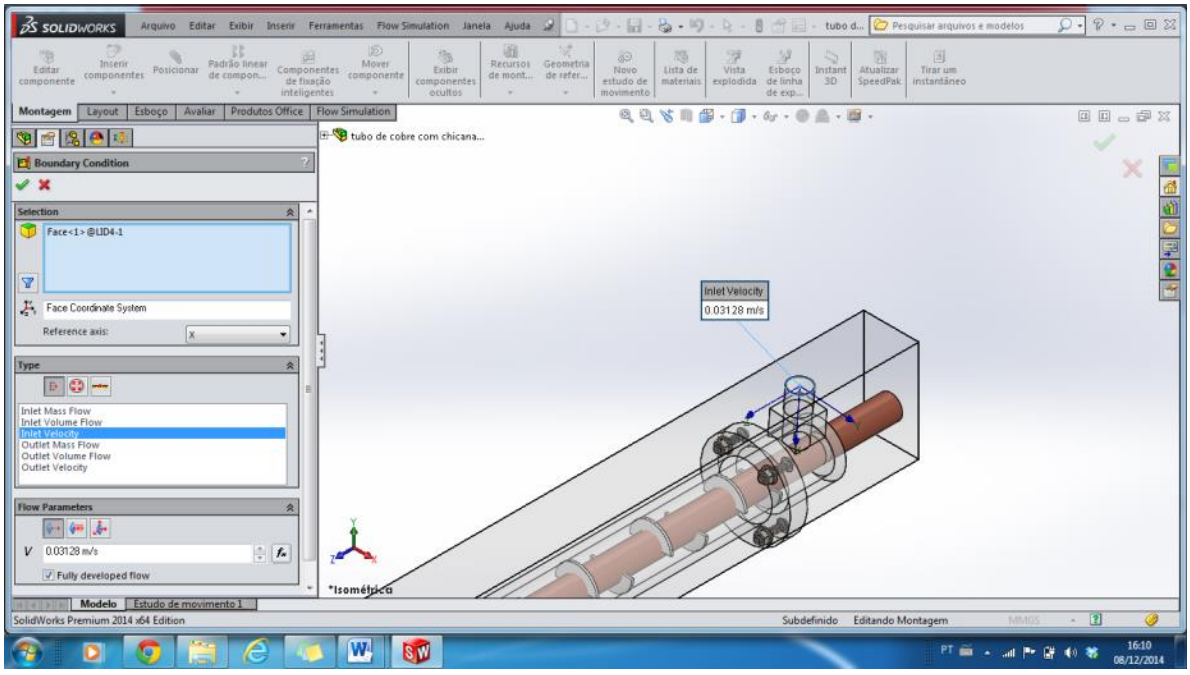


Figura 28: Condição de contorno da entrada do fluido frio.

Uma vez que definida a entrada de fluxo do fluido frio, precisou-se deliberar a saída. Para tanto, clicou-se novamente com o botão direito sobre *Boundary Conditions* e selecione a opção *Insert Boundary Conditions*, como mostrado na figura 28.

Na interface de condições de contorno, selecionou a tampa oposta, ou seja, o orifício por onde saiu o fluxo de fluido frio. Em seguida, na caixa *Type* modificou a escolha para *Pressure Openings* e definiu uma *Environment Pressure*, ou seja, aberto para o ambiente, figura 29.

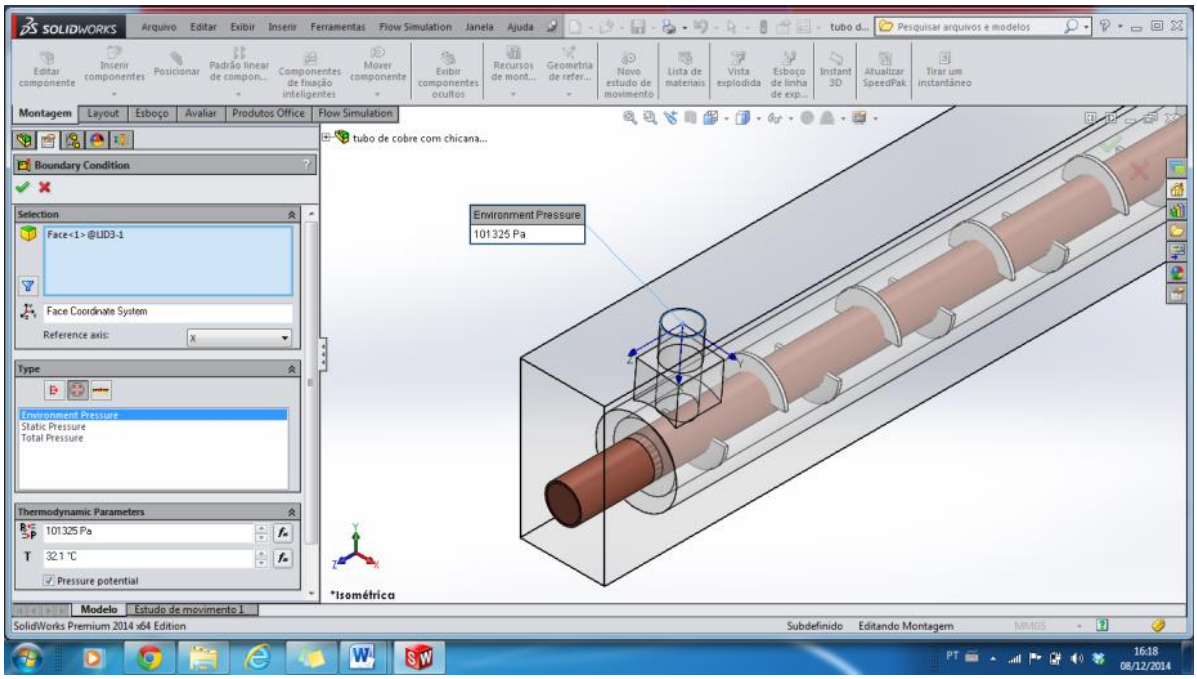


Figura 29: Condições de contorno da saída do fluido frio.

Note que quando foi determinada a saída do fluxo, o *Flow Simulation* já inseriu os valores de pressão e temperatura ambiente, se alterou a temperatura de saída do fluido frio para a temperatura de 32,1ºC que havia sido definida nas configurações iniciais do estudo prático.

Então o modelo definido ficou desta forma, mostrada na figura 30:

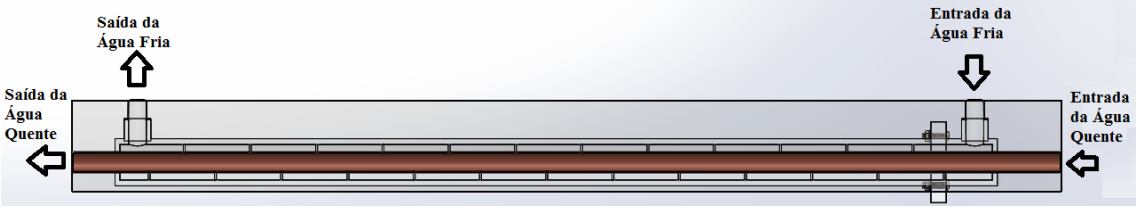


Figura 30: Sistema concorrente configurado na simulação, tanto os fluidos (água) quentes e frias percorrem de forma paralela dentro do trocador de calor.

Os próximos passos foram controlar os componentes que participaram da análise. Para esse ajuste, foi utilizada a ferramenta *Component Control*. Clicou-se com o botão direito na ferramenta *Input Data* e selecionou-se a opção *Component Control,* conforme mostrado na figura 31.

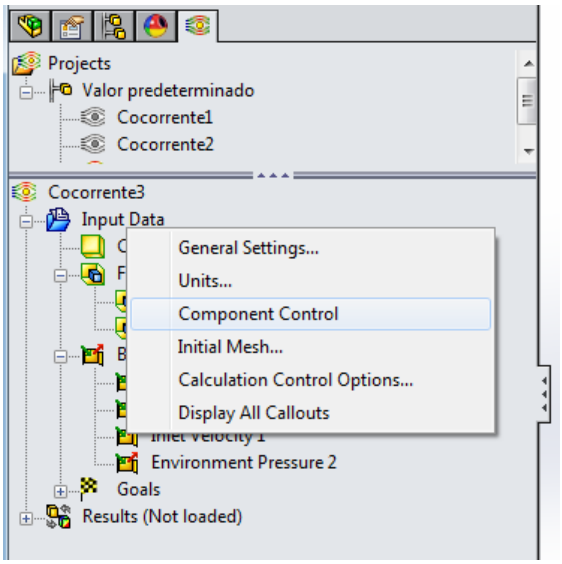


Figura 31: Ativando a Interface de controle de componentes.

Uma interface de controle de componentes foi aberta. Através dessa pode-se controlar quais os corpos que participaram da análise. Foram desconsiderados os parafusos e porcas que não participam do processo. Ficaram desabilitados todos os parafusos e porcas, figura 32.

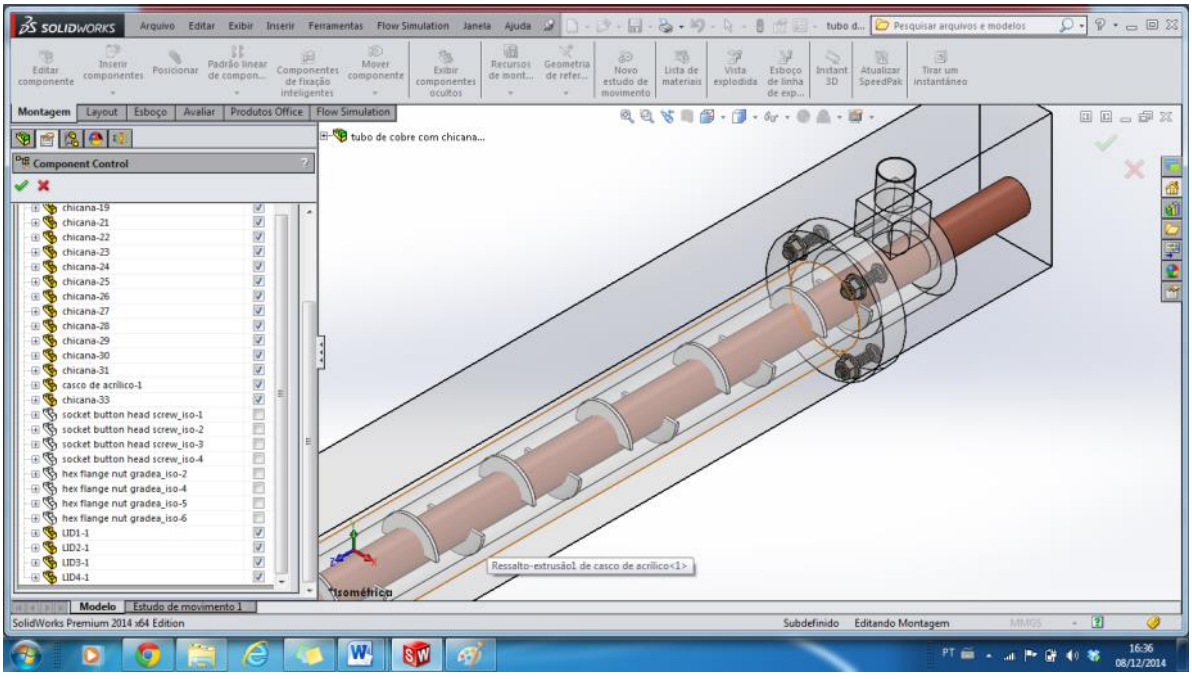


Figura 32: Retirando os parafusos e porcas da análise.

Concluído o processo, clicou-se em OK.

3.4.1 Sensores (*Goals*)

Nesse momento iniciou-se a sondagem da análise, para tanto, foi adicionado sensores locais e globais para medir os efeitos do fluxo no modelo. Esse recurso são os *Goals*. No estudo em questão teve-se um sensor global, dois locais e um equacional. Clicou-se com o botão direito sobre a ferramenta *Goals* e selecionou a opção *Insert Global Goals,* figura 33.

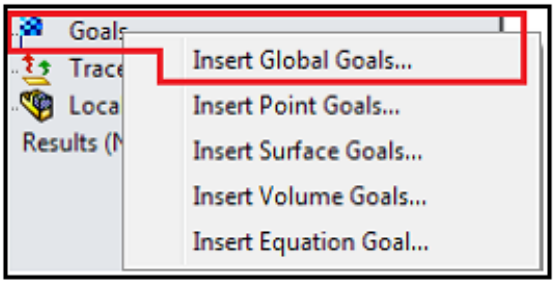


Figura 33: Comando para inserir os sensores globais.

Feito isso foi apresentado a seguinte interface, exibida na figura 34:

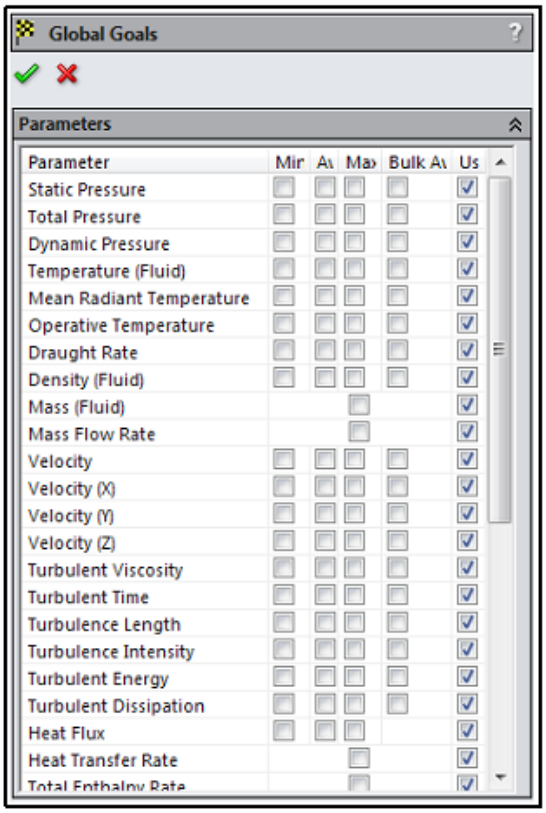


Figura 34: Janela com as opções de sensores globais.

A análise foi à máxima velocidade do fluido. Para tanto, ativou-se na linha *Velocity* e na coluna *Max*. Depois, se confirmou com um *OK*.

Em seguida, foram adicionados dois sensores locais de superfície. Estes foram inseridos na tampa de entrada e saída de fluxo. Observação: essa seleção foi feita do lado interno da tampa, onde se tem contato com o fluido. Selecionou-se a tampa e com o botão direito do mouse clique selecionar outra e selecione o lado interno.

Clicou com o botão direito sobre a ferramenta *Goals* e selecionou a opção *Insert Surface Goals*.

Selecionaram-se as faces internas das duas tampas, ativou a opção *Create Goal for each surface* (foi criado um sensor para cada face).

Assim, foi avaliada a temperatura de entrada e saída, para isso, marcou-se o dado *Temperature (Fluid),* foram avaliados também *as* Velocidades de entrada e saída do fluido, também foi marcado o *Velocity,* conforme a figura 35.

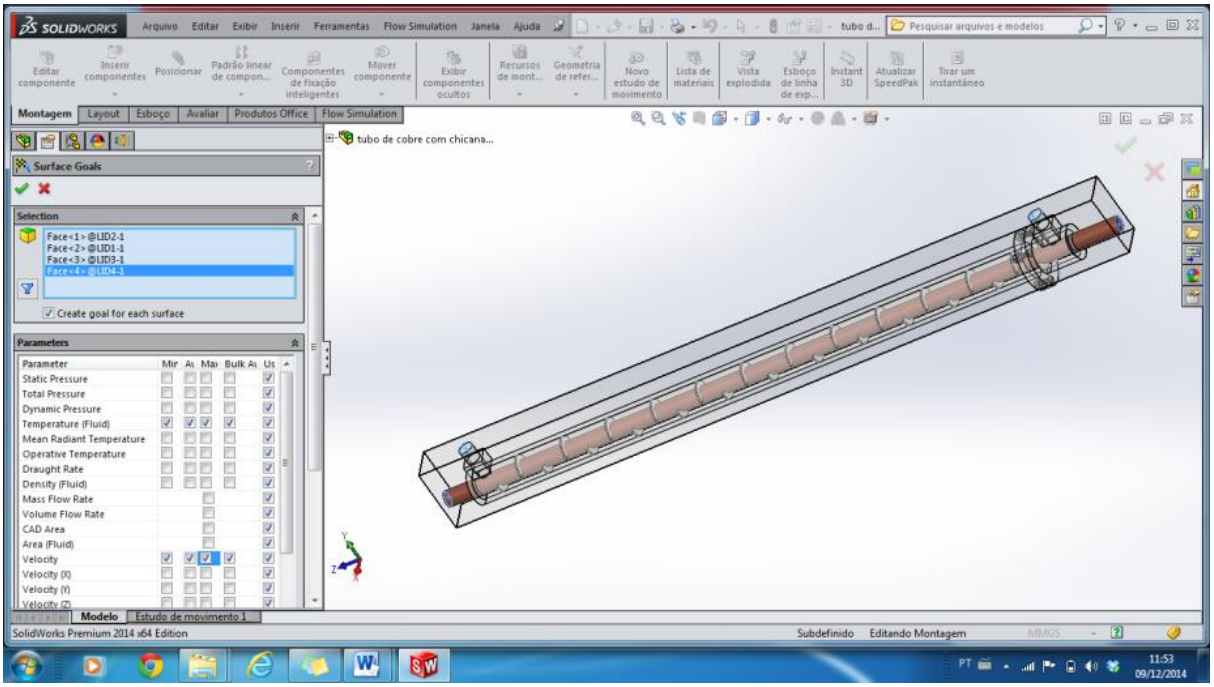


Figura 35: Opções escolhidas para os sensores de superfície.

Como pode ser notado o processo foi concluído, tendo agora os seguintes *goals* mostrado na figura 36:

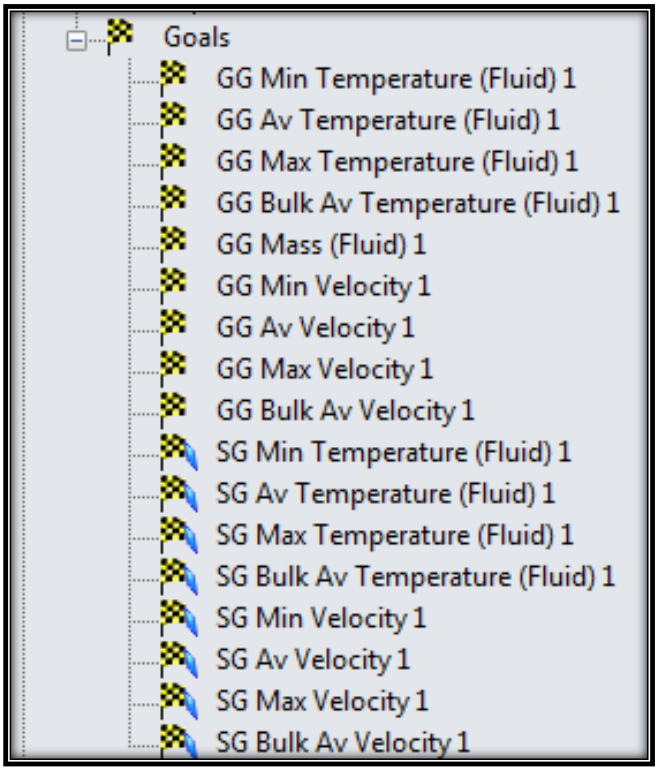


Figura 36: Sensores selecionados para análise e simulação.

Uma vez concluído o modelo em estudo, e definido incialmente a entrada e saída do fluido, além que foram explorados os efeitos da velocidade e temperatura. Para que fosse executado, clicou-se com o botão direito sobre o estudo e selecionou a opção *Run*, mostrado na figura 37.

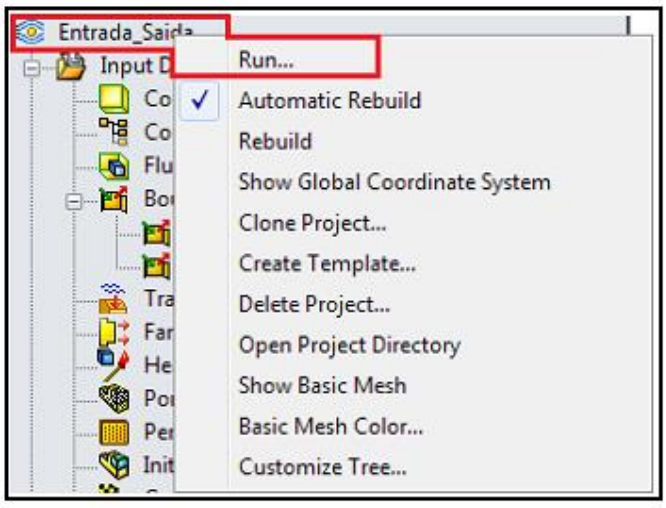


Figura 37: Início da análise de simulação.

Foi aberta a seguinte interface inicial, mostrada na figura 38:

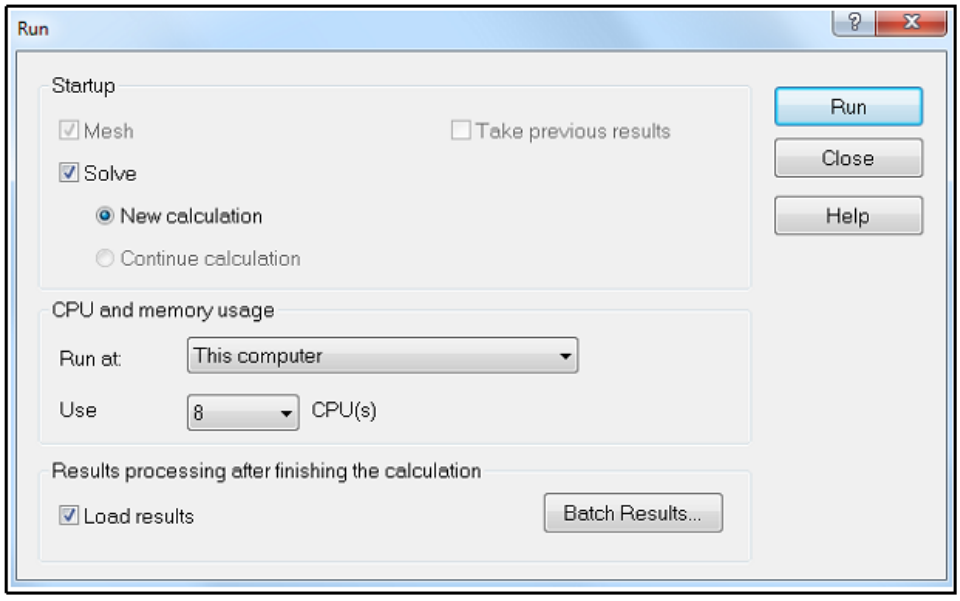


Figura 38: Interface inicial para o início da simulação do trocador de calor e análise de dados da simulação.

Note que foi possível nesta interface gerar apenas a *Mesh* (malha), determinou-se qual o computador calculado, quantos núcleos participaram da execução, etc. Para executar a análise, execute o comando *Run*. A análise começará a ser realizada.

Poderá observar as interações ao longo do processo na figura 39:

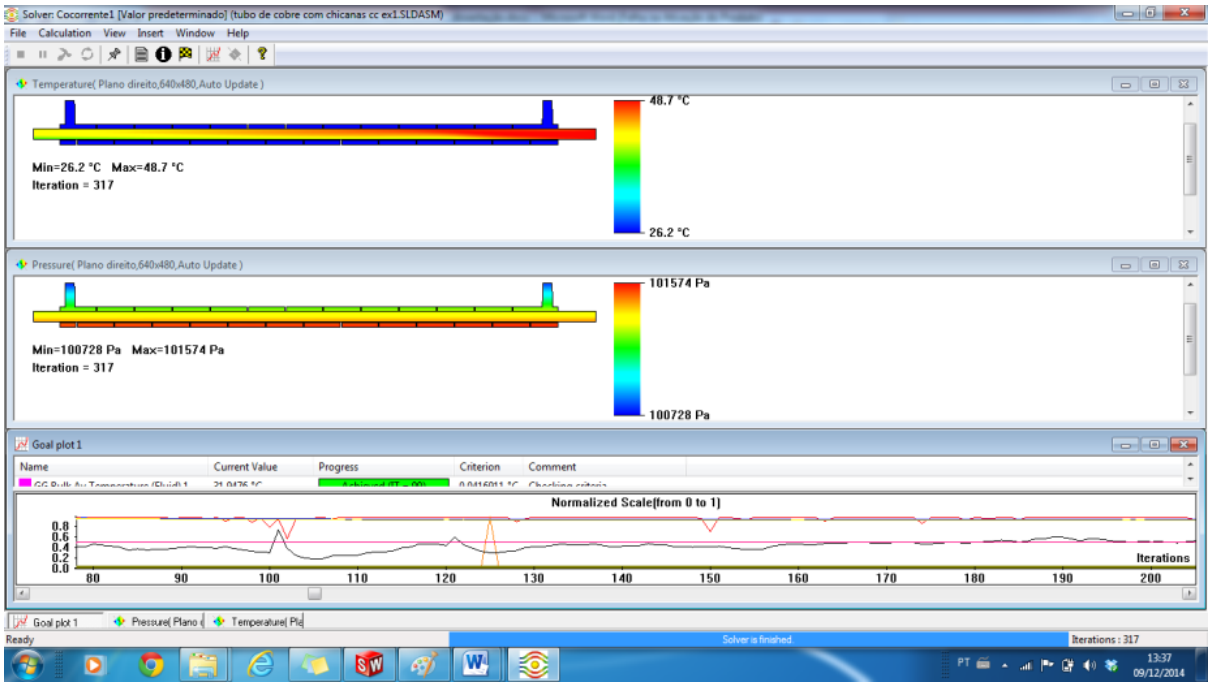


Figura 39: Interações das análises.

Observou-se na barra azul inferior, quando estava totalmente preenchida e descrita, *Solver is Finished* o estudo ficou pronto. Fechou-se a interface.

O próximo passo foi plotar os resultados para verificação dos resultados calculados pelo *software*.

3.4.2 Apresentação dos Resultados

Com o projeto definido, as condições de contorno inseridas e o resultado executado o próximo passo foi plotá-los.

Note que o segundo nível na árvore do *Flow Simulation* é *Results*.

Existe uma vasta opção de resultados para serem exibidos.

Até o momento, alguns recursos mais simples foram demonstrados. Inicialmente, se plotou a malha do modelo num determinado plano. Teve que ser ativado o comando Corte de Seção no plano *Right*. No nível *Results*, clicou com o em *Cut Plots* e selecionou *Insert,* mostrado na figura 40.

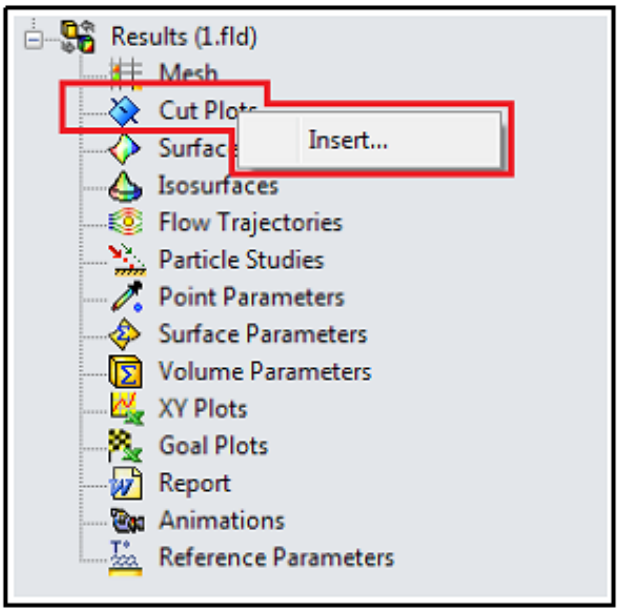


Figura 40: Comando *insert* no *cutplots* em *results*.

Na sequência foi aberta uma interface. Determinou-se a plotagem e o plano de visualização, conforme mostrado na figura 41.

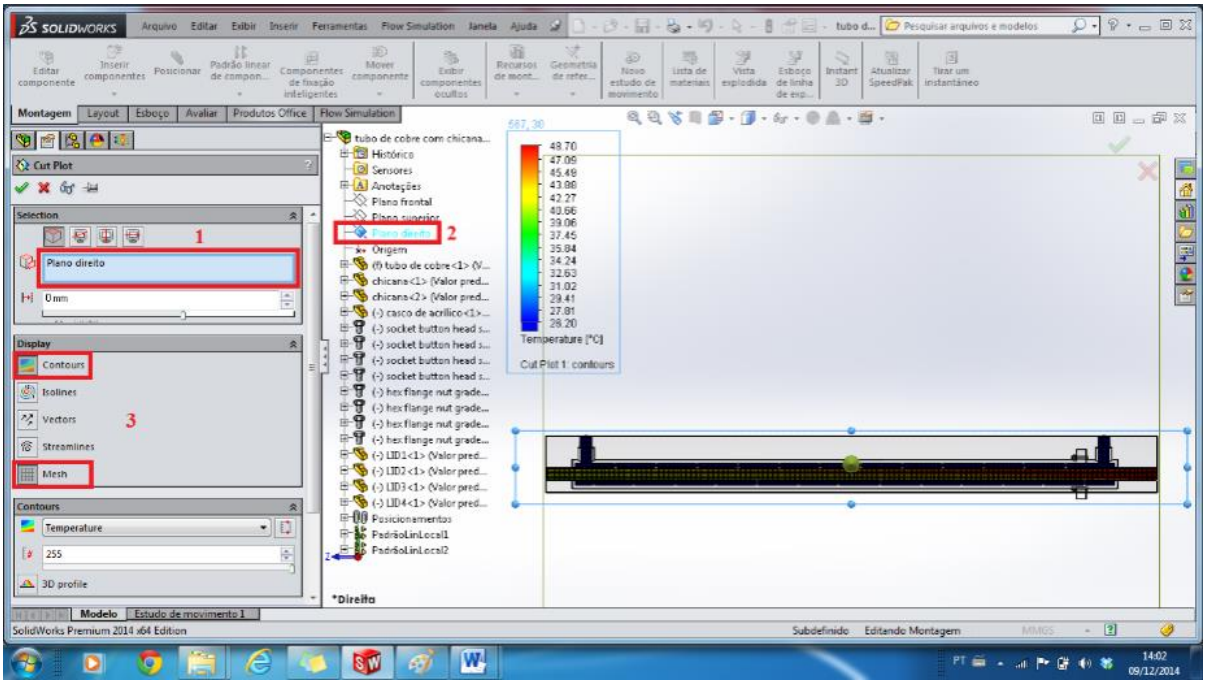


Figura 41: Determinação do plano de visualização.

Primeiro, clicou-se na caixa azul para referenciar um plano. Na sequência, se procurou o plano Direito na árvore de projeto. Depois, deixou ativo apenas a *Mesh* no campo *Display*. Feito, se confirmou com um OK.

A plotagem ficou como mostrada na figura 42:

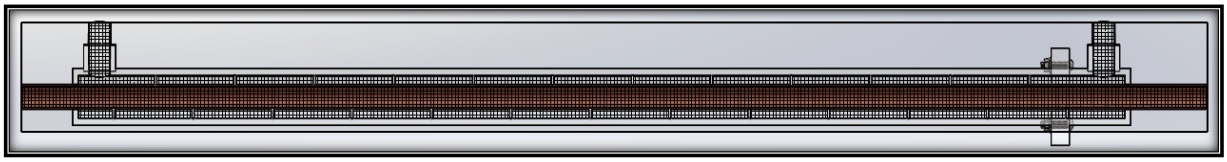


Figura 42: Mostra a malha criada no trocador de calor.

Foi possível observar a formação das células ao longo da cavidade. Lembrando que se pode modificar o “Nível” de refinamento na malha inicial.

A próxima plotagem foi a velocidade de fluxo. Foi utilizado o mesmo recurso para inseri-lo. Clicou com o botão direito em *Cut Plots*, selecionou *Insert*. Tomou-se como referência o plano *Right*. Na aba *Display* habilitou o ícone *Contours* apenas. Abaixo, na aba *Contours*, selecionou a plotagem *Temperature*. Em seguida, se confirmou com um *OK*. A plotagem ficou como mostrada na figura 43:

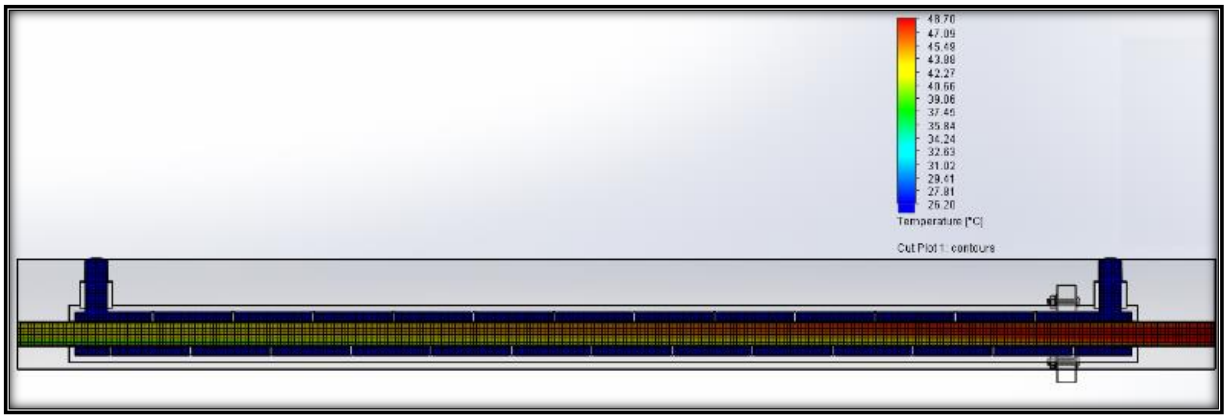


Figura 43: Malha criada juntamente com o contorno de temperatura no trocador de calor.

Agora, foi iniciada uma plotagem de trajetória de fluxo. Essa plotagem consiste numa animação.

Antes, ocultou-se as duas plotagens anteriores clicando com o botão direito sobre *Cut Plots* e selecionou a opção *Hide All*. Clicou com o botão direito em *Flow Trajectories* e selecionou *Insert,* abriu uma janela do lado esquerdo, *Configure* conforme a figura 44.

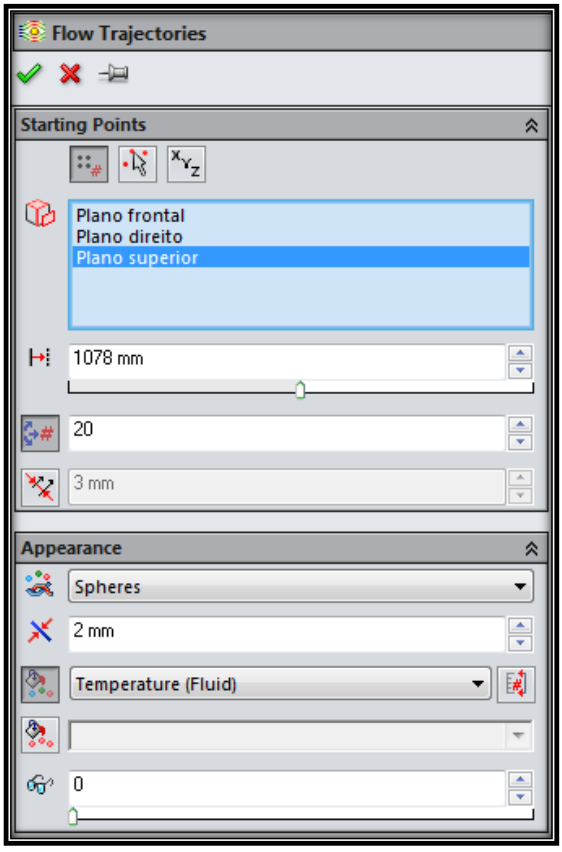


Figura 44: Configuração da trajetória dos fluidos.

Basicamente, o que se fez aqui foi adicionar os atores que dinamicamente mostrarão o caminho do fluido ao longo da cavidade. Para tanto, selecionou na Caixa Azul os planos do trocador, conforme a figura 45.

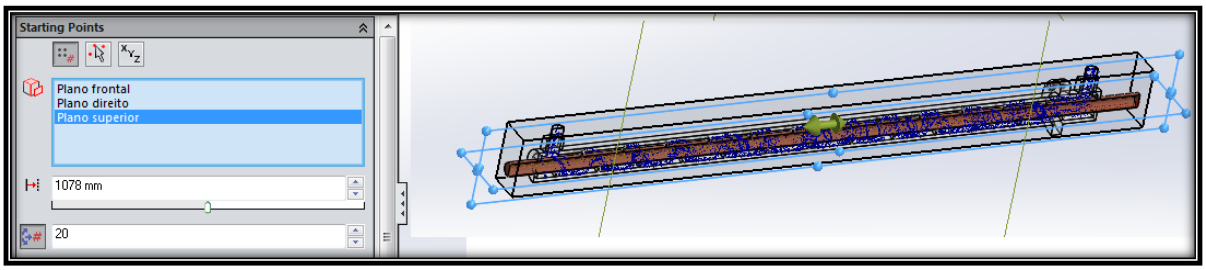


Figura 45: Seleção dos planos para a circulação do fluido.

No campo abaixo, se pode determinar o número de atores que participaram da animação, neste caso “20”. O próximo passo foi definir a aparência dos atores. Neste caso foi utilizado “*Spheres*”, ou esferas para representar o fluxo. Na sequência, defina o parâmetro de verificação como *Temperature (Fluid),* conforme a figura 46.

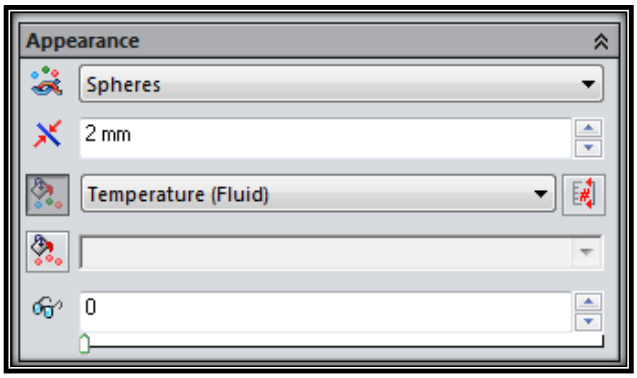


Figura 46: Determinação da aparência e o que se quer determinar, no nosso caso temperatura.

A visualização ficou como mostrado na figura 47:

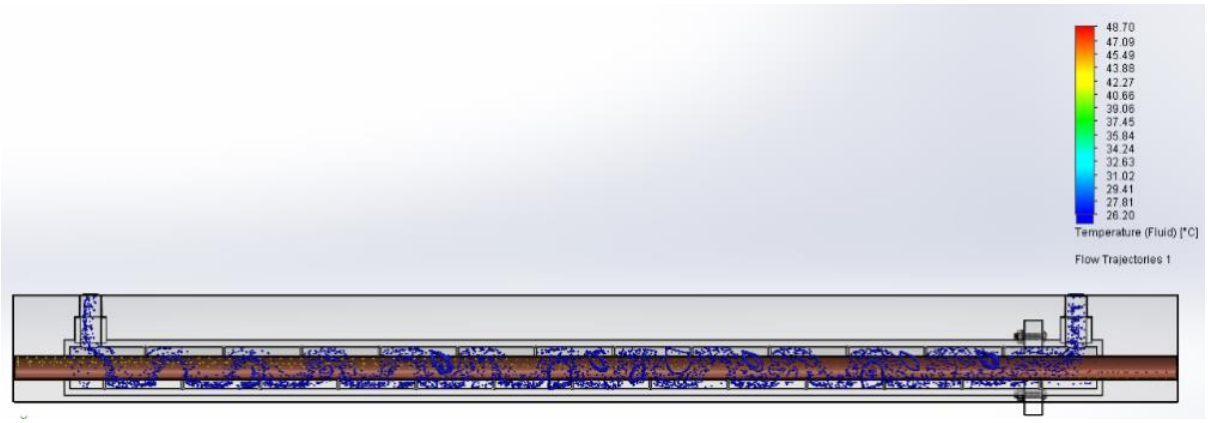


Figura 47: Demonstra como fica o sistema com o fluido circulando e sua temperatura.

Para uma visualização dinâmica, clicou com o botão direito sobre a plotagem e selecionou a opção *Play*.

Na última plotagem foram extraídas as informações dos *Goals* anteriormente definidos. Essa plotagem foi exibida numa interface Excel, com dados e gráficos.

Clicou com o botão direito sobre *Goal Plots* e selecione *Insert.* Conforme a figura 48.

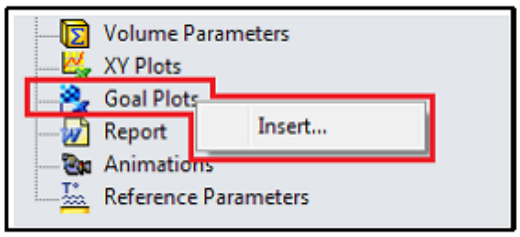


Figura 48: Extraindo os resultados dos sensores.

Os *Goals* que foram determinados na parte inicial serão listados. Podem-se ativar todos os *flags* para ser avaliado numa interface *Excel*. Selecione *All* e clique na opção *Export to Excel,* conforme mostrado na figura 49.

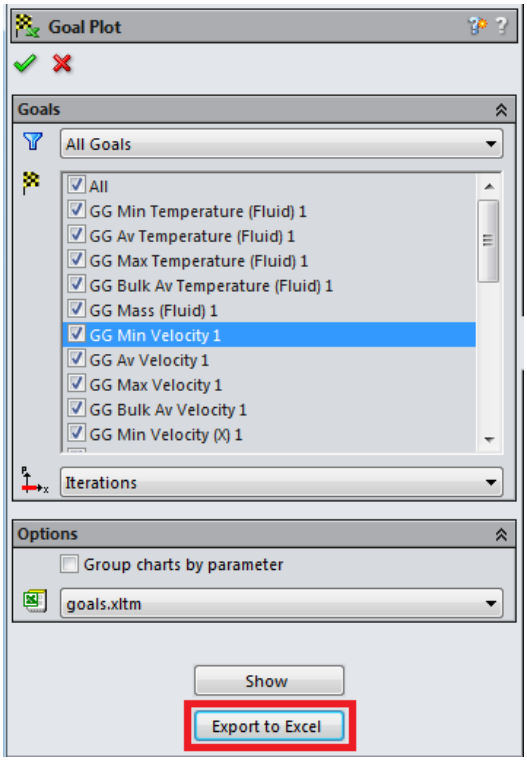


Figura 49: Selecionando todos os sensores e exportando para o excel.

Pode-se observar as informações na planilha gerada. A primeira delas foi uma relação de dados numéricos seguindo os *goals* definidos, conforme a tabela 1.

Tabela 1: Dados obtidos do experimento 01 concorrentes no trocador de calor de casco duplo.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Min Temperature (Fluid) 1	[°C]	26,2000	26,1999	26,1994	26,2000	58,6	Yes	4,77E-05	2,79E-05
GG Av Temperature (Fluid) 1	[°C]	31,9728	31,9719	31,9698	31,9737	100,0	Yes	2,71E-03	4,21E-02
GG Max Temperature (Fluid) 1	[°C]	48,7000	48,7000	48,7000	48,7000	100,0	Yes	0,00E+00	3,68E-05
GG Bulk Av Temperature (Fluid) 1	[°C]	31,9476	31,9468	31,9447	31,9485	100,0	Yes	2,68E-03	4,17E-02
GG Mass (Fluid) 1	[kg]	1,0033	1,0033	1,0033	1,0033	100,0	Yes	1,07E-06	1,00E-02
GG Min Velocity 1	[m/s]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0	Yes	0,00E+00	0,00E+00
GG Av Velocity 1	[m/s]	0,0437	0,0437	0,0437	0,0437	100,0	Yes	1,18E-05	1,02E-04
GG Max Velocity 1	[m/s]	0,1369	0,1369	0,1369	0,1370	100,0	Yes	1,62E-04	1,08E-03
GG Bulk Av Velocity 1	[m/s]	0,0436	0,0436	0,0436	0,0436	100,0	Yes	1,18E-05	1,02E-04
GG Min Velocity (X) 1	[m/s]	-0,0444	-0,0444	-0,0444	-0,0444	100,0	Yes	1,70E-06	7,86E-04
GG Av Velocity (X) 1	[m/s]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	27,9	Yes	1,00E-06	2,81E-07
GG Max Velocity (X) 1	[m/s]	0,0520	0,0519	0,0512	0,0527	100,0	Yes	1,43E-04	7,13E-04
GG Bulk Av Velocity (X) 1	[m/s]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	27,9	Yes	1,01E-06	2,81E-07
SG Min Temperature (Fluid) 1	[°C]	26,2000	26,2000	26,1998	26,2000	28,6	Yes	1,05E-05	2,99E-06
SG Av Temperature (Fluid) 1	[°C]	36,0218	36,0181	36,0131	36,0225	100,0	Yes	7,53E-03	6,08E-02
SG Max Temperature (Fluid) 1	[°C]	48,7000	48,7000	48,7000	48,7000	100,0	Yes	0,00E+00	3,22E-06
SG Bulk Av Temperature (Fluid) 1	[°C]	40,6366	40,6314	40,6240	40,6366	100,0	Yes	1,07E-02	8,63E-02
SG Min Velocity 1	[m/s]	0,0006	0,0007	0,0003	0,0010	28,0	Yes	6,78E-05	1,90E-05
SG Av Velocity 1	[m/s]	0,0647	0,0647	0,0647	0,0647	100,0	Yes	9,14E-07	1,44E-06
SG Max Velocity 1	[m/s]	0,1181	0,1181	0,1180	0,1182	100,0	Yes	6,42E-05	7,52E-04
SG Bulk Av Velocity 1	[m/s]	0,0830	0,0830	0,0830	0,0830	100,0	Yes	1,27E-05	6,06E-05

Iterations: 317
Analysis interval: 40

A partir da segunda guia observa-se uma plotagem gráfica de acordo com o comportamento do projeto, figura 50.

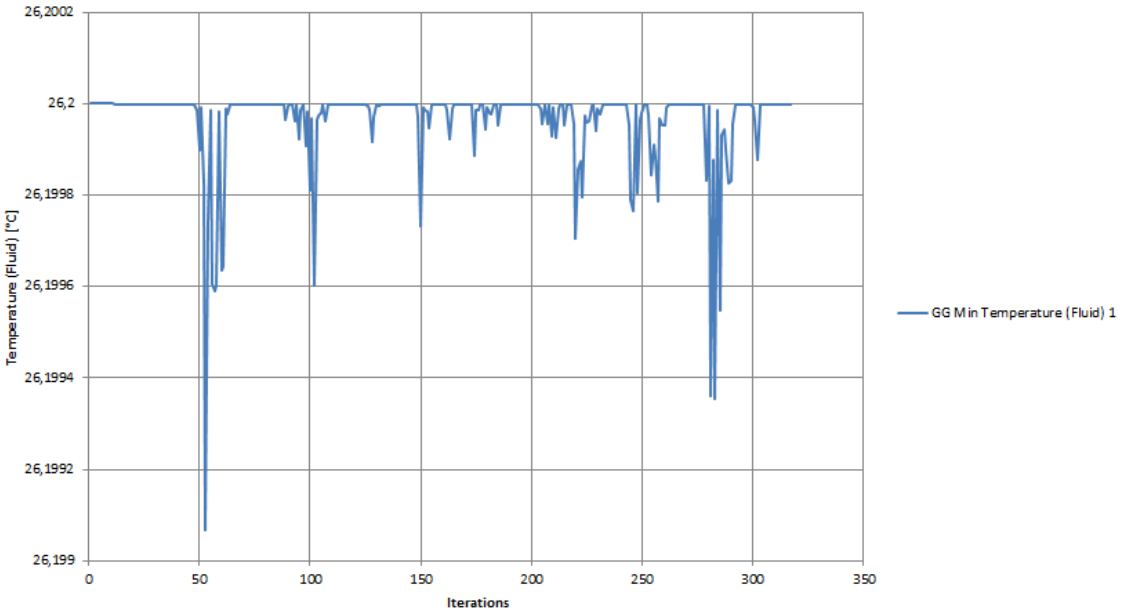


Figura 50: Gráfico criado pelo programa, relação de temperatura do fluido x Interações.

3.5 METODOLOGIA DE ANÁLIDE DE DADOS

Para análise dos resultados, será feita uma comparação dos dados obtidos no experimento prático com os resultados obtidos no simulador.

4 RESULTADOS

Neste tópico é apresentado o roteiro de cálculo utilizado no experimento prático e apresenta dados que foram utilizados para a configuração do simulador do trocador de calor e será feita uma comparação dos dados obtidos na prática e na simulação.

4.1 BASES DE CÁLCULO UTILIZADAS NO EXPERIMENTO PRÁTICO

Os objetivos exigidos no experimento prático foram:

a) estudar o fluxo concorrente e contracorrente no trocador de calor e indicar o mais eficiente;

b) fixar a vazão no casco;

c) variar vazões no tubo de cobre (três experimentos concorrentes e três contracorrentes);

d) fixar as temperaturas;

e) medir a vazão do tubo pela calha e massa por tempo.

Foi utilizado na obtenção dos resultados obtidos na tabela 2, juntamente com os dados de temperatura do trocador de calor funcionando nos ensaios concorrentes e contracorrentes e a vazão do fluido frio no sistema.

No cálculo da quantidade de calor trocada em um fluido, tem relação direta com o seu fluxo de massa, ao seu calor específico e à variação de temperatura. Esta quantidade de calor foi calculada através da equação 1, apresentada no item 2.2 página 26.

O calor fornecido e o recebido foram calculados pelas equações 2 e 3 apresentadas no item 2.2 página 26.

A equação 4, apresentada no item 2.2 página 27, foi utilizada para o cálculo da vazão mássica do fluido quente, conseguida através da calha de *Parshall* (altura do fluido na calha em mm). Nesse procedimento foi determinada a vazão pela altura da calha.

A equação 6, apresentada no item 2.2 página 27, foi empregada para se quantificar a vazão do fluido frio através de um recipiente de plástico com peso de 0,365 kg. O tempo foi obtido através de um cronômetro que foi utilizado na medição do tempo de enchimento do reservatório.

4.2 RESULTADOS DO EXPERIMENTO

Os resultados dos cálculos obtidos no experimento concorrente (temperaturas de entrada e saída do fluido quente e frio) e resultados calculados com o fluido quente (calha e recipiente), e vazão contínua do fluido frio obtida do rotâmetro (300 kg/h) e cálculo do seu fluxo de calor recebido estão na tabela 2.

Tabela 2: Dados obtidos nos experimentos do laboratório e dados obtidos através de cálculo.

Ensaio CC	Fluido Quente				Fluido Frio	Concorrente					
	Calha		Recipiente		Q=300 kg/h	Fluido Quente			Fluido Frio		
	Wc=m/t (kg/h)	Q=wc.c.DT(Kcal/h)	Wb=m/t (kg/h)	Q=Wb.cp.DT (Kcal/h)	Q=Wf.cp.DT(K cal/h)	Te (ºC)	Ts (ºC)	DT (ºC)	Te (ºC)	Ts (ºC)	DT (ºC)
1	191,6	1111,28	112,63	623,61	720	48,7	42,9	5,8	26,2	28,6	2,4
2	286,98	1403,75	209,77	966,18	930	49,7	44,8	4,9	26,2	29,3	3,1
3	805,18	2093,46	711,60	1713,08	1440	46,9	44,3	2,6	27,3	32,1	4,8
Ensaio CT	Fluido Quente				Fluido Frio	Contracorrente					
	Calha		Recipiente		Q=300 kg/h	Fluido Quente			Fluido Frio		
	Wc=m/t (kg/h)	Q=wc.c.DT(Kcal/h)	Wr=m/t (kg/h)	Q=Wr.cp.DT (Kcal/h)	Q=Wf.cp.DT(K cal/h)	Te (ºC)	Ts (ºC)	DT (ºC)	Te (ºC)	Ts (ºC)	DT (ºC)
1	191,6	555,64	93,68	271,62	870	49,3	43,0	6,3	26,4	29,3	2,9
2	286,98	1346,45	197,46	927,92	1410	50,5	45,5	5,0	26,2	30,9	4,7
3	805,18	5233,67	658,20	4278,3	1950	47,6	45,0	2,6	27,1	33,6	6,5

Observação: T_e é a temperatura de entrada do fluido e T_s é a temperatura de saída do fluido, o D_T é a diferença entre as duas temperaturas.

Analisando a diferença de temperaturas de cada um dos ensaios realizados percebe-se que há uma melhor troca térmica (variação de temperatura) no sistema contracorrente, provando que a troca térmica é mais eficiente do que no sistema concorrente.

Tabela 3: Dados obtidos através dos ensaios no laboratório e dados obtidos através de cálculo.

Ensaio CC	Calha - Concorrente (Kcal/h)			Recipiente - Concorrente (kcal/h)			altura na calha (mm)	Dados obtidos com o Recipiente			
	Q fornecido	Q recebido	Q final	Q fornecido	Q recebido	Q perdido		massa total (Kg)	tempo (h)	massa do liq. (Kg)	W (kg/h)
1	1111,28	720	391,28	623,61	720	-96,39	13	2,505	0,019	2,140	112,63
2	1403,75	930	473,75	966,18	930	36,18	20	3,094	0,013	2,727	209,77
3	2093,46	1440	653,46	1713,08	1440	273,08	42	3,923	0,005	3,558	711,60

Ensaio CT	Calha - Contracorrente (Kcal/h)			Recipiente - Contracorrente (kcal/h)			altura na calha (mm)	Dados obtidos com o Recipiente			
	Q fornecido	Q recebido	Q final	Q fornecido	Q recebido	Q perdido		massa total (Kg)	tempo (h)	massa do liq. (Kg)	W (kg/h)
1	555,64	870	314,36	271,62	870	598,38	13	2,145	0,019	1,780	93,68
2	1346,45	1410	63,55	927,92	1410	482,08	20	2,932	0,013	2,567	197,46
3	5233,67	1950	3283,67	4278,3	1950	2328,3	42	3,656	0,005	3,291	658,20

Observação: o experimento foi realizado a pressão de 1atm, ou seja, 101325 Pa ou 755 mmHg.

A calha de Parshall é um equipamento usado para a medição de vazão em canais abertos. Ela tem aplicação em indústrias, laboratórios, estações de tratamento de água e efluentes entre outras.

A tabela 4 apresenta valores resultantes dos coeficientes (vazão mássica) da calha de *Parshall* que foram obtidos através de ensaios feitos no laboratório de operações unitárias 2 da UNISANTA (PIMENTEL, 2013). Utilizando o modelo da tabela 4 obtêm-se os dados da calha apresentados na tabela 2. Os resultados do experimento prático estão apresentados na tabela 5.

Tabela 4: Determinação dos coeficientes da calha de *Parshall.*

Dados Experimentais			**Transformações**							
Massa do recipiente + água (g)	Tempo (s)	H (mm)	M (líquida) (kg)	Tempo (corrigido) (h)	W=m/t (kg/h)	Q= W/ρ (m^3/h)	ln Q	ln H	Q=W/ρ (l/h)	ln Q
4747	10,71	62	4,377	0,002975	1471,26	1,476	0,3893	4,1271	1476	7,2971
4201	10,58	57	3,831	0,002938	1303,95	1,308	0,2685	4,0430	1308	7,1762
4262	12,47	52	3,892	0,003463	1123,88	1,127	0,1196	3,9512	1127	7,0273
3950	13,75	47	3,580	0,003819	937,42	0,940	-0,0619	3,8501	940	7,8458
4539	18,61	42	4,162	0,005169	805,18	0,808	-0,2132	3,7377	808	6,6946
4186	19,81	37	3,815	0,005202	733,37	0,736	-0,3065	3,6109	736	6,6012
4299	24,05	32	3,929	0,006680	588,17	0,590	-0,5276	3,4657	590	6,3802
3963	29,61	27	3,593	0,008225	436,84	0,438	-0,826	3,2958	438	6,0822
4340	43,81	22	3,970	0,012169	326,24	0,327	-1,118	3,0910	327	5,7899
4290	62,21	17	3,920	0,017280	226,85	0,227	-1,483	2,8332	227	5,4249
4272	98,38	12	3,902	0,027327	182,79	0,183	-1,698	2,4849 **	183	5,2095 **
4132	164,21	7	3,762	0,045616	82,47	0,083	-2,489	-0,3567 **	83	4,4188 **

* $\rho H2O$ 0,25ºC = 996,95 kg/m^3

** Pontos descartados

Na tabela 5 está sendo apresentada a massa líquida obtida com a calha de *Parshall*.

Tabela 5: Dados de vazão da calha de *Parshall* obtidas no experimento

Calha de Pashall			
Altura na calha (mm)	**Tempo Corrigido (h)**	**M (líquida em kg)**	**W (kg/h)**
13	0,019	3,640	191,57
20	0,013	3,730	286,98
42	0,005	4,025	805,18

4.3 RESULTADOS OBTIDOS NO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

Os resultados obtidos da simulação 01 do experimento concorrente 01 são apresentados na tabela 6.

Tabela 6: Dados mínimos e máximos obtidos dos sensores da simulação do experimento 01 concorrente 01:

Nome	Mínimo	Máximo
Pressão [Pa]	100728.50	101573.78
Temperatura dos Fluidos [°C]	26.20	48.70
Densidade do Fluido [kg/m^3]	988.00	995.92
Velocidade [m/s]	0	0.339
Vorticitade [l/s]	0.005	105.667

O *Solidworks Flow Simulation* permite ao usuário configurar diversos tipos de sensores que no dispositivo real seria impraticável a utilização. No experimento em laboratório, foram utilizados apenas os sensores de calor (sensores de entrada e saída dos fluidos quente e frio). A seguir será apresentada uma breve explicação dos dados obtidos pelo *software* no experimento 01 concorrente – tabela 6:

A variação de pressão, em pascal, apresentada pelo *software* é a pressão de trabalho dentro do trocador de calor. Como o experimento foi realizado a 01 atm (101325Pa), nota-se que a variação na pressão é pequena com aproximadamente com uma variação de 845,20 Pa, causada pela circulação dos fluidos que causam a variação na pressão de trabalho (pressões máximas e mínimas).

As temperaturas mínimas e máximas do fluido apresentadas, são respectivamente as temperaturas de entrada do fluido frio (26,20ºC) e entrada do fluido quente (48,70ºC) do trocador de calor, elas foram obtidas através dos

indicadores de temperatura que indicam a temperatura obtida nos sensores do instalados no dispositivo.

A densidade do fluido (água) foi apresentada os valores mínimos e máximos atingidos, a variação de temperatura influi diretamente sobre a viscosidade de um fluido, por exemplo: a água a 20ºC apresenta uma viscosidade de 998,2 (kg/m3).

A velocidade do fluido apresentada dentro do trocador de calor, o motivo da velocidade mínima registrada na simulação ser de 0 m/s é que dentro da tubulação de acrílico houve a formação de vórtex que causava variação de velocidade do fluido, ou seja, a água circulando no centro do vortéx estava praticamente parada.

Na simulação foi detectada uma formação excessiva de vortéx no fluxo de fluido frio, devido a isso foi descoberto um erro na montagem da última chicana do trocador de calor, erro esse que deve ter ocorrido durante a montagem do trocador de calor, o que confirma que a simulação está funcionando corretamente.

A seguir são apresentados os dados obtidos nas simulações dos outros cinco experimentos, para que se possa realizar uma comparação dos dados em uma breve análise dos dados experimentais e também são apresentadas as simulações que foram realizadas do *software* das figuras 50 até a figura 55.

Os resultados obtidos da simulação 02 do experimento concorrente 02 são apresentados na tabela 07. Os da simulação 03 na tabela 08.

Tabela 7: Dados mínimos e máximos obtidos dos sensores da simulação do experimento 02 concorrente 02

Nome	Mínimo	Máximo
Pressão [Pa]	100728.50	101573.68
Temperatura dos Fluidos [°C]	26.20	49.70
Densidade do Fluido [kg/m^3]	987.58	995.92
Velocidade [m/s]	0	0.226
Vorticitade [l/s]	0.007	83.295

Tabela 8: Dados mínimos e máximos obtidos dos sensores da simulação do experimento 03 concorrentes 03

Nome	Mínimo	Máximo
Pressão [Pa]	100728.50	101671.68
Temperatura dos Fluidos [°C]	26.20	46.90
Densidade do Fluido [kg/m^3]	988.75	995.92
Velocidade [m/s]	0	0.695
Vorticitade [l/s]	0.007	128.033

Nas tabelas 09, 10, 11 são formados os valores concernentes às simulações para a operação em contracorrente.

Tabela 9: Dados mínimos e máximos obtidos dos sensores da simulação do experimento 04 contracorrentes 01

Nome	Mínimo	Máximo
Pressão [Pa]	100728.50	101573.76
Temperatura dos Fluidos [°C]	26.20	49.30
Densidade do Fluido [kg/m^3]	987.75	995.92
Velocidade [m/s]	0	0.123
Vorticitade [l/s]	0.005	156.701

Tabela 10: Dados mínimos e máximos obtidos dos sensores da simulação do experimento 05 contracorrentes 02

Nome	Mínimo	Máximo
Pressão [Pa]	100728.50	101573.77
Temperatura dos Fluidos [°C]	26.20	50.50
Densidade do Fluido [kg/m^3]	987.24	995.92
Velocidade [m/s]	0	0.219
Vorticitade [l/s]	0.006	85.376

Tabela 11: Dados mínimos e máximos obtidos dos sensores da simulação do experimento 06 contracorrentes 03

Nome	Mínimo	Máximo
Pressão [Pa]	100728.50	101656.74
Temperatura dos Fluidos [°C]	26.20	47.60
Densidade do Fluido [kg/m^3]	988.46	995.92
Velocidade [m/s]	0	0.669
Vorticitade [l/s]	0.004	125.861

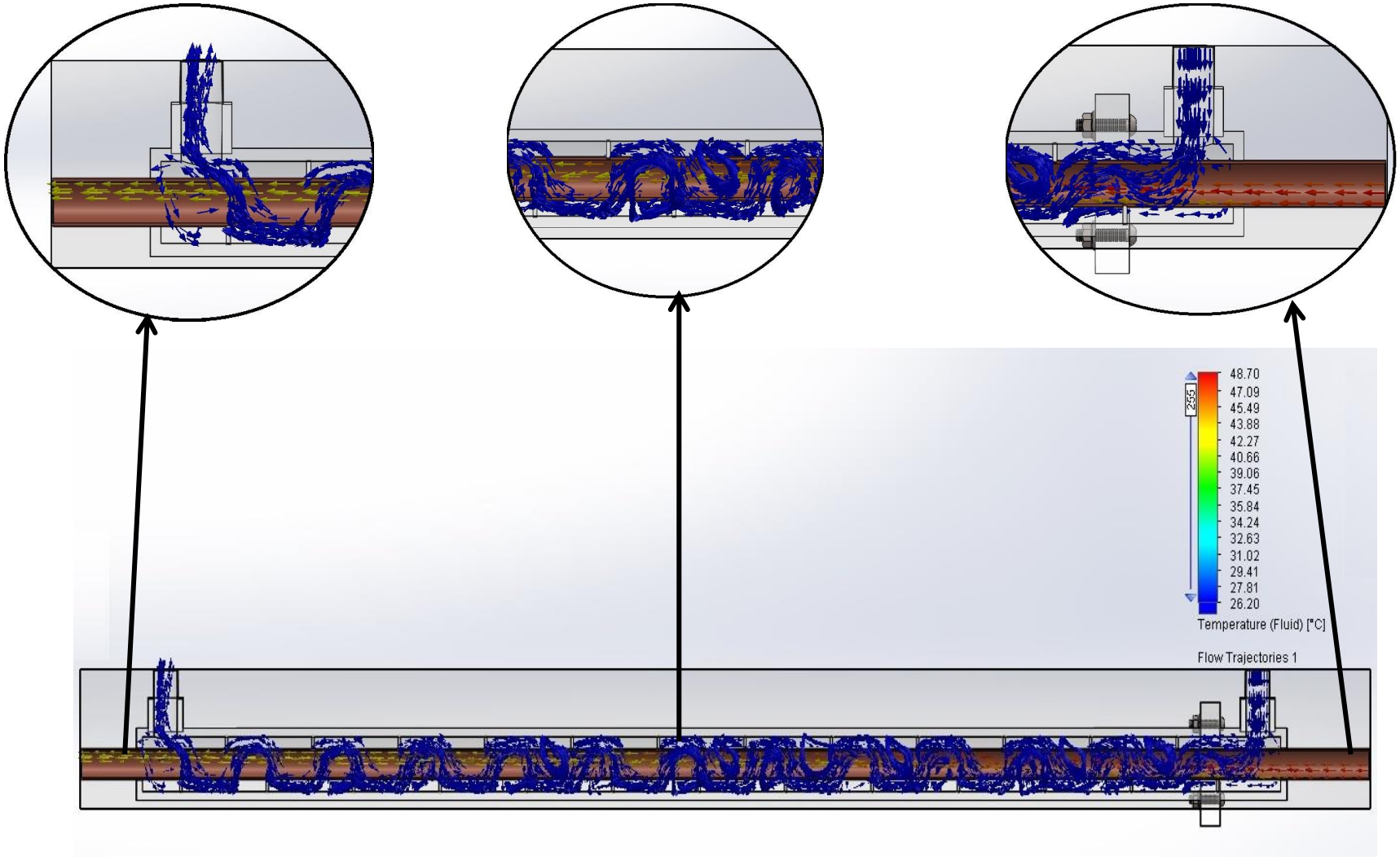


Figura 50: Simulação nº 01 - Ensaio Concorrente 01: Simulação do fluido com a variação de temperatura e visualização com zoom.

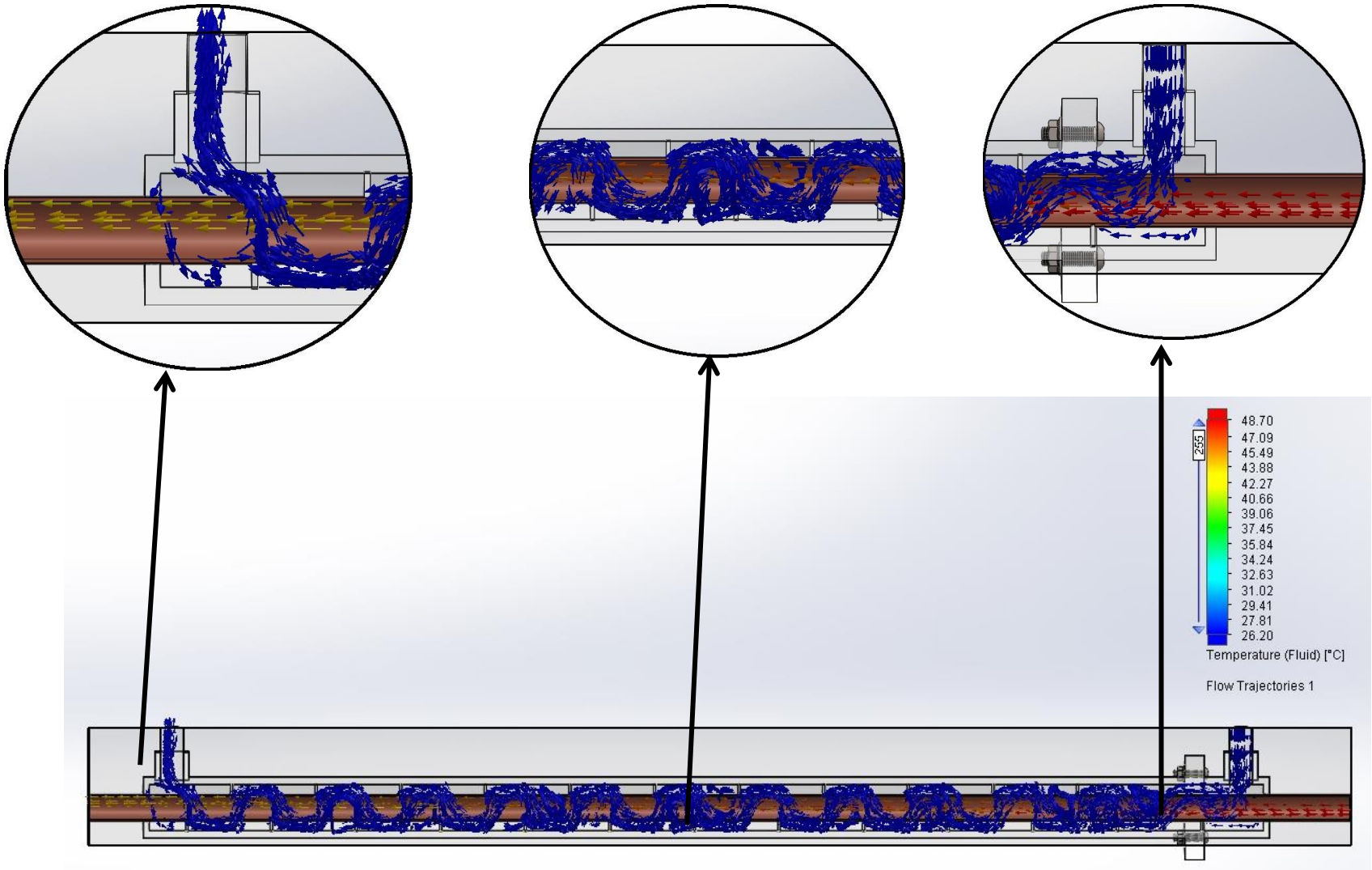


Figura 51: Simulação nº 02- Ensaio Concorrente 02: Simulação do fluido com a variação de temperatura e visualização com zoom.

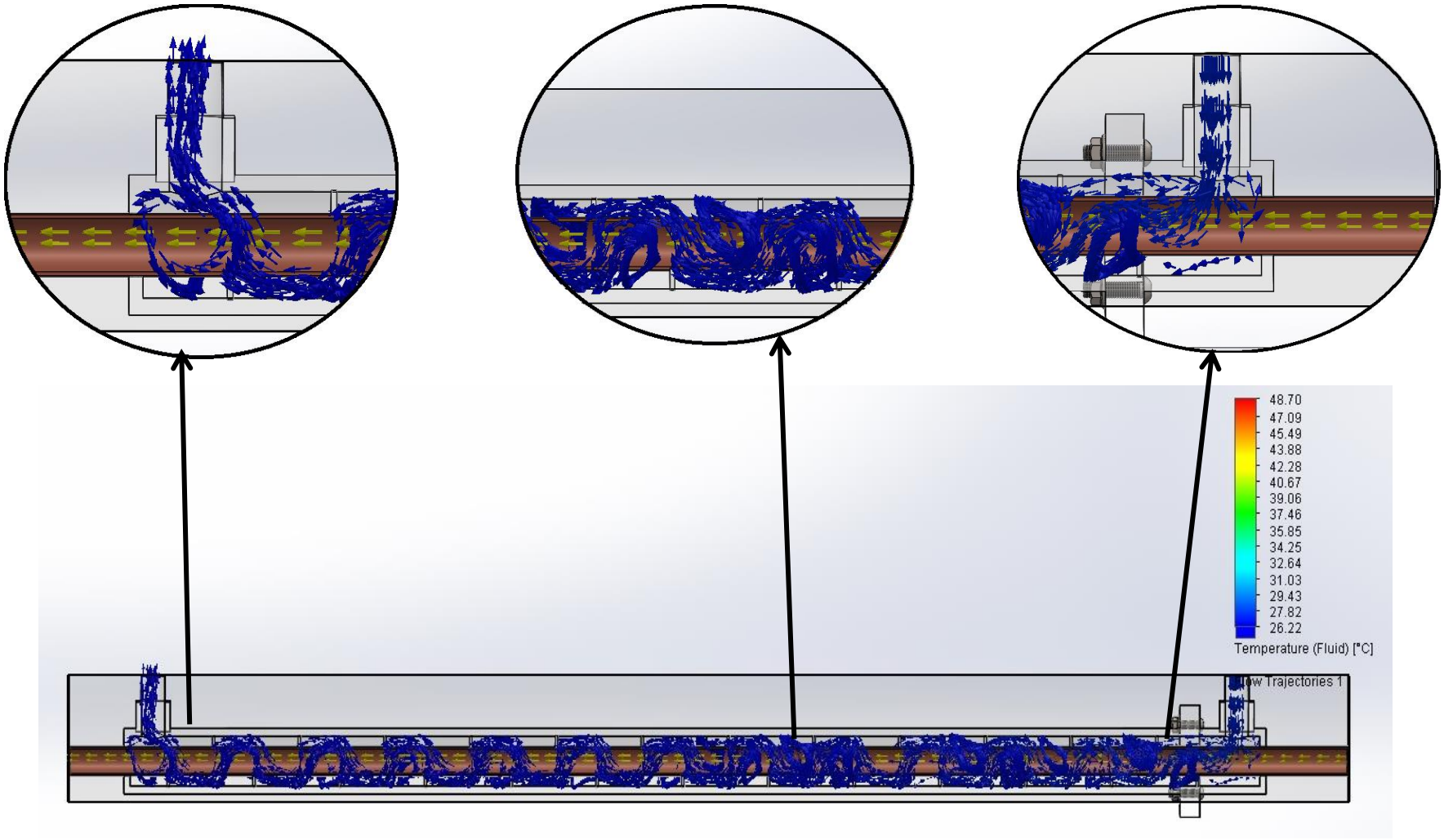


Figura 52: Simulação nº 03- Ensaio Concorrente 03: Simulação do fluido com a variação de temperatura e visualização com zoom.

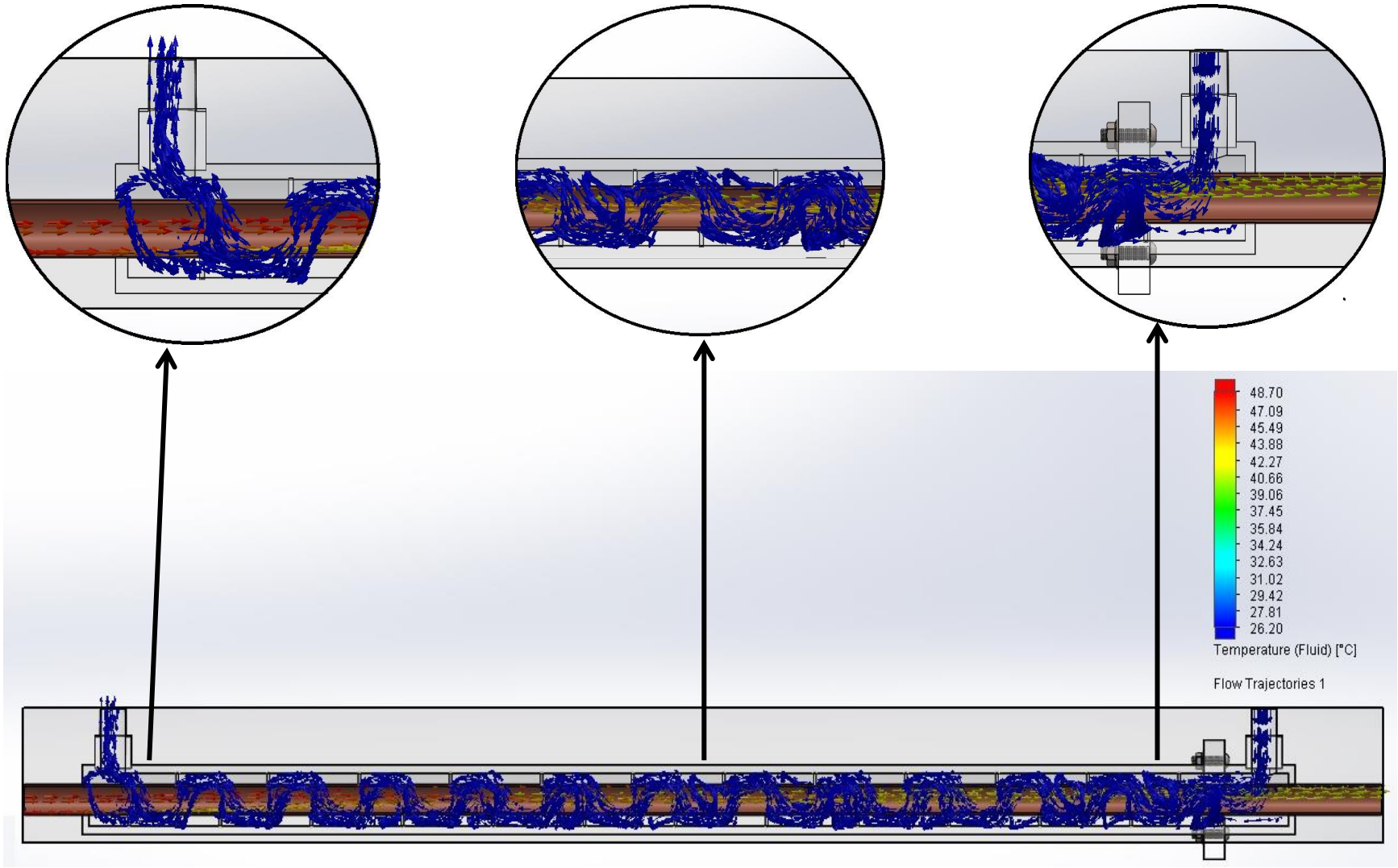


Figura 53: Simulação nº 04- Ensaio Contracorrente 01: Simulação do fluido com a variação de temperatura e visualização com zoom.

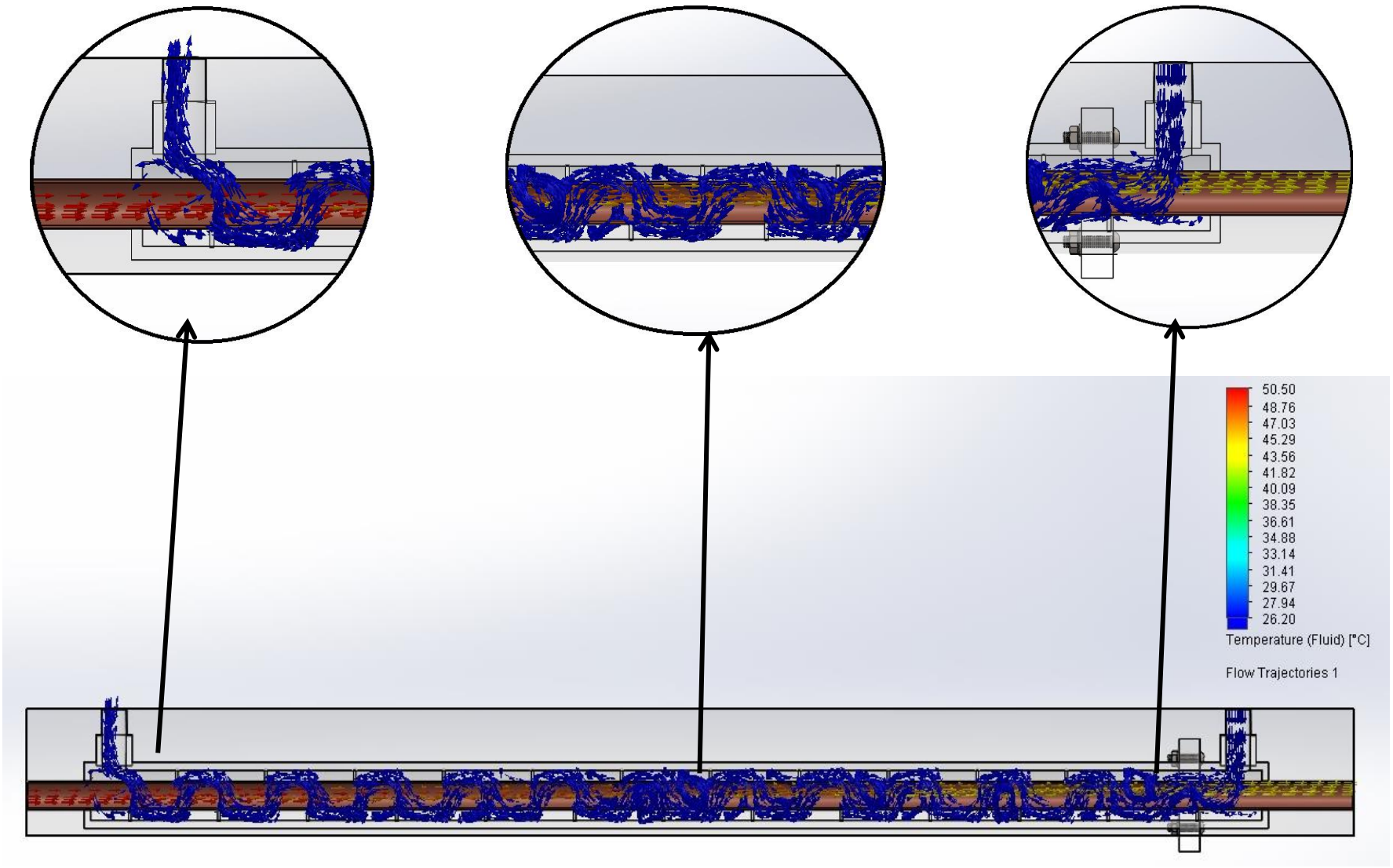


Figura 54: Simulação nº 05- Ensaio Contracorrente 02: Simulação do fluido com a variação de temperatura e simulação com zoom.

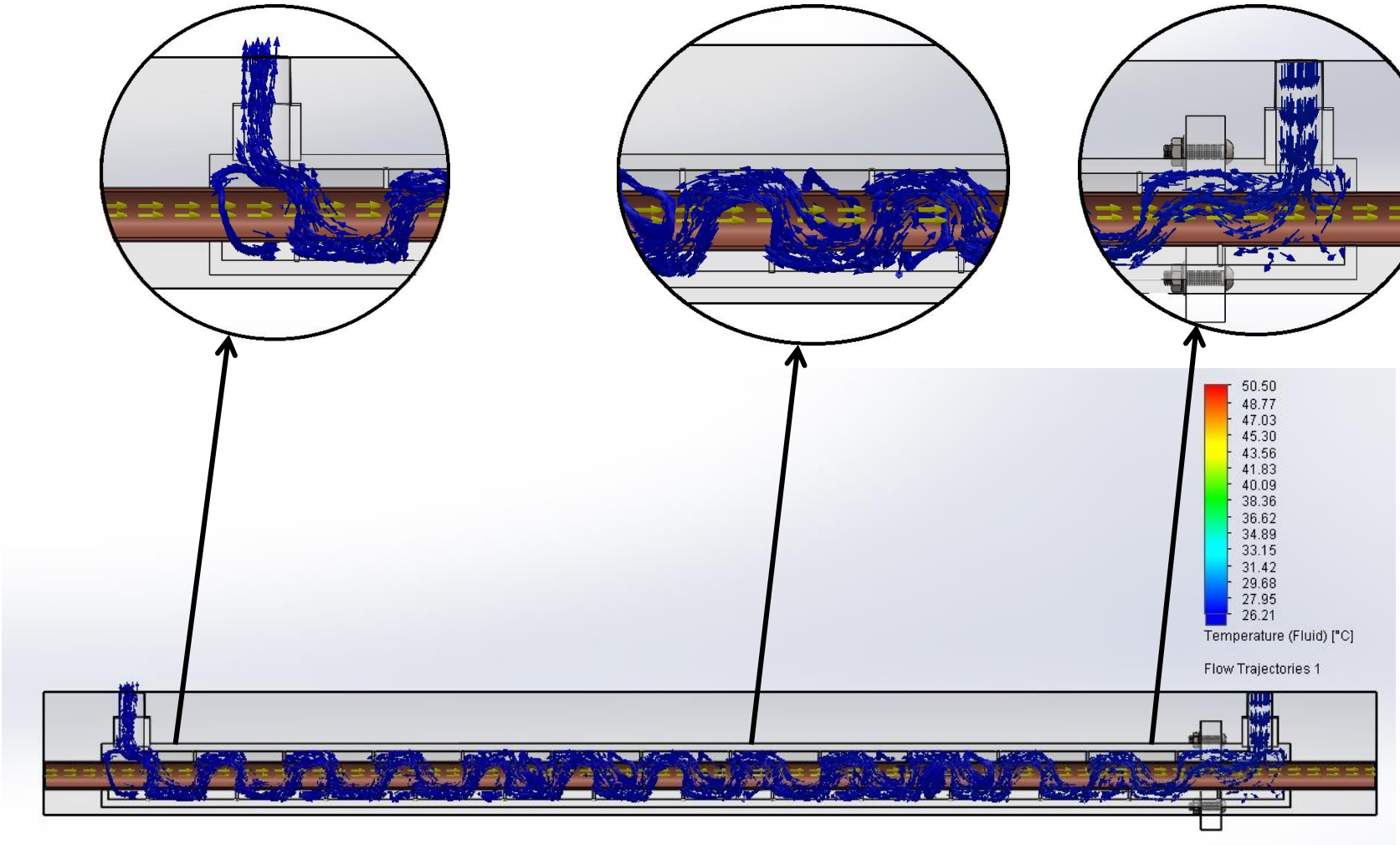


Figura 55: Simulação nº 06 – Ensaio Contracorrente 03: Simulação do fluido com a variação de temperatura e simulação com zoom.

4.4 ANÁLISES DOS RESULTADOS PRÁTICOS E TEÓRICO

Em síntese, os dados de entrada e saída da temperatura dos experimentos práticos e observando as simulações gráficas de cada experimento conclui-se que a melhor troca térmica é realizada no sistema contracorrente.

Também se percebe que através da simulação, dados apresentados nas tabelas que a formação de vórtex (é o movimento rápido e forte de um fluido envolta de um espiral) no trocador de calor está relacionada com a vazão do fluido frio como demonstradas nas simulações: concorrente 02, apresentado na tabela 5 da página 63 e na figura 51, na página 67 e contracorrente 02, apresentado na tabela 8, da página 65 e figura 54, na página 70 , ou seja, a causa foi uma chicana que está na posição errada na extremidade do trocador, causando uma diferença de pressão na saída do fluido frio e causando a formação de vórtex. Também demonstra que a simulação está correta.

Nota-se também que em todas nos resultados das simulações há uma variação muito pequena na pressão dentro do trocador de calor, em relação à pressão atmosférica. Também que há uma pequena variação da densidade do fluido (água) no trocador por causa da diferença de temperaturas dentro do trocador.

A vantagem da utilização da simulação é poder obter dados diversos como velocidade, temperatura, pressão, efeito da formação de vórtex, densidade do fluido, conforme o tipo de sensor escolhido, sem a necessidade da utilização de diversos sensores diferentes que inviabilizaria o uso no trocador de calor real do estudo.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve por objetivo integrar o uso de *software* de simulação 3D com os dados experimentais de um trocador de calor de tubo duplo. Através desse desenvolvimento, observou-se que é possível fazer diversos testes de simulação alterando, por exemplo, os materiais que compõem o dispositivo, escolhendo assim os melhores componentes. Com a simulação se eliminam os altos custos da criação de vários protótipos. Há possibilidade de se fazer experimentos com as simulações sem alterar o equipamento real, através dessa análise pode-se melhorar o projeto original e verificar o funcionamento antes mesmo de confeccionar um novo dispositivo. Lembrando que o programa não substitui de forma integral o equipamento real. Assim sendo, conclui-se que o uso da tecnologia de *software* de simulação como ferramenta pode melhorar o estudo de um dispositivo hidráulico e também serve para melhorar a compreensão do funcionamento do trocador como foi demonstrado no estudo.

Somente com o desenvolvimento desses *softwares* de modelagem 3D e o seu uso na simulação de fluidos pode-se desenvolver novas ideias e pesquisas para criar novas soluções para o seu emprego na indústria.

A análise constatou-se que o trocador de calor analisado deve aprimorar o seu projeto e também a melhoria de alguns procedimentos de montagem do dispositivo:

a) Criar os meios para evitar a entrada de bolhas de ar que acabam atrapalhando a troca térmica, observadas durante os experimentos práticos.
b) Foi detectado também através do experimento prático (notou-se através das bolhas de ar) e na simulação a formação de vórtex (movimento rápido e forte de um fluido envolta de um espiral) dentro do trocador de calor, ocasionada pela montagem errada de uma chicana na saída do fluido frio, portanto pode-se evitar esse tipo de erro criando um guia de procedimentos de montagem e desmontagem do dispositivo.

Foi demonstrado que se podem empregar recursos de simulação juntamente com os dados obtidos em experimentos no laboratório, além de reforçar a aprendizagem também traz novos recursos ao ambiente de ensino, possibilitando também o emprego da interação de aulas práticas com teóricas. Melhorando assim o entendimento dos alunos durante as aulas de engenharia.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Pode ser feito estudos com a simulação, variando a escala do projeto, ou seja, as dimensões lineares do trocador de calor ou simulando com dispositivos que provocam o aumento da turbulência dentro do trocador (utilização de misturadores estáticos dentro da tubulação de cobre que provocam uma maior turbulência no fluxo de fluido quente) para o aumento da eficiência do trocador de calor.

Também como sugestão para trabalhos futuros pode-se fazer simulações com outros modelos de trocadores de calor, como por exemplo, um trocador de calor tipo placa, ou ainda um modelo industrial de casco tubo que utilize vapor para aquecimento de outro fluido. Ainda pode-se sugerir o estudo de particulados em sistemas de filtragem, medidor venture, tubo de *pitot*, medição de fluxo em tubulações, ou ainda a análise de dispositivos aerodinâmicos, podendo citar: túnel de vento - estudo de perfis de asa de aeromodelos/aviões, análise do funcionamento de um *cooler* de computador e projeto de *design* de ventilação interna de gabinete para PC com *coolers*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros:

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

ÇENGEL, A. Y.; GHAJAR, A. J**.Transferência de calor e massa**. 4° ed. Editora McGraw-Hill, 2012

Fialho, A. B.***Solidworks*** **Premium 2012**. Editora Érica, 2013

INCROPERA F. P.; DEWITT. D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: 4. ed. Livros técnicas e Científicos Editora S.A, 1998.

KERN, D**.** ***Processos de transmissão de calor****, Trad. Nicolás Ambossi, 31º Ed., México, Celsa, 1999.*

MUKHERJEE, R. **Does you application call for an f-shell heat exchager?** Chem. Eng. Prog., v100, p. 40-54, 1998.

PIMENTEL, R.L.S.; NASCIMENTO, F.B; SANTOS, A.R.; MORAES JR., D**. Avaliação do desempenho de uma unidade experimental de resfriamento de água.** Anais do 2º EPG – Encontro de Pós-Graduação da UNISANTA, pag.102-106, 2013

PERRY, R. H&GREEN, D. W**.** ***Perry's Chemical Engineers' Handbook****, 8º Ed, Kansas, McGraw-Hill, 2007.*

PEREIRA, F. N. *Apostila:* **Projetos Trocadores de Calor**. Unisanta - Pós Graduação, 2011.

REIS, Carlos V., **Curso de formação de Operadores de Refinaria:** Equipamentos Estáticos. Curitiba. Centro Universitário da Positivo, 2002. 27f.

SHAH, RAMESH K .; SEKULIC ,DUSAN P. **Fundamentals of heat exchanger design**. Published by John Wiley & Sons Inc., 2003

TIMMERHAUS, Klaus D.; Reed, Richard P. **Cryogenic Engineering Fifty Years of Progress.** Springer, 2007.

Tutoriais:

3DS*Solidworks*. **Desenhos do *Solidworks* 2012 Tutorial**, 2011.

3DS *Solidworks*. ***Flow Simulation* 2012 Tutorial**, 2011.

Referência on-line:

GODOY. S. M**. Eficiência térmica de trocadores de calor compactos através de simulação numérica**. 2008. Dissertação de mestrado. Disponível em: www.teses.usp.br/teses/Dissertacao. *Acesso em 21/07/2014.*

Grimm, A. M., **Mecanismos de transferência de calor**. Disponível em: http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-9.html. Acesso em 30/04/2015

LIENHARD, J. H**.A Heat Transfer Textbook. 3**. ed. Cambridge, Massachusetts, U.S.A.: Phlogiston Press, 2003. Eletronic Book. Disponível em http://web.mit.edu-/lienhard/www/ahtt.html. Acesso em 03/05/2014

APÊNDICE I – GUIA PARA A MODELAGEM DO TROCADOR DE CALOR

A1.0 – MODELAGEM

O primeiro passo antes de começar a modelar foi analisado o dispositivo, medi-lo e criar um esboço de todo o trocador de calor, figura a.1, para depois reproduzi-lo no *Solidworks*.

Figura a.1: Foto do trocador de calor usado na experiência e análise de simulação

Com todos os dados necessários disponíveis, utilizou-se o *software Solidworks* 2014 para a modelagem e posterior simulação no complemento *Flow Simulation*.

A seguir é explicado o passo a passo, de como foi modelado cada peça que compõem o trocador de calor e sua montagem no *Solidworks*.

A1.1 MODELAGEM DO CASCO EXTERNO DE ACRÍLICO

A primeira peça modelada é o casco externo do trocador de calor, com as medidas do casco figura a.2. Antes de começar a modelagem o ideal foi criado uma pasta onde ficaram todos os arquivos para a montagem.

Foi criada assim uma pasta com o nome de Ensaio com Trocador de Calor, dentro desta pasta criou-se mais duas pastas, um chamado Trocador concorrente e outra com o nome de Trocador contracorrente.

Dentro de cada uma delas designam-se mais duas pastas com o nome de Componentes e Montagem. Foi aberto o *Solidworks* 2014 e explicar cada uma das etapas de modelagem do casco externo.

Figura a.2: Medidas utilizadas para a modelagem do casco externo.

Indo ao *menu* Arquivo e clicou em novo tem-se três opções para trabalhar:

Peça – Para criar uma peça a partir de dados que se possui;

Montagem – Quando se vai montar um conjunto de peças;

Desenho – Quando se deve criar um desenho 2D a partir da peça ou montagem em 3D, para fabricação, também permite a criação de planos de trabalho personalizados com os tamanhos de papel conforme as normas escolhidas.

Conforme os passos a seguir foram criados uma peça do trocador de calor selecionou a opção peça e dê OK, conforme a figura a.3.

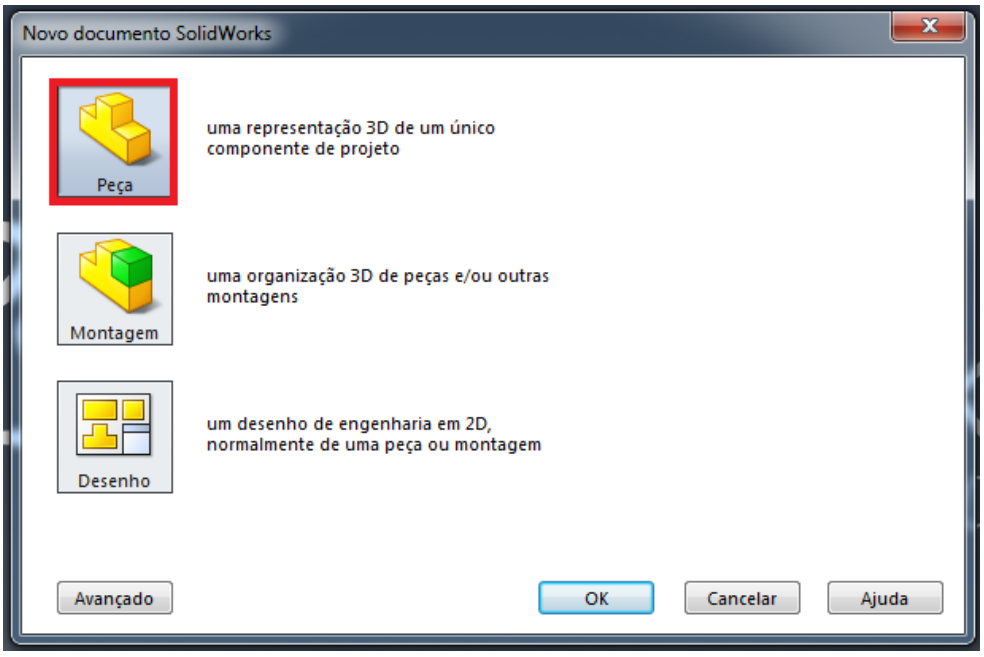


Figura a.3: Janela de opções de criação de documentos no Solidworks

A primeira etapa foi selecionar o plano de referência em que foi trabalhado se elege com o botão direito do mouse o plano frontal e clica-se no botão esboço. Conforme a figura a.4.

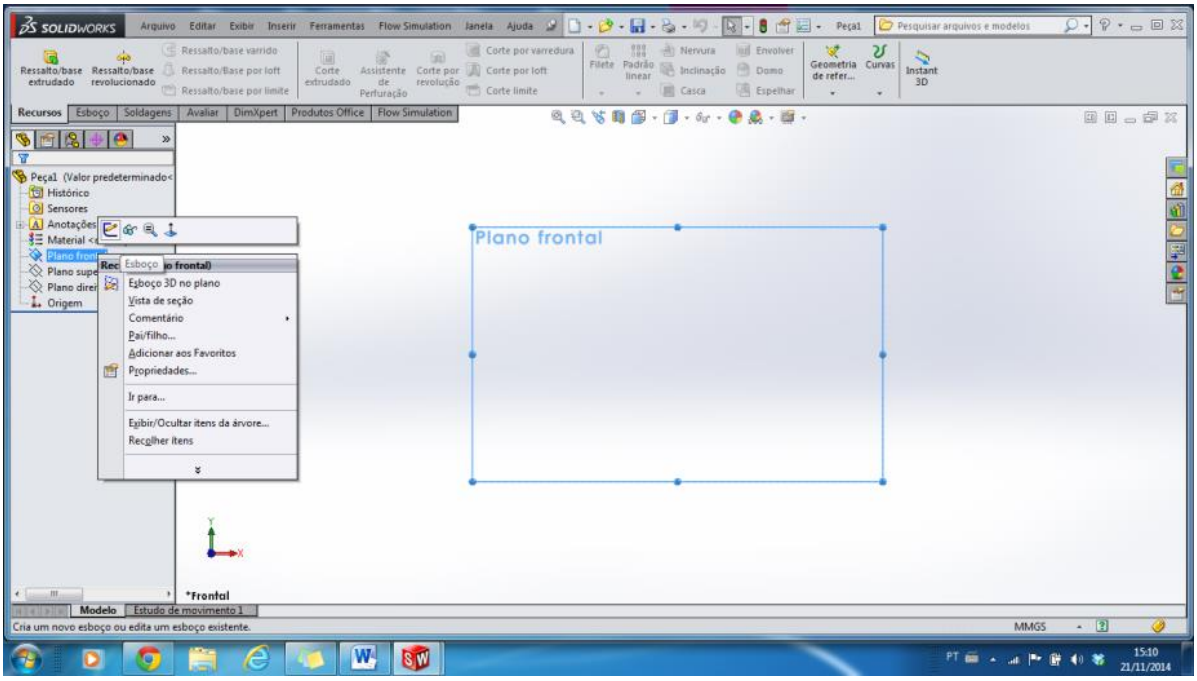


Figura a.4: Comando esboço para ativar o plano frontal para confeccionar a peça.

A guia Esboço ficou habilitada, utilizou-se a opção círculo e deu um clique na origem para que o círculo fique fixado, com o comando Dimensão Inteligente, foi inserido a medida de 50 mm de diâmetro ao círculo, conforme a figura a.5.

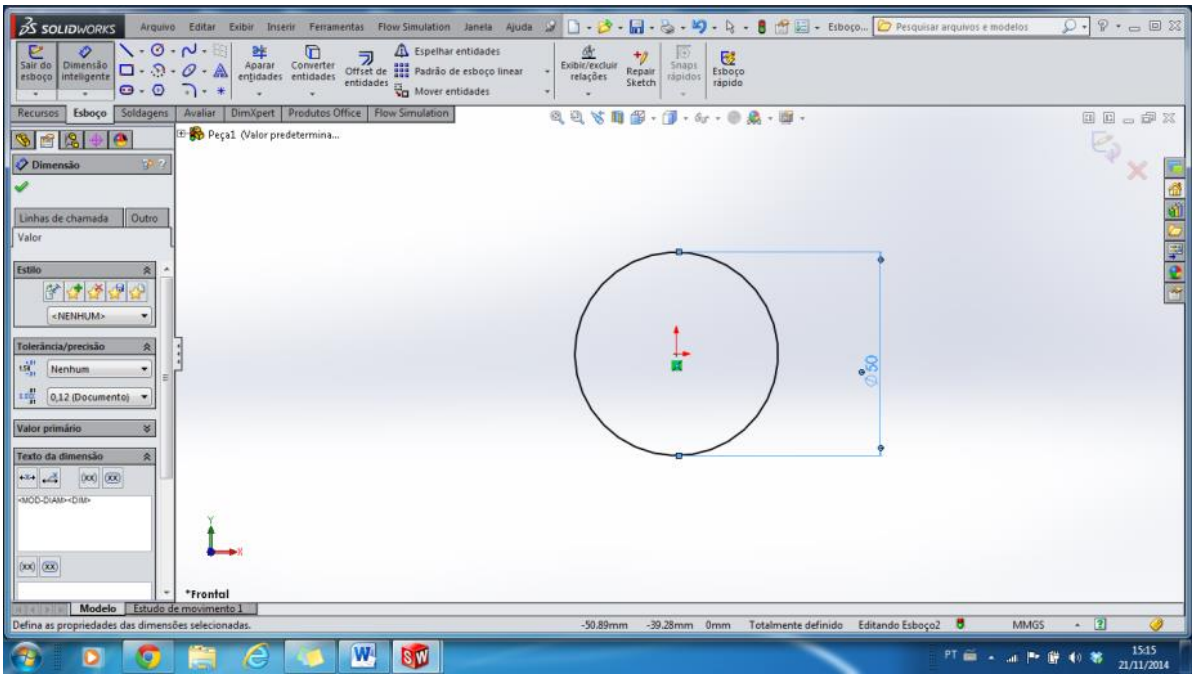


Figura a.5: Círculo feito na origem e utilização da ferramenta Dimensão Inteligente

Utilizou-se o comando Offset de Entidades, clicando no círculo para criar outro círculo com 6 mm de distância e habilitando inverter para que o círculo fique interno ao anterior e dê Ok. Como demonstrado na figura a.6.

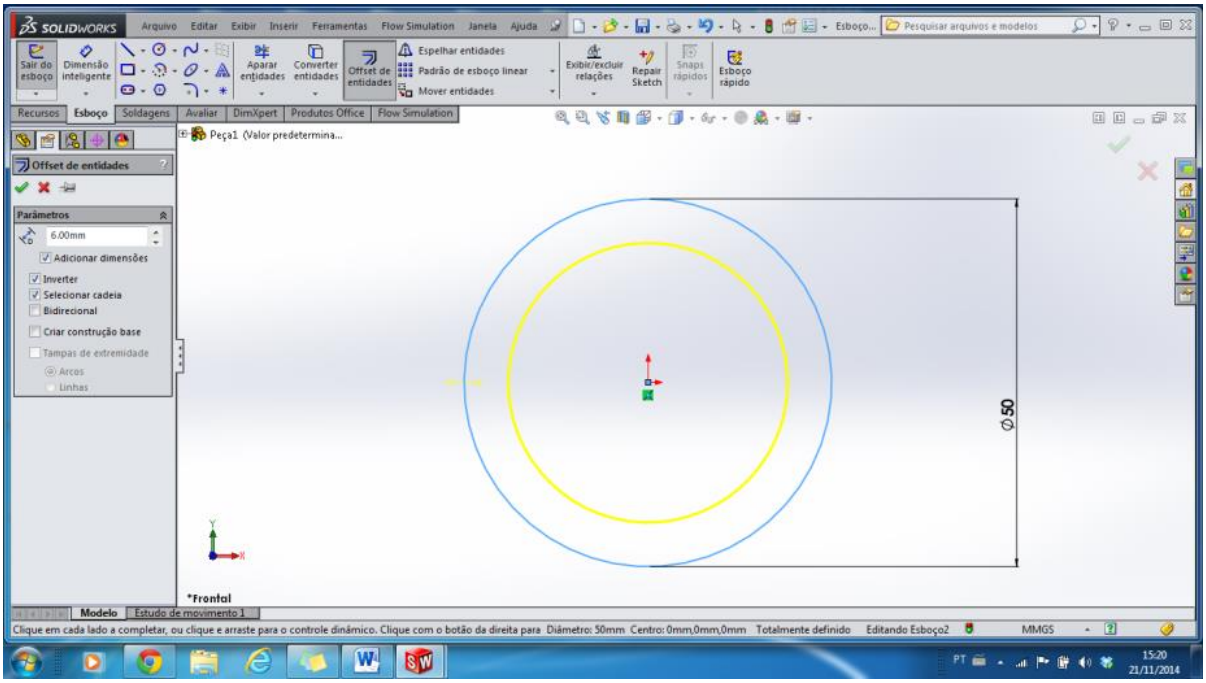


Figura a.6: Criação de outro círculo utilizando o comando Offset de Entidades.

Se direcionando a guia Recursos e foi à opção Ressalto/Base Extrudado e em D1 e digite o valor de 922 mm de profundidade da peça, conforme figura a.7, finalizando o comando dando OK.

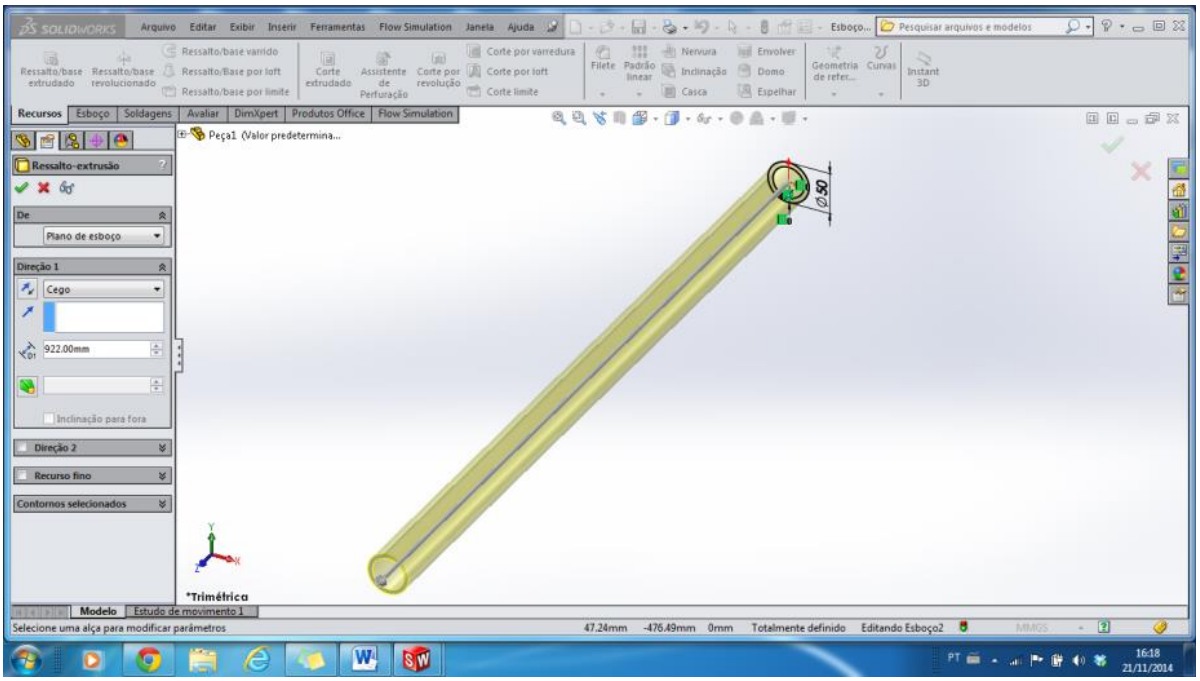


Figura a.7: Extrusão da peça em 2D, dando sua profundidade em 3D.

O próximo passo ficou em criar um plano, continuando na guia Recursos e clique em Geometria de referência e em seguida a opção plana, na primeira referência clique no plano frontal, e em distância de offset digite o valor de 57 mm e dê OK, conforme a figura a.8.

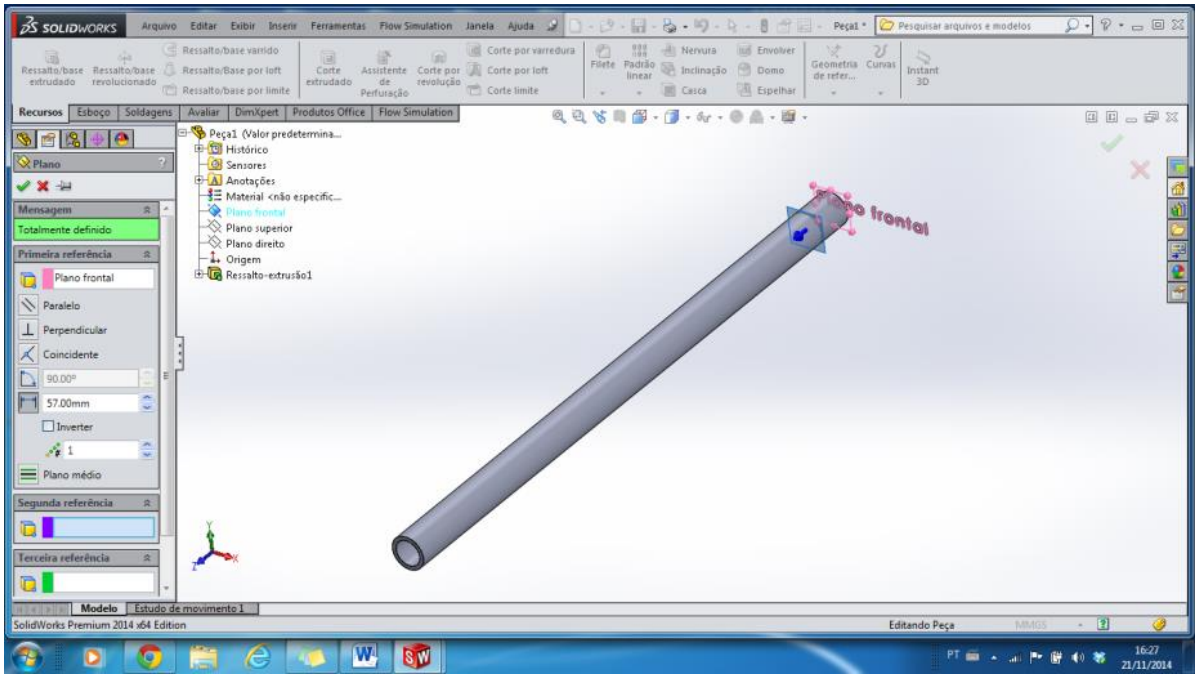


Figura a.8: Criando um plano paralelo ao plano frontal

Clicou-se no o botão direito do mouse sobre o plano 1 e seleciona-se o botão esboço e em orientação de vista clicou-se no comando normal a, escolheu-se o comando círculo, e clicou-se na origem e clique na borda externa do tubo do trocador de calor e fez outro círculo a partir da origem e com dimensão inteligente dê o diâmetro de 85 mm. Conforme a figura a.9.

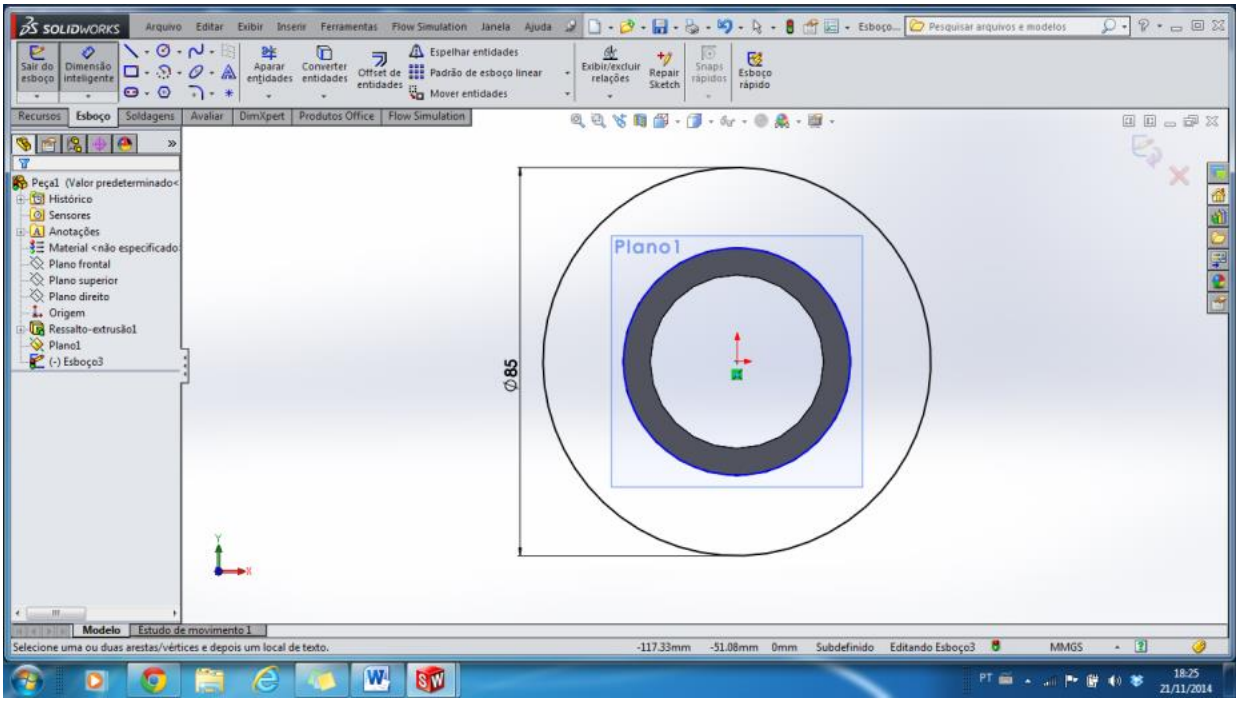


Figura a.9: Círculos feitos na tubulação do trocador de calor, na parte externa do tubo (em azul) e de 85 mm de diâmetro.

Estando na guia Recursos e foi na opção de comando Ressalto/Base Extrudado, mudou a opção: cego para plano médio e em D1 digitou a profundidade de 65 mm, conforme a figura a.10. Dê ok para finalizar.

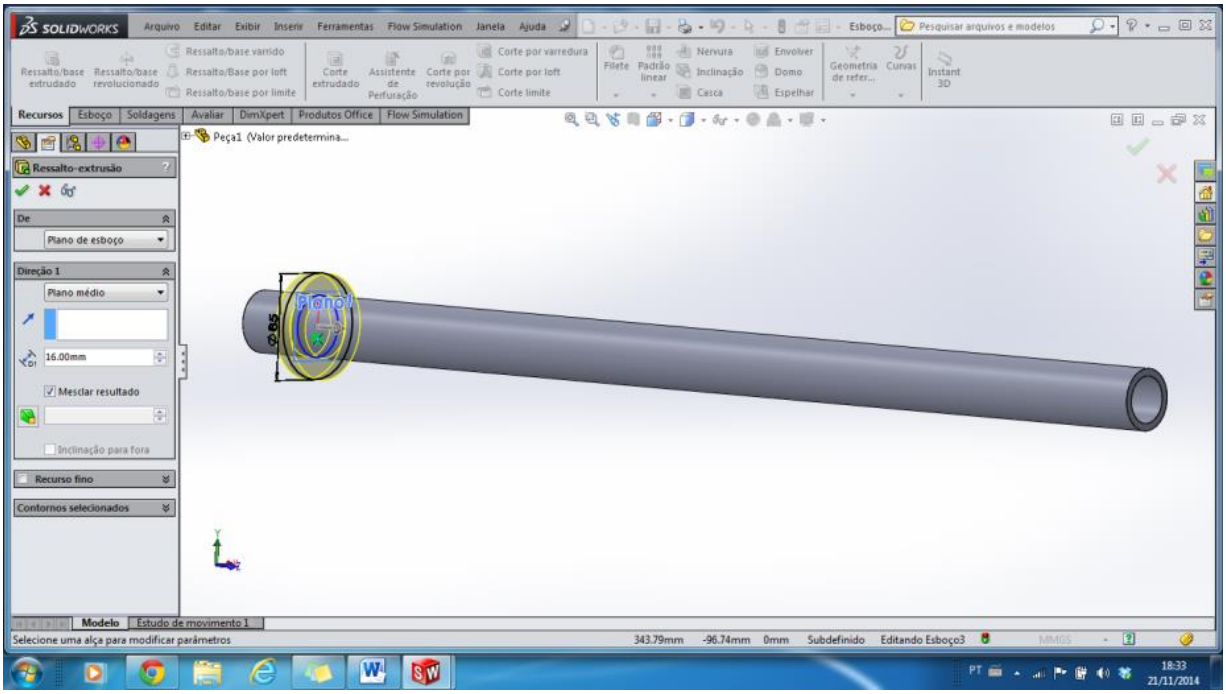


Figura a.10: Extrusão dos círculos feitos no plano1 com 16 mm de profundidade no plano médio.

Com o botão direito do mouse selecionou-se na face onde se acabou de extrusar. Com o comando círculo desenhou quatro círculos e depois com o comando Dimensão Inteligente inseriu as medidas conforme o modelo da figura a.11.

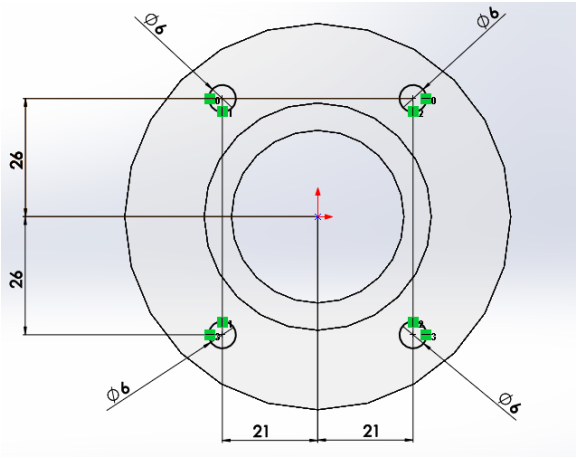


Figura a.11: Posicionamentos dos círculos para fazer os furos aonde irão os parafusos.

Selecionou a guia Recursos e na opção Corte Extrudado, na janela mudou-se a opção de cego para até o próximo, com isso o programa fez um corte até a próxima parede, conforme a figura a.12. Às vezes é pedido pelo programa para selecionar os contornos para realizar a tarefa, foram escolhidos os quatro círculos e se confirma o comando com um OK.

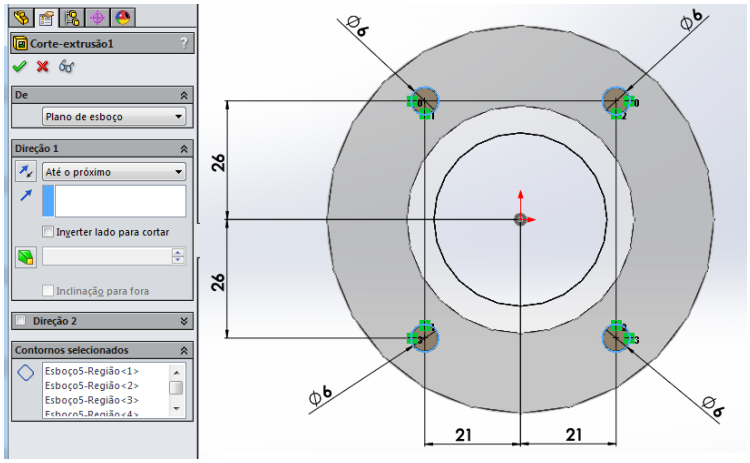


Figura a.12: Corte extrusado dos círculos na peça.

O próximo passo foi ativar os eixos temporários, clicou-se em menu Exibir – Eixos temporários. O eixo temporário serve como referência para vários comandos, como exemplo o padrão linear, retângulo central, etc.

Escolheu-se o plano superior com o botão direito do mouse e habilita-se o comando esboço. Utilizou-se o comando retângulo central (clicou na seta ao lado do botão retângulo). Fez um retângulo central em cada uma das extremidades do trocador de calor e colocou as distâncias conforme a figura a.13.

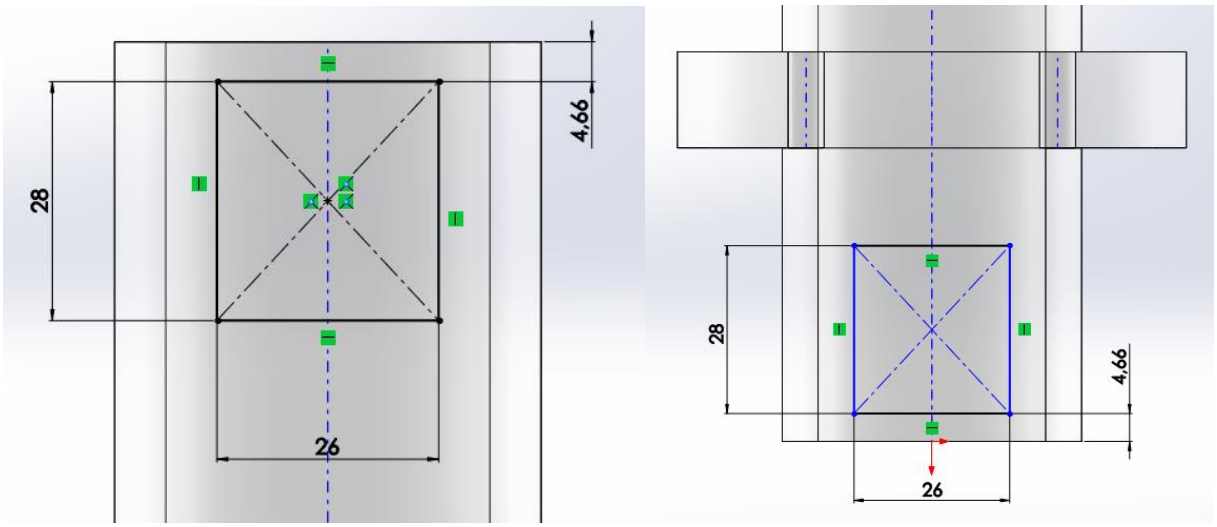


Figura a.13: Extremidades do trocador de calor com o esboço no plano superior e suas dimensões e distâncias.

Direcionou-se para guia Recursos – Ressalto/Base Extrudado e extrusou com 45 mm na direção 1, conforme a figura a.14.

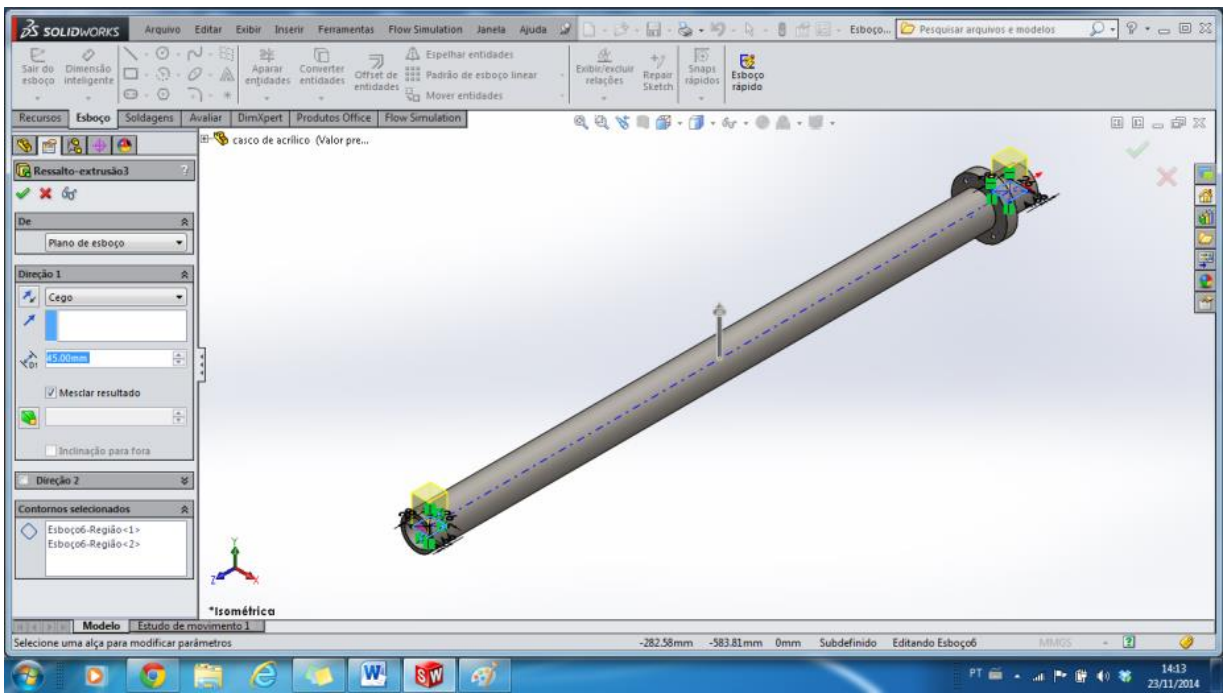


Figura a.14: Extrusão da base quadrada do trocador de calor.

Repare que na figura a.15 que a extrusão a partir do plano superior pega o furo interno do tubo. Observação: O *Solidworks* não consegue esboçar, e aplicar recursos diretamente sobre superfícies cilíndricas.

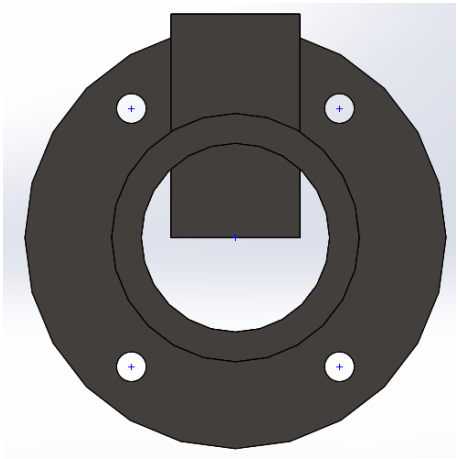


Figura a.15: Vista frontal mostrando que a extrusão partiu do plano superior e ultrapassou o casco do trocador de calor

O próximo procedimento clicou com o botão direito do mouse sobre um dos retângulos que fora extrusado e utilizou o comando esboço, criou-se uma linha de centro pegando de uma extremidade a outra de cada um dos retângulos, desenhou-se um círculo sobre cada um deles pegando o meio da linha como referência, conforme demonstrado na figura a.16.

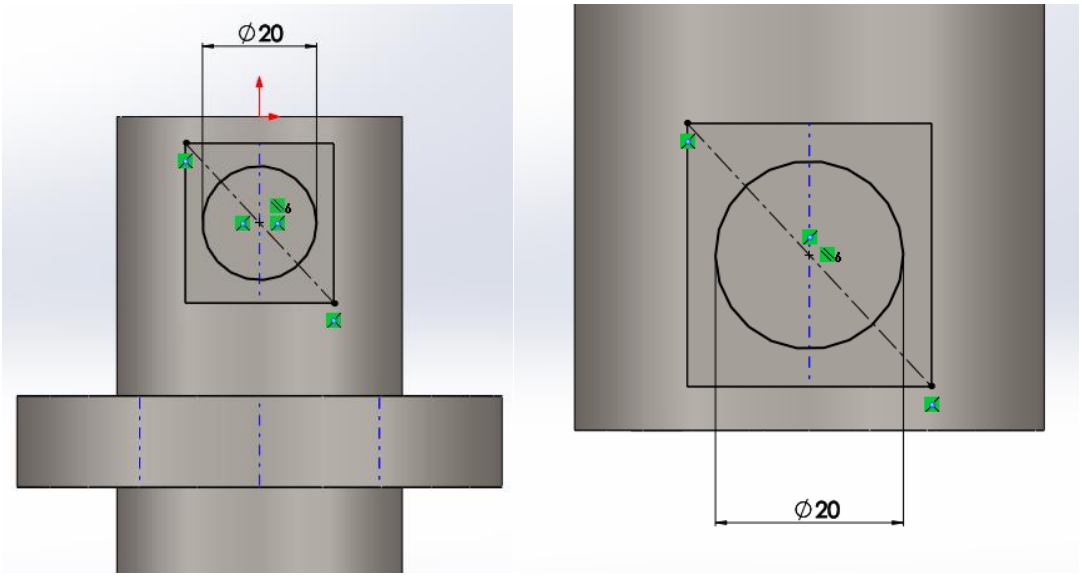


Figura a.16: Esboço das linhas de construção e do círculo com diâmetro de 20 milímetros.

Foi novamente na guia Recursos Ressalto/Base Extrudado e se extrusou os dois círculos com a profundidade D1 de 20 mm. Conforme a figura a.17 demonstra.

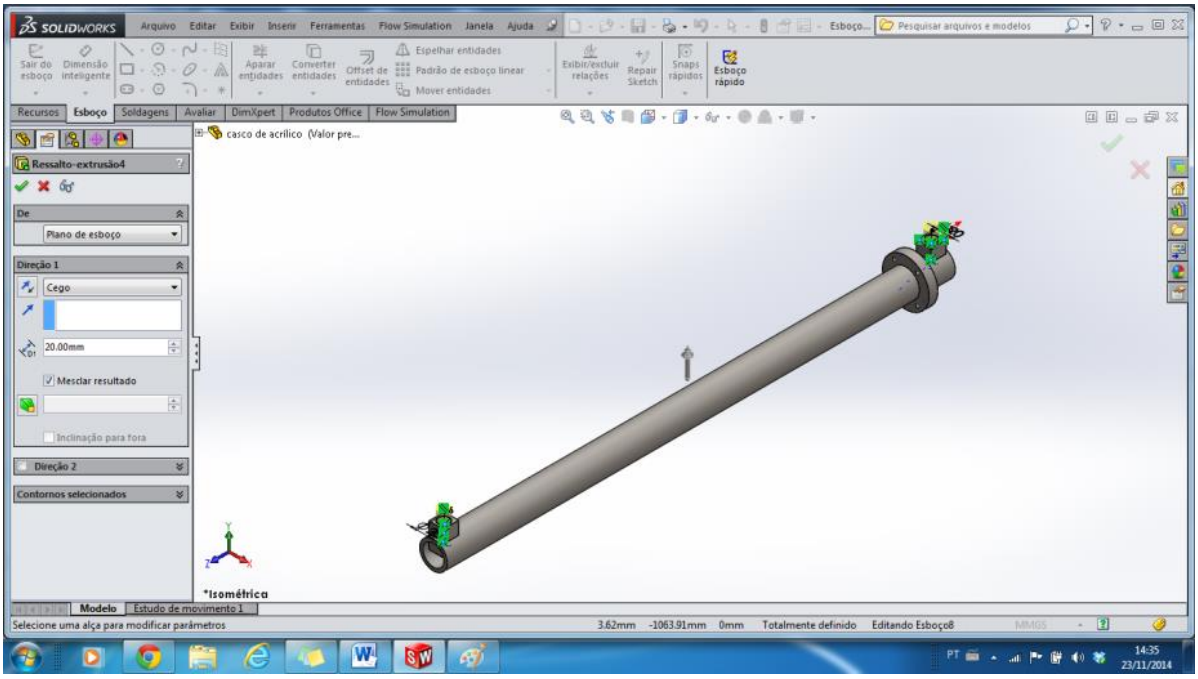


Figura a.17: Extrusão dos dois círculos em 20 mm

A próxima etapa selecionou com o botão direito do mouse, usou o recurso esboço e desenhar dois círculos sobre os cilindros que se acabou de fazer. Com o comando círculo aproximou o ponteiro do mouse sobre a borda do cilindro e vai aparecer o centro, clique nele e abra o círculo, com dimensão inteligente dê o diâmetro de 19 mm, serão feitos esse esboço em ambos os cilindros. Conforme a figura a.18.

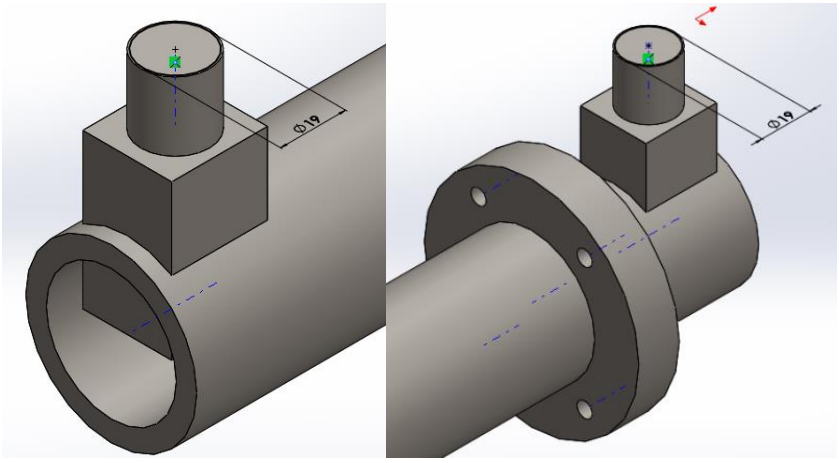


Figura a.18: Mostra o esboço do círculo de 19 mm nas duas extremidades.

Direcionando a guia Recursos, Corte Extrudado, se alterou a opção de cego para até o próximo – o comando cortou até a próxima parede, com isso se tem os tubos onde vão ser conectadas as mangueiras com o fluido frio (figura a.19).

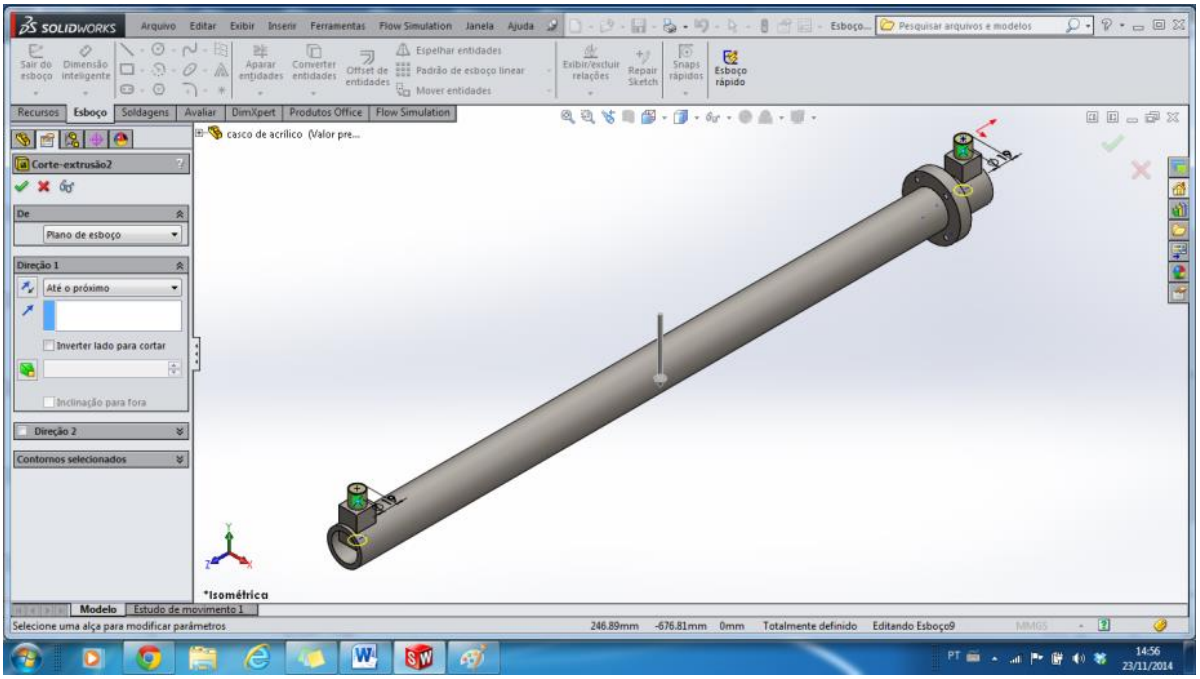


Figura a.19: Corte até o próximo (círculo que aparece no meio da altura da tubulação) parede da tubulação.

Nesse instante foi cortado o material desnecessário que sobrou da extrusão a partir do plano superior, selecionou-se com o botão direito do mouse a extremidade do tubo, se clica em esboço e com o comando círculo, traçou-se um círculo pegando do centro até a borda interna do tubo, conforme a figura a.20.

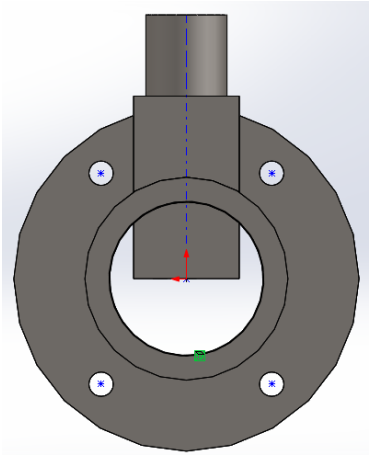


Figura a.20: Esboço do círculo pegando na origem até a borda interna do tubo, contorno mais escuro da aresta interna.

Foi-se para a guia Recursos, comando Corte Extrudado, se fez um corte cego com a profundidade de 920 mm. Conforme a figura a.21, com isso eliminou o material excedente.

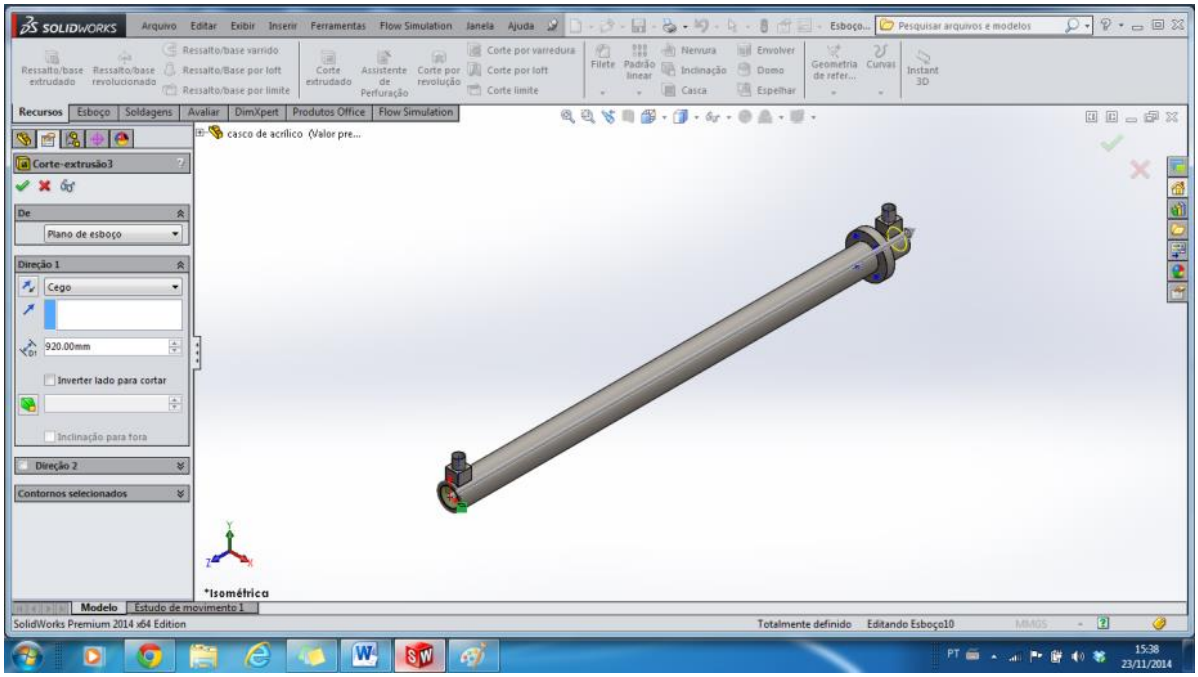


Figura a.21: Corte do material excedente que se encontra dentro do tubo.

Então se tampou as extremidades do tubo, para isso selecionou-se com o botão direito do mouse sobre a extremidade do tubo novamente e ordenou-se o comando esboço, agora se fez o esboço de um círculo clicando na origem e depois na borda externa, conforme mostrado na figura a.22.

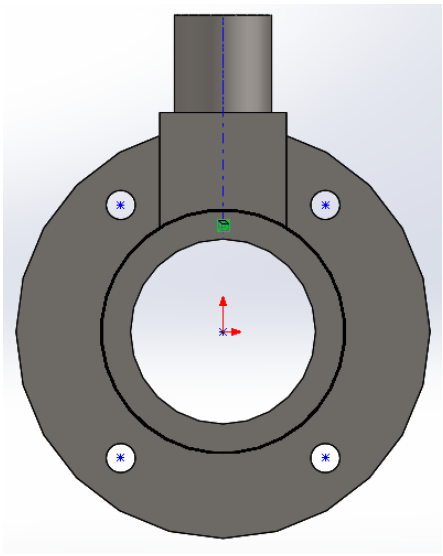


Figura a.22: Esboço para tampar uma das extremidades do tubo.

Na guia Recursos, comando Ressalto / Base Extrudado, se deu a profundidade de 5 mm, como mostra a figura a.23.

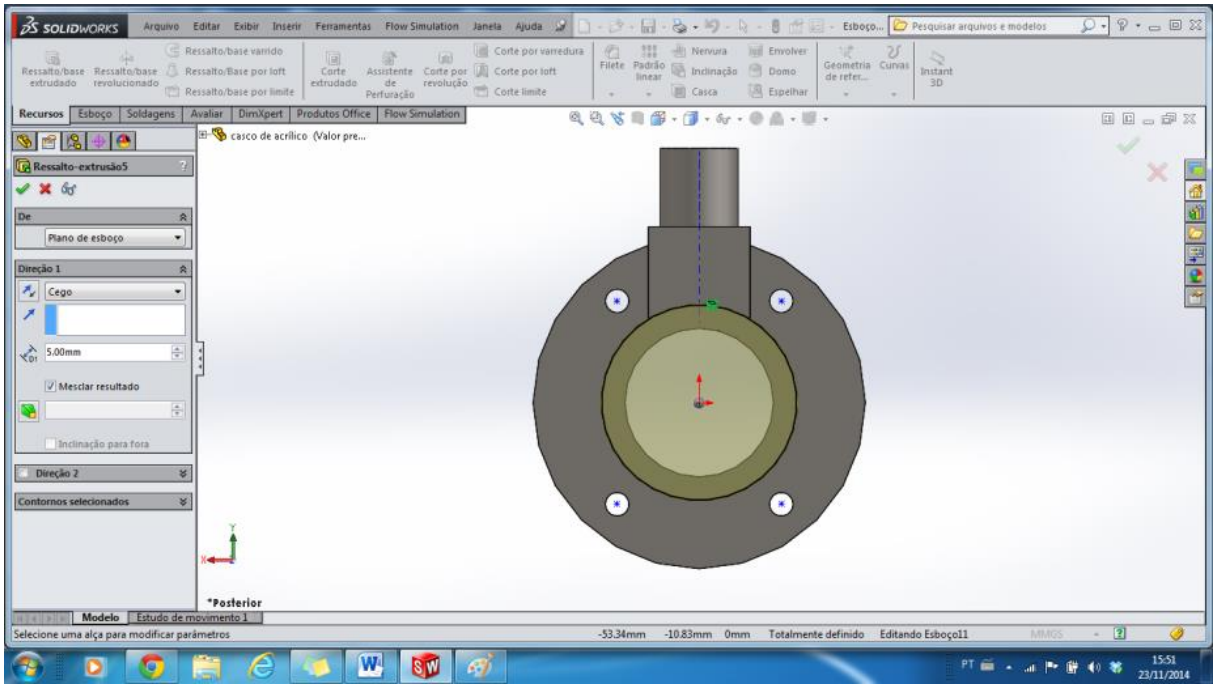


Figura a.23: Extrusão da tampa com 5mm.

Repetiu-se esse último procedimento com a outra extremidade do tubo. Após isso se tampou as duas extremidades selecionou uma das extremidades com o botão direito do mouse e clicou no comando esboço, traçou-se um círculo a partir da origem e com o comando Dimensão Inteligente com o diâmetro de 22,50 mm, conforme a figura a.24.

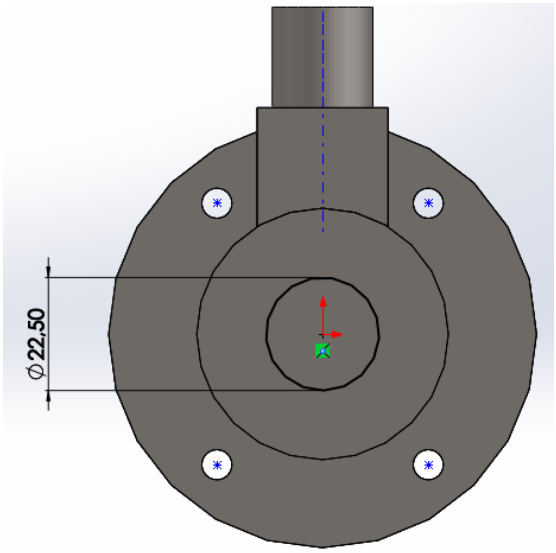


Figura a.24: Círculo no centro da tampa do tubo

Na guia Recursos se clicou em Corte Extrudado, alterou-se a opção de cego para o corte até o próximo. Conforme figura a.25.

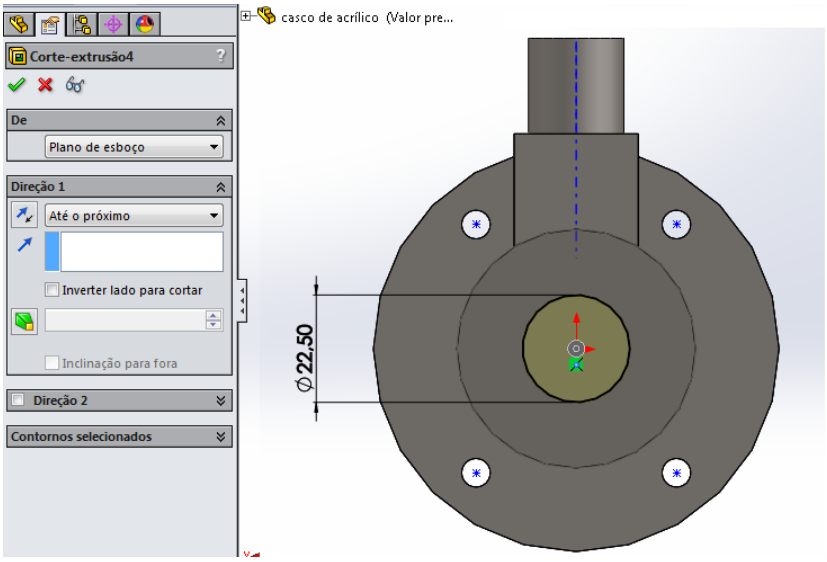


Figura a.25: Mostrando o corte extrusado da tampa usou-se o tubo de cobre

Repetiu-se o procedimento com a outra tampa do tubo. Agora apenas restou a determinação do tipo de material do tubo. Foi no gerenciador de projetos e clicou com o botão direito do mouse em Material <não especificado> e selecionou a opção: Editar material, conforme a figura a.26.

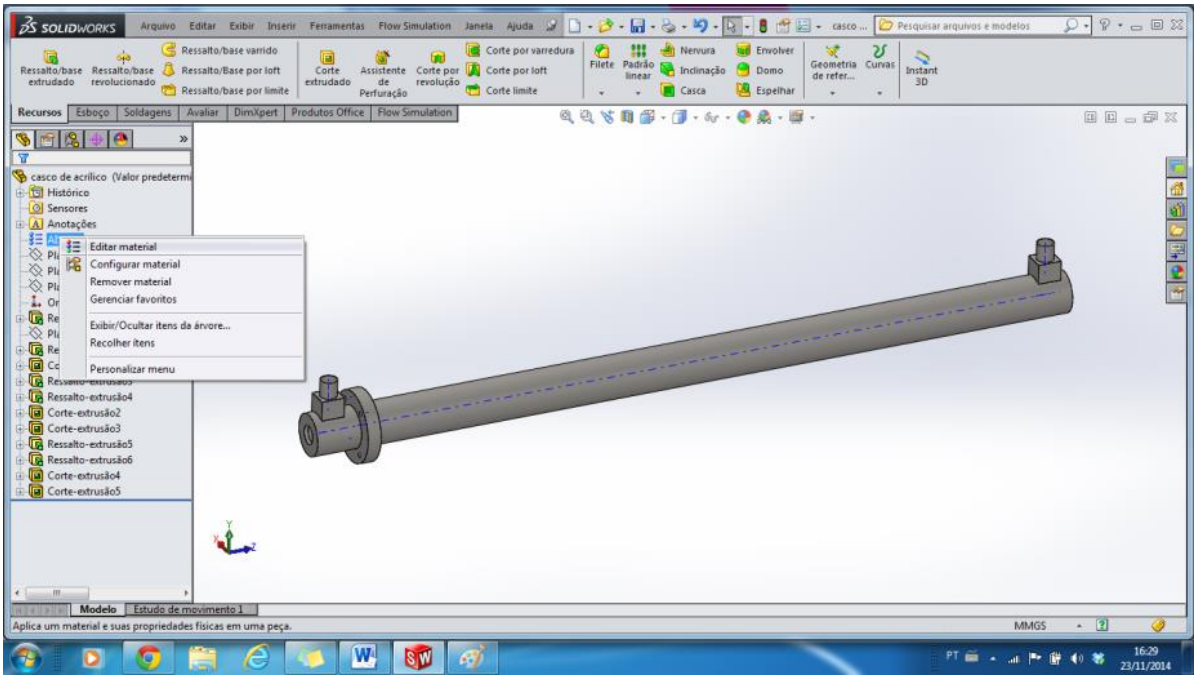


Figura a.26: Edição do tipo de material.

Escolheu-se na janela que abriu (figura a.27): *Solidworks* - Materiais, plásticos, Acrílico (médio-alto impacto). Clicou no botão Aplicar e Fechar veja que o casco ficou com a aparência e características do acrílico.

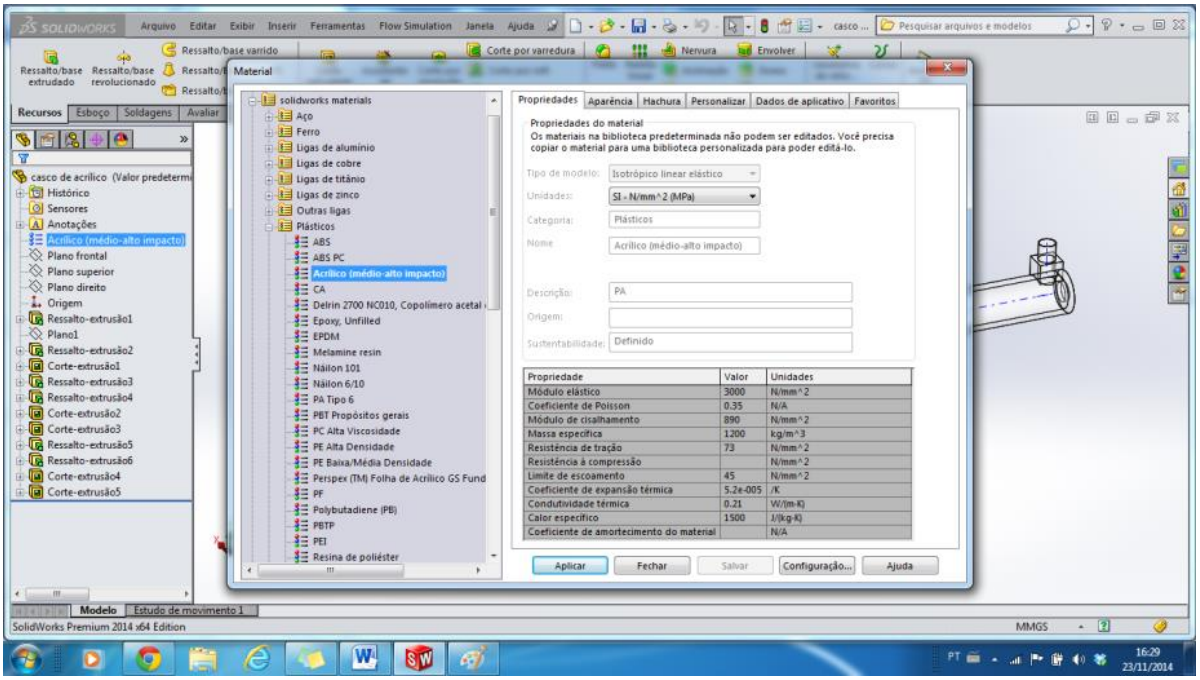


Figura a.27: Janela com lista para seleção do material e suas características

Finalizou-se com isso o casco externo do trocador de calor (figura a.28).

Figura a.28: Modelagem finalizada do casco externo do trocador de calor com os respectivos furos.

A peça foi salva com o nome de casco de acrílico nas pastas componentes que se encontram dentro das pastas: trocador de calor Concorrente e Contracorrente.

A.1.2 MODELAGEM DA CHICANA

O procedimento para o início da modelagem da chicana é semelhante ao do casco. Primeiramente se fará um rascunho com todas as medidas necessárias (figura a.29).

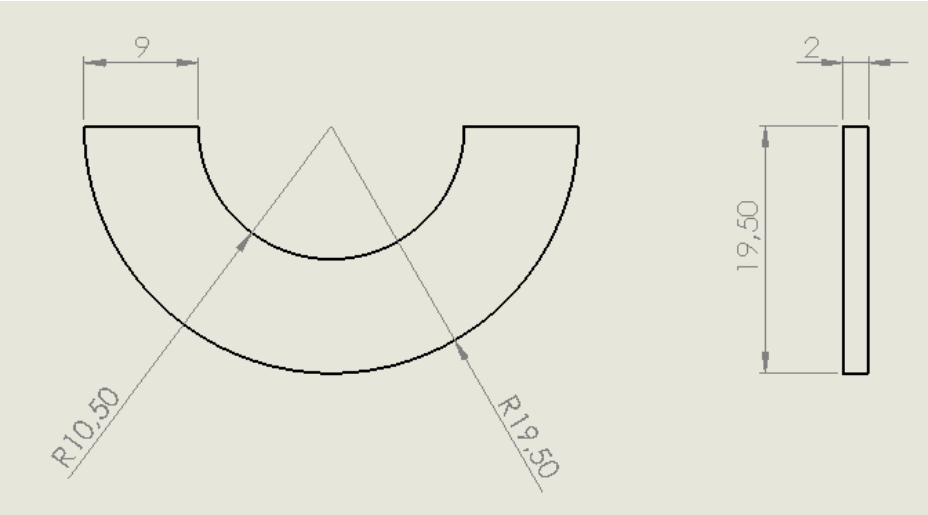


Figura a.29: Medidas utilizadas para a modelagem da chicana do trocador de calor.

Agora direcionando se ao Menu Arquivo e clicando em novo escolhe-se a opção peça. Conforme a figura a.30.

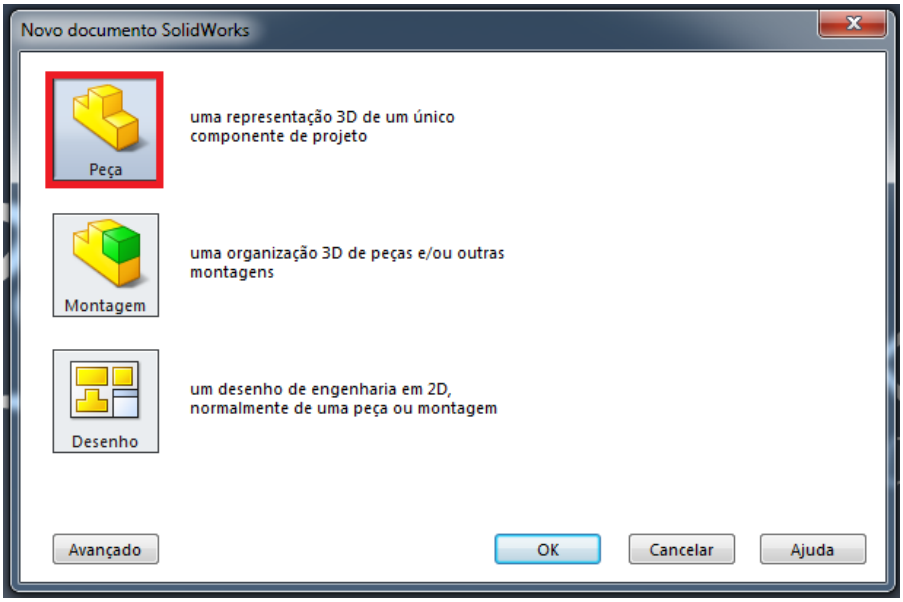


Figura a.30: Janela de opções de criação de documentos no Solidworks

A primeira etapa foi selecionar o plano de referência em que foi trabalhado, selecionando com o botão direito do mouse o plano frontal e clicando no botão esboço. Conforme mostra a figura a.31.

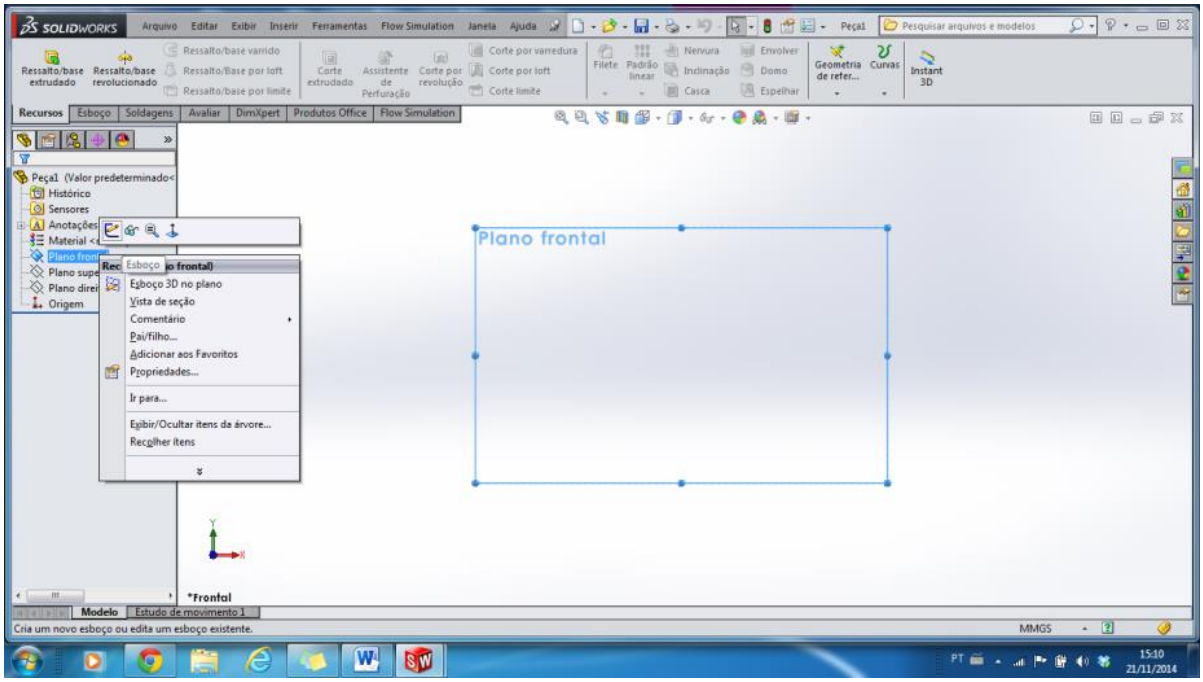


Figura a.31: Seleção do plano em se vai confeccionar a peça.

Com o comando círculo foi desenhado dois círculos com o centro na origem e com o comando Dimensão Inteligente foi colocado às medidas conforme a figura a.32.

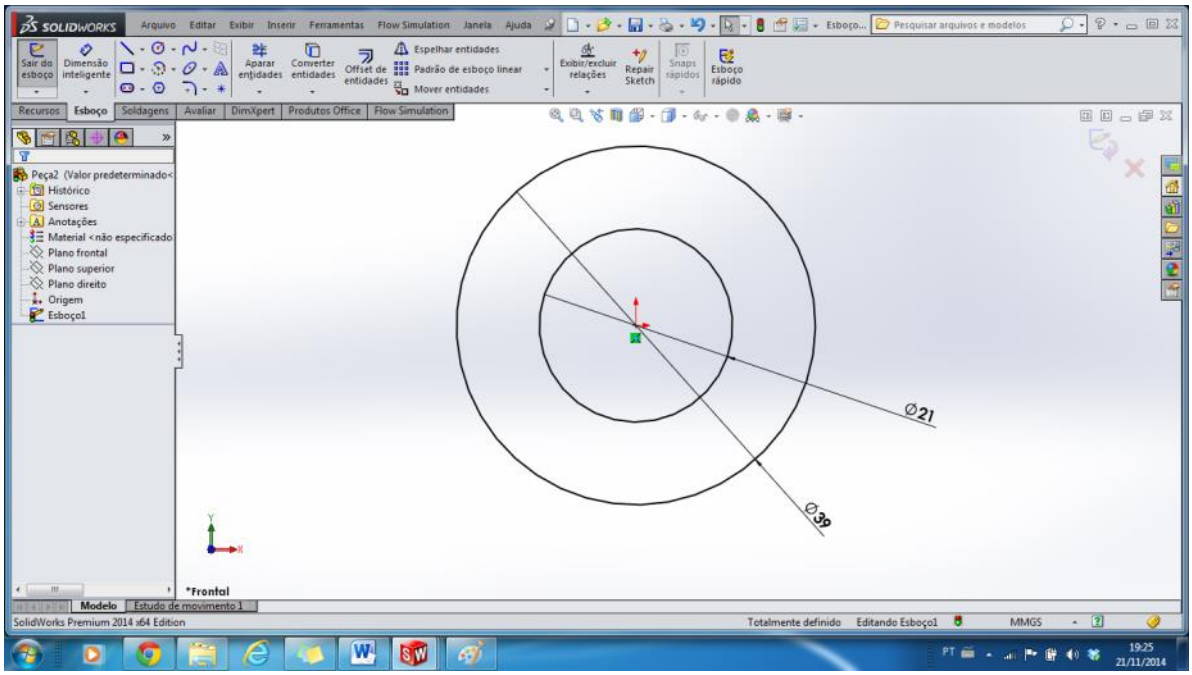


Figura a.32: Diâmetro dos círculos que compõem a chicana.

No próximo passo usou-se o comando linha para dividir os dois círculos ao meio e depois disso cortou a parte de cima dos círculos com o comando Aparar Entidades. Observação: O comando aparar entidades – o comando aparagem ativa, o comando foi

aplicado, clicando com o botão direito e arrastando como se estivesse arrastando um ícone, vai aparecer uma linha cinza clara, onde ela tocar vai ser aparado (cortado), conforme a figura a.33 dê Ok para finalizar o comando.

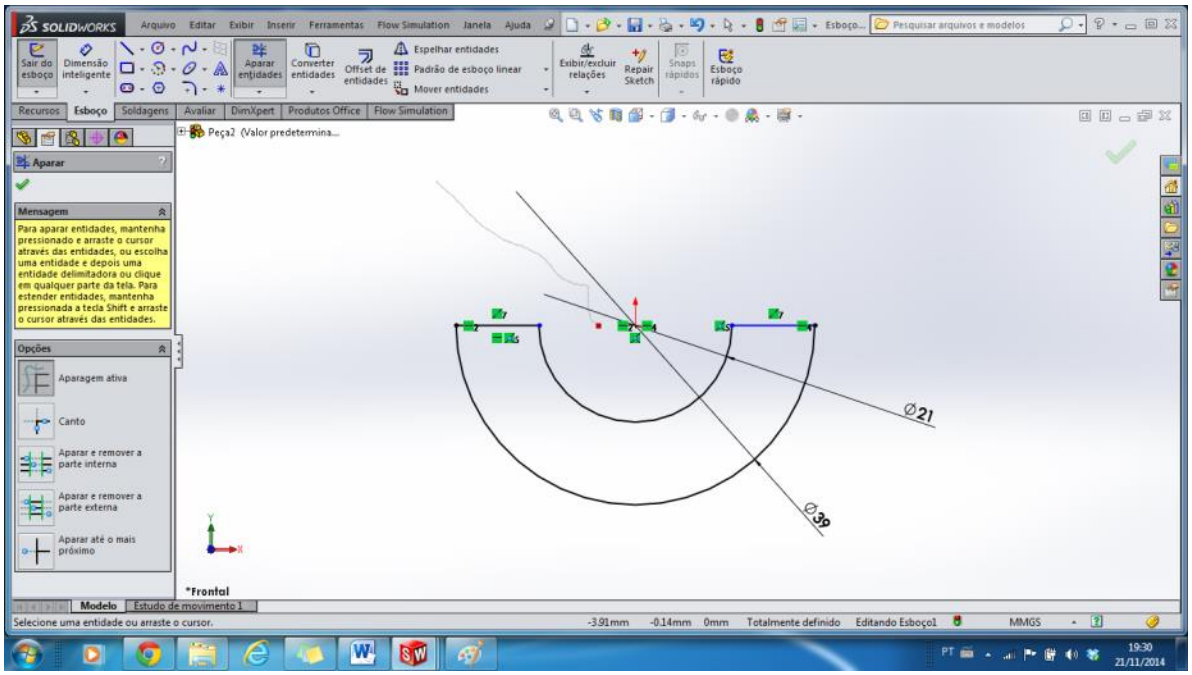


Figura a.33: Linha horizontal e metade dos círculos aparados com Aparar Entidades

Para finalizar a chicana, o próximo procedimento foi na guia Recursos e clicou no botão Ressalto/Base Extrudado e na janela no item D1 digitou o valor de 2 mm de profundidade. Conforme mostrado na figura a.34: finalizou a extrusão dando um OK na janela do lado esquerdo da figura.

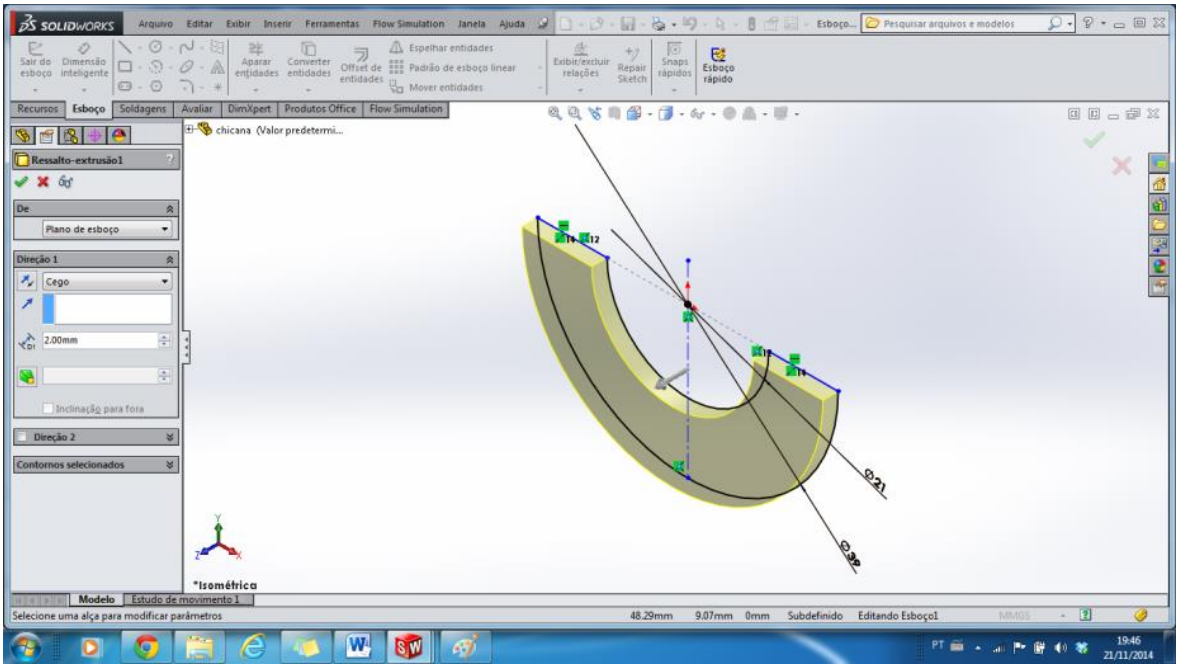


Figura a.34: Extrusão da chicana a partir do seu esboço.

Nesse momento foi determinado o tipo de material se clicou com o botão direito do mouse em Material <não especificado> e clicou na opção: Editar material, figura a.35.

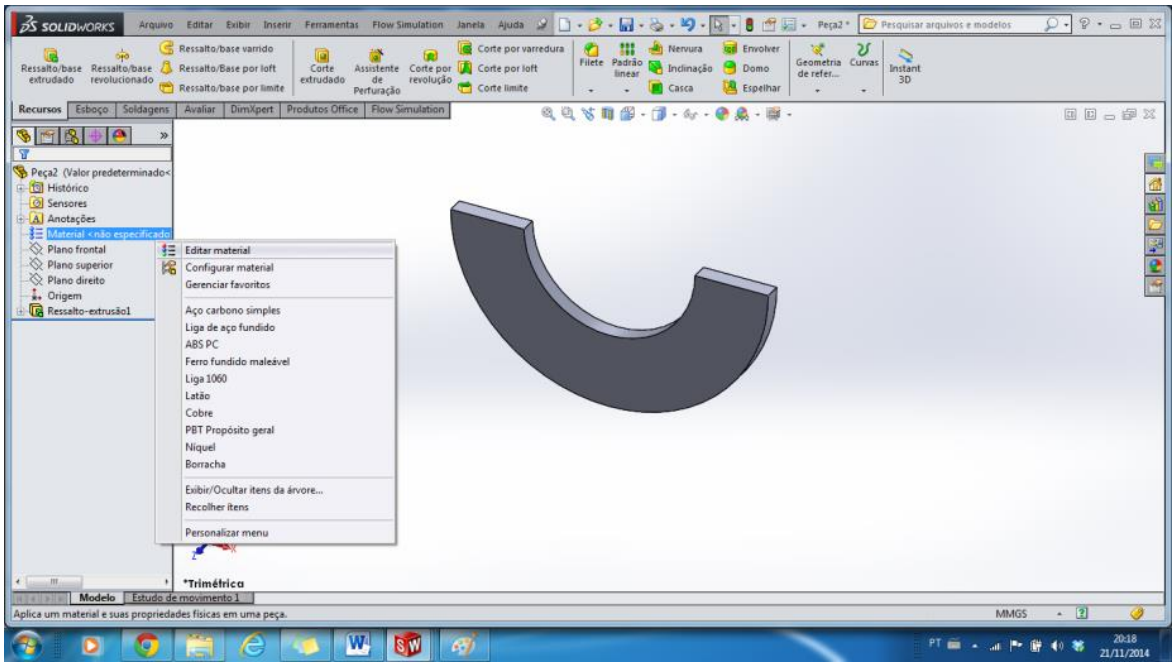


Figura a.35: Edição de tipo de material da peça

Abriu-se uma janela, selecionou em *Solidworks* materiais, a opção: plásticos e escolheu a opção PVC rígido, clicou no botão aplicar e depois em fechar – figura: a.36, a peça ficou com a aparência e características do PVC rígido.

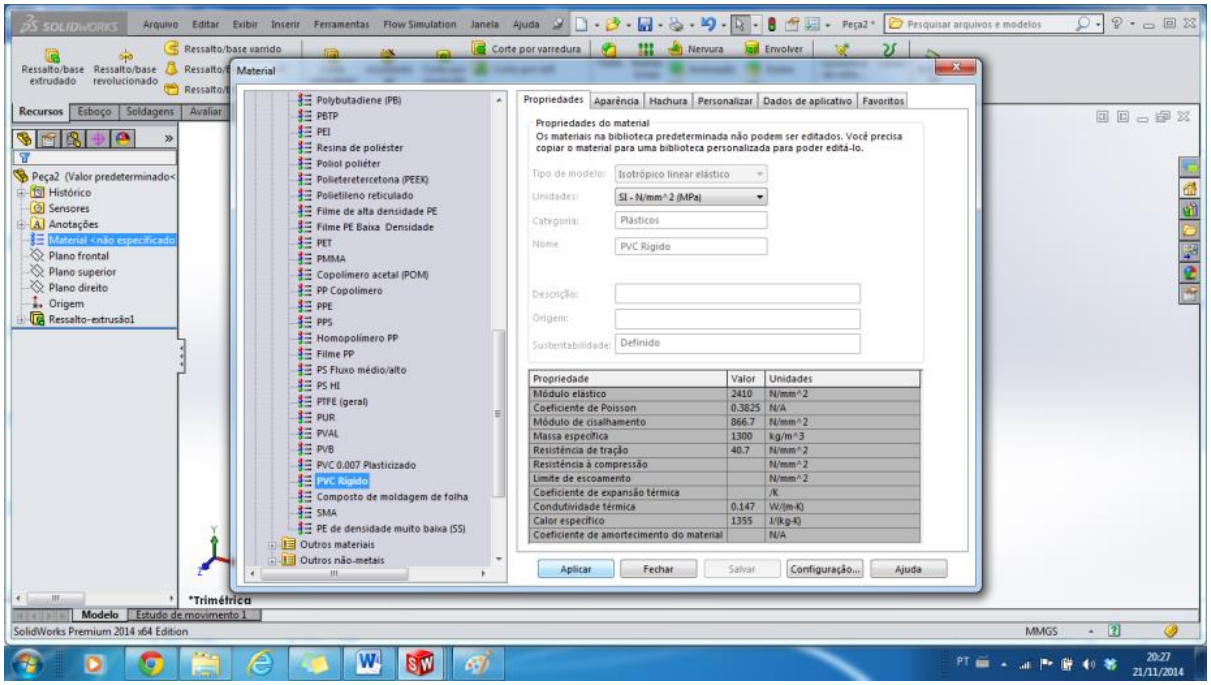


Figura a.36: Configuração do material para PVC rígido

Com as especificações concluídas, obtém-se a modelagem finalizada da chicana como mostra a figura a.37, pronta para a montagem.

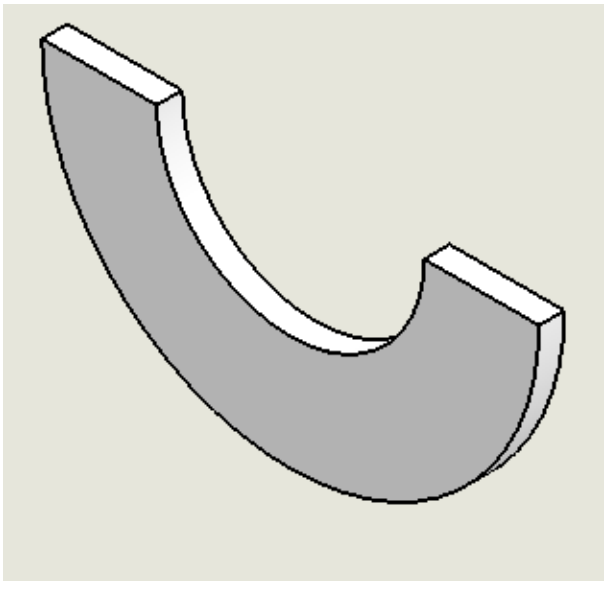


Figura a.37: Modelagem finalizada da chicana do trocador de calor.

Salvou-se o arquivo com o nome de chicana nas pastas componentes que se encontram dentro das pastas: trocador de calor Concorrente e Contracorrente.

A.1.3 MODELAGEM DO TUBO DE COBRE – CASCO INTERNO

A última peça que foi modelada foi o tubo de cobre utilizado como casco interno do trocador de calor. Como nas outras peças foi realizado a medição e esboço medidas para serem utilizadas na modelagem, essas medidas são mostradas na figura a.38.

Figura a.38: Modelagem do tubo de cobre utilizado como casco interno.

O procedimento para o início da modelagem do tubo de cobre foi parecido com as peças anteriores. Dirigiu-se ao Menu Arquivo e clicou em novo e selecionou a opção peça. Conforme a figura a.39.

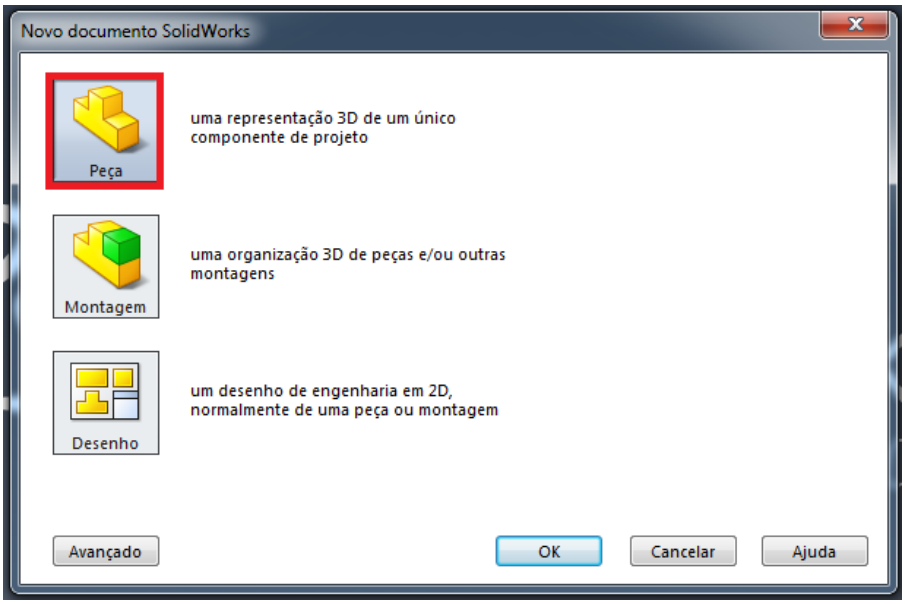


Figura a.39: Janela de opções de criação de documentos no Solidworks

A primeira etapa dessa peça como nas outras foi selecionar o plano de referência em que foi trabalhado, selecionou com o botão direito do mouse o plano frontal e clicou no botão esboço. Conforme a figura a.40.

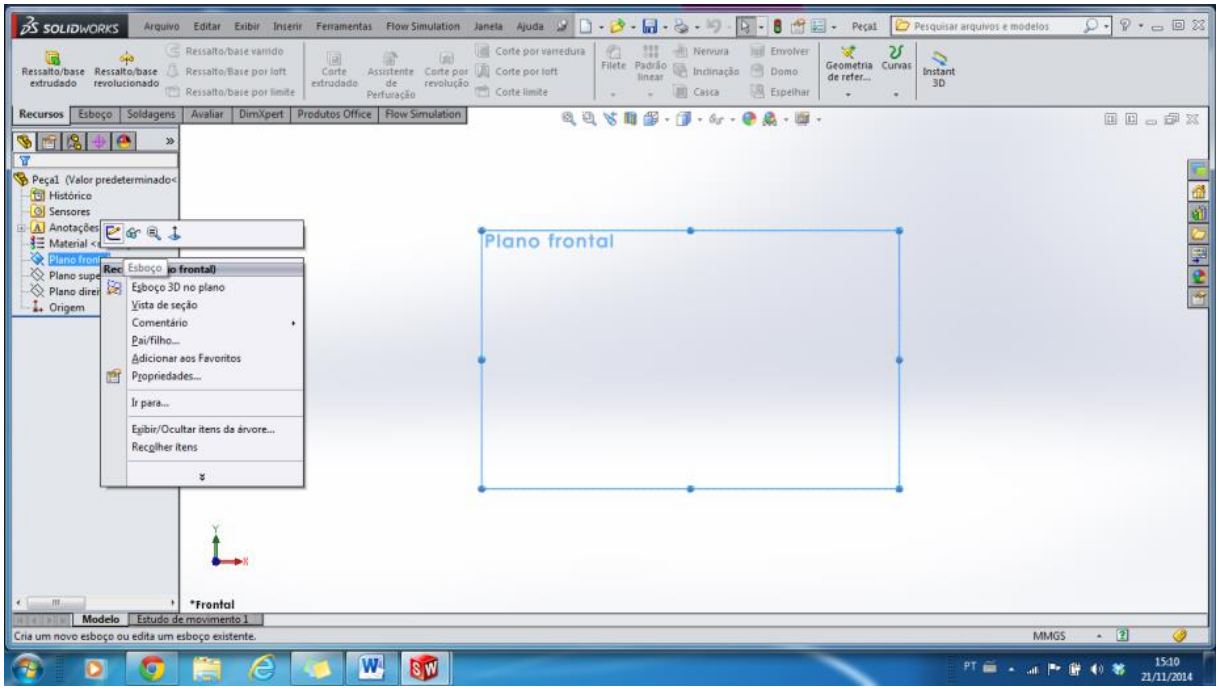


Figura a.40: Seleção do plano em se vai confeccionar a peça.

Com o comando círculo se desenhou dois círculos com o centro na origem e com o comando Dimensão Inteligente com as medidas conforme a figura a.41.

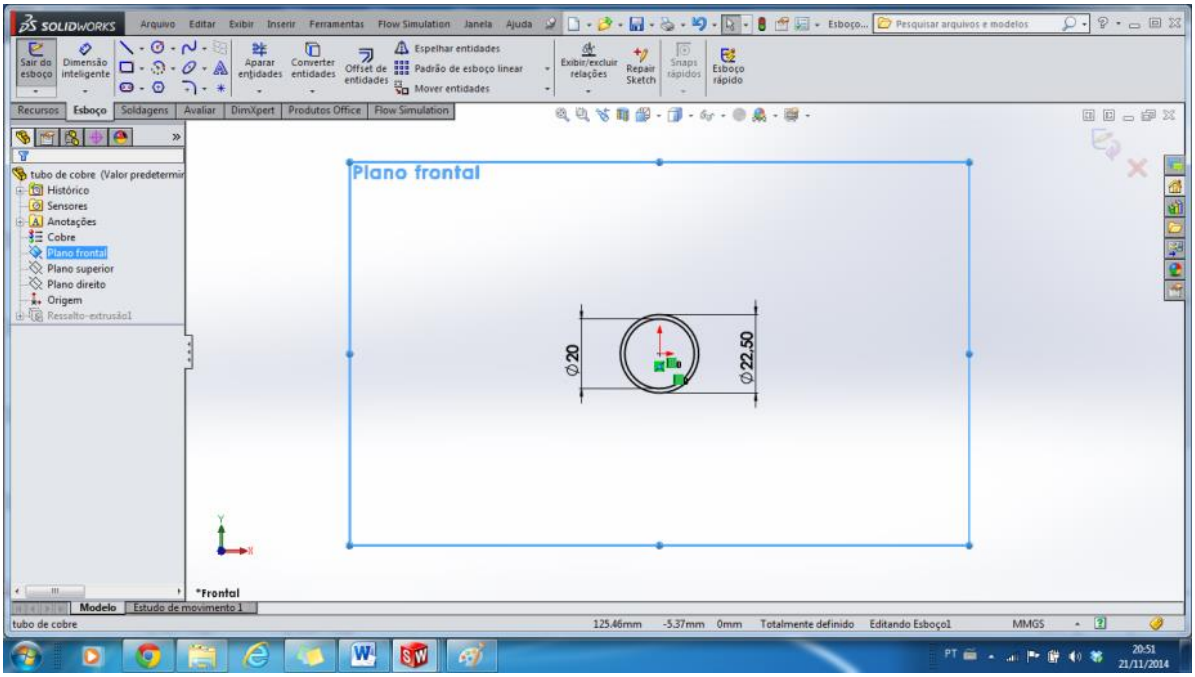


Figura a.41: Diâmetro dos círculos que vão compor o tubo de cobre.

Estando no Comando Recursos e clicou no botão Ressalto/base extrudado, selecionou-se em D1 e digitou-se o valor de 1044 mm de profundidade, conforme a figura a.42. Dê ok para finalizar o comando.

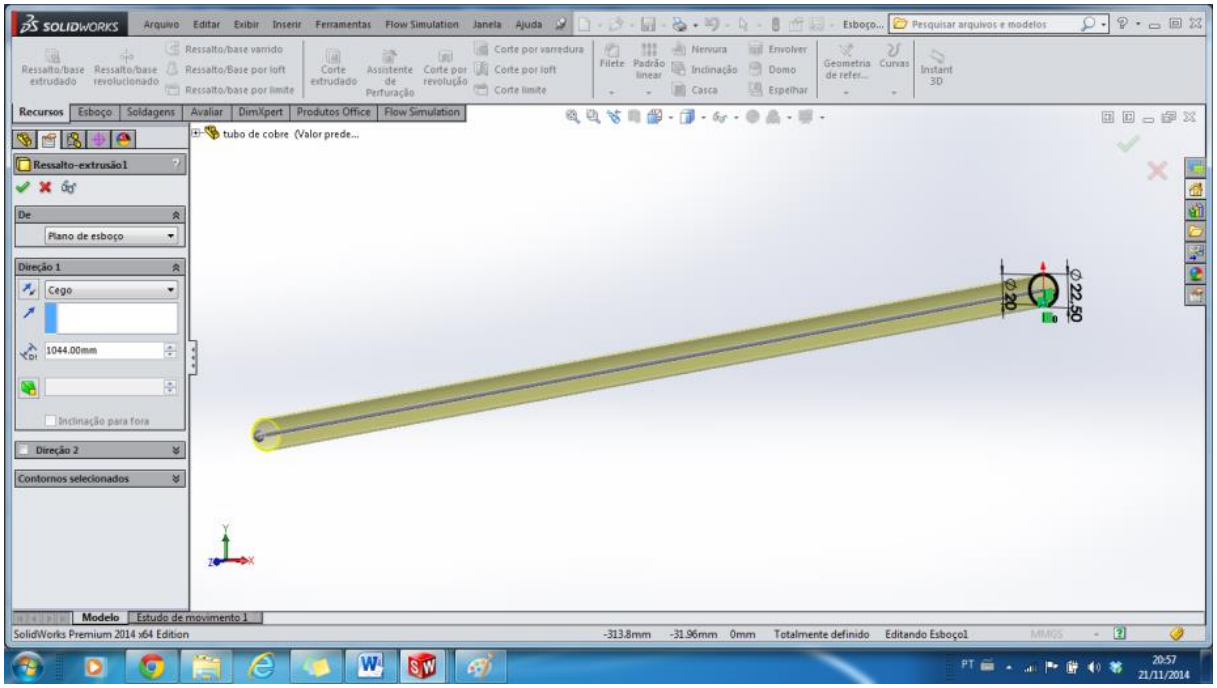


Figura a.42: Demonstra a extrusão do tubo de cobre

Abriu-se uma janela, selecionou em *Solidworks* materiais, opção: ligas de cobre escolheu a opção cobre, clicou no botão aplicar e depois em fechar – figura a.43, a peça vai ficar com a aparência e características do tubo de cobre.

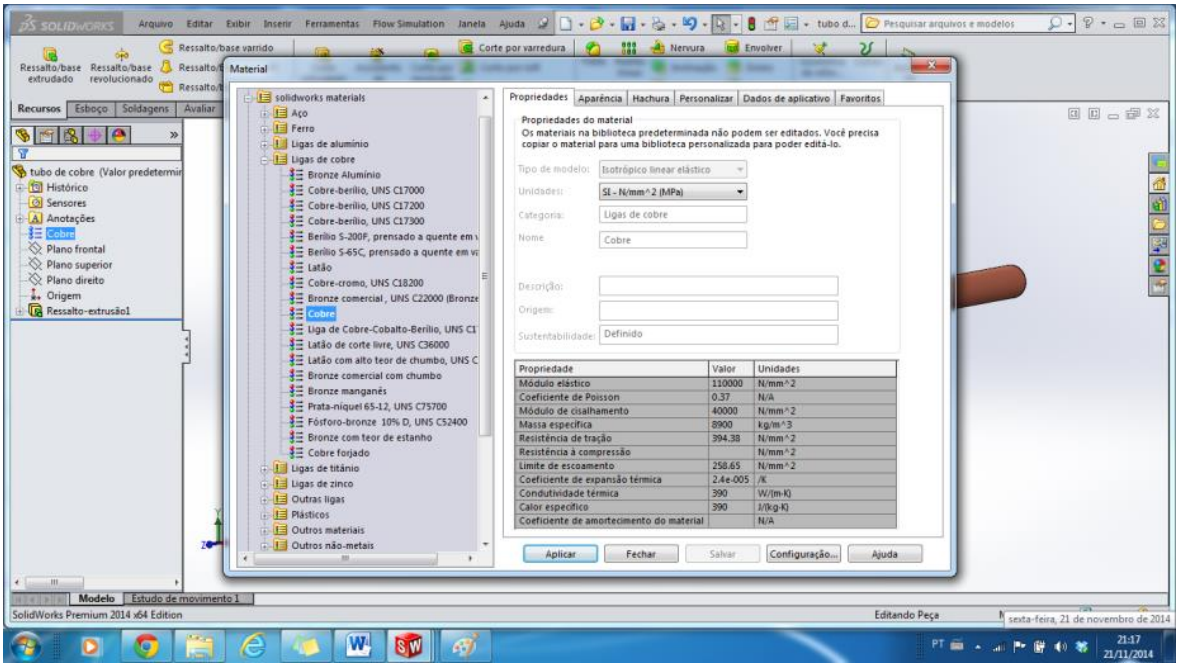


Figura a.43: Configuração do material para cobre

Com a peça finalizada, figura a.44, com o nome de tubo de cobre, salvou-se uma cópia em cada uma das pastas componentes. Cada uma das pastas encontra-se na pasta Ensaio com Trocador de Calor, Trocador Concorrente e outra com o nome de Trocador Contracorrente.

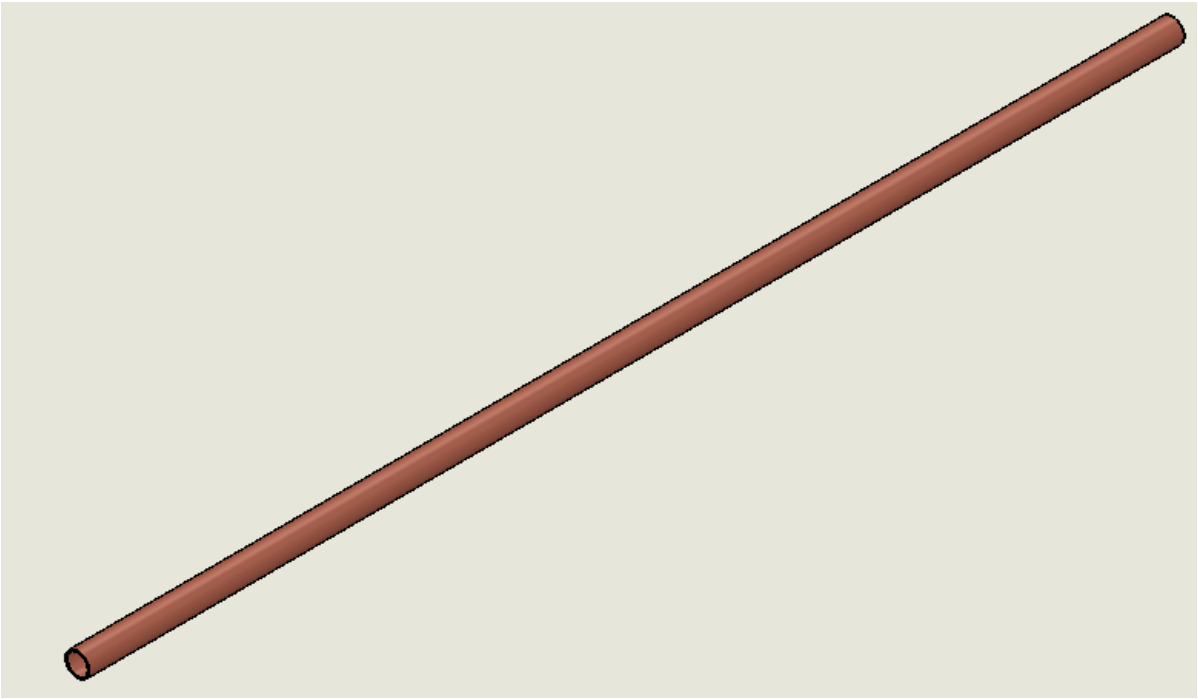


Figura a.44: Modelagem finalizada do tubo de cobre do trocador de calor.

No *Solidworks* cada peça é feita em um arquivo individual. A montagem foi feita em um arquivo separado de montagem. Uma observação é que o programa aceita sub-montagens na montagem principal, isso facilita a montagem de peças muito complexas. As etapas de montagem serão explicadas no anexo II.

APÊNDICE II – GUIA DE MONTAGEM DO TROCADOR DE CALOR

A.2 MONTAGEM DO TROCADOR DE CALOR

Iniciou-se a montagem ao abrir o *Solidworks*, clicou-se no botão novo, ou usando o Menu Arquivo, clicou na opção novo e selecionou na janela que abriu na opção montagem e confirmou em OK, conforme a figura a.45.

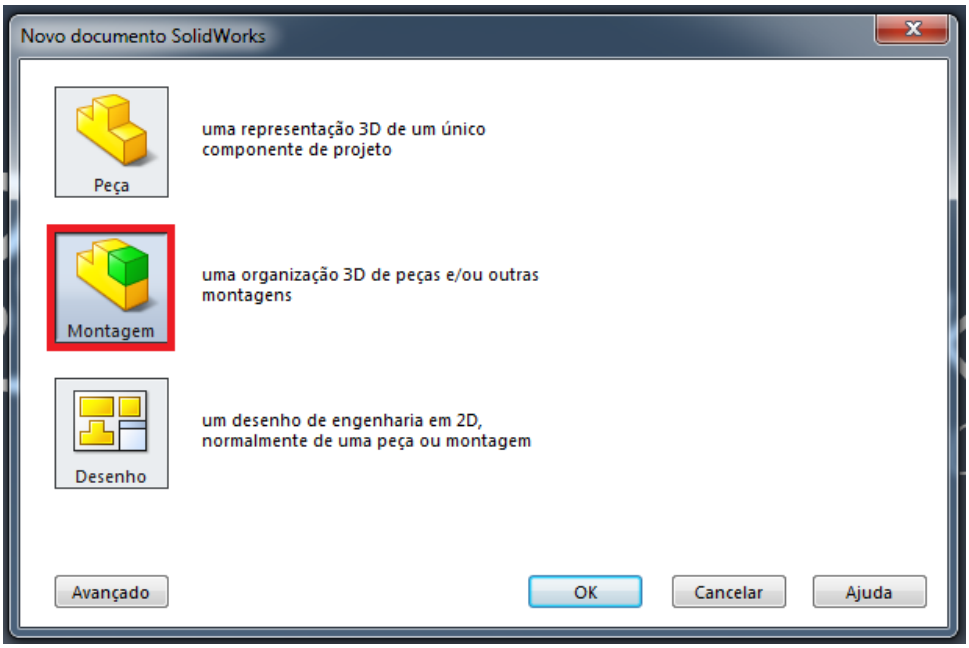


Figura a.45: Janela de opções de criação de documentos mostra a seleção (marcado em vermelho) da opção montagem.

Como foi mostrado na figura a.46, foi aberta uma guia Montagem e uma janela do lado esquerdo com o nome de iniciar a montagem. Na opção nesta janela: (Documentos abertos) foi clicado no retângulo e a opção procurar a peça que vai iniciar a montagem.

Observação: Sempre que se inicia uma montagem com a peça que é fixa, ou seja, tem que ser o componente que não tem movimento, no objeto de estudo o componente fixo foi o casco de acrílico (casco externo).

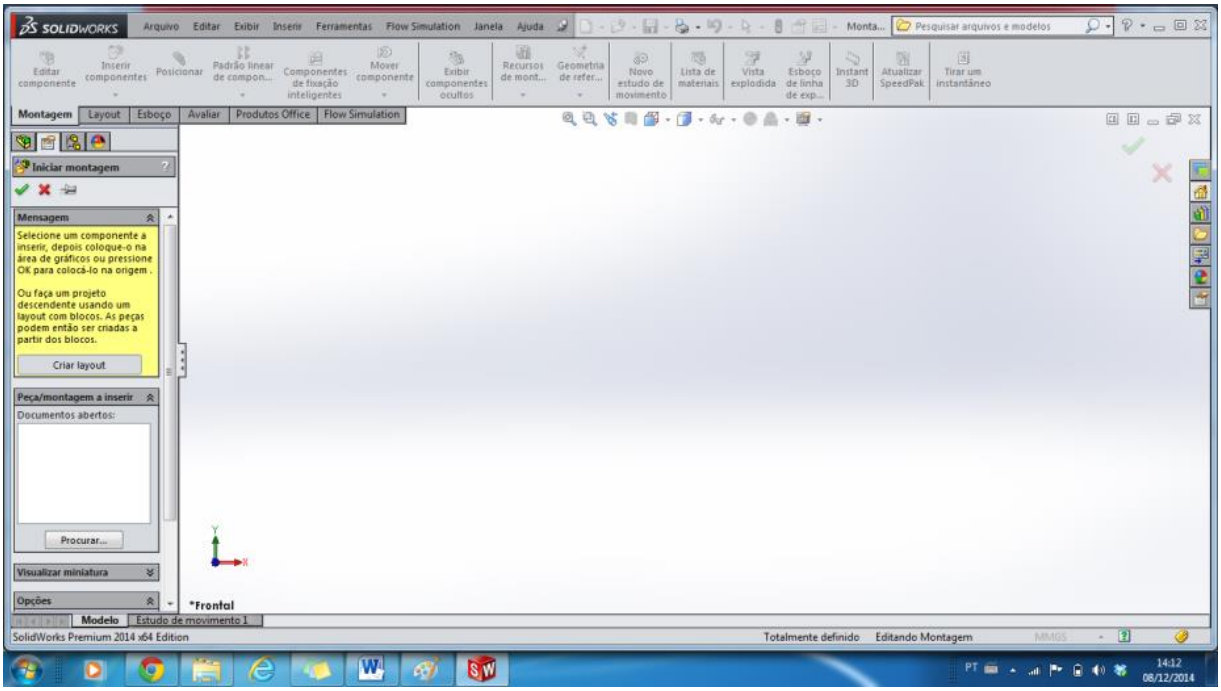


Figura a.46: Janela iniciar montagem.

Ao inserir a peça na Montagem clicou-se em procurar e o programa abriu uma janela onde pode procurar peça na pasta - Trocador de Calor Concorrente e na pasta interna - Componentes, e selecionou-se a opção casco de acrílico, para inserir a peça clicou-se na área de trabalho para que ele fique fixado, conforme mostrado na Figura a.47.

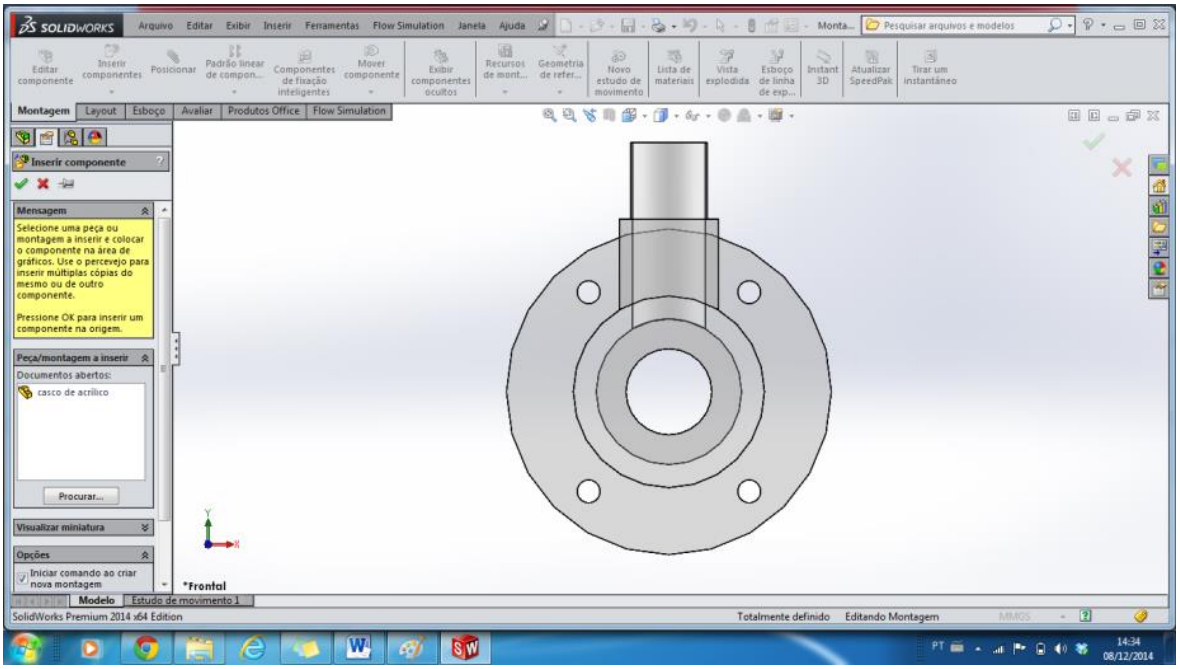


Figura a.47: Casco de acrílico sendo inserido na montagem.

Para inserir os demais componentes clicou-se no botão Inserir Componentes, onde se pode inserir apenas um componente por vez, ou seja, tem-se que repetir o processo para cada peça, com a chicana, conforme mostrado na figura a.48.

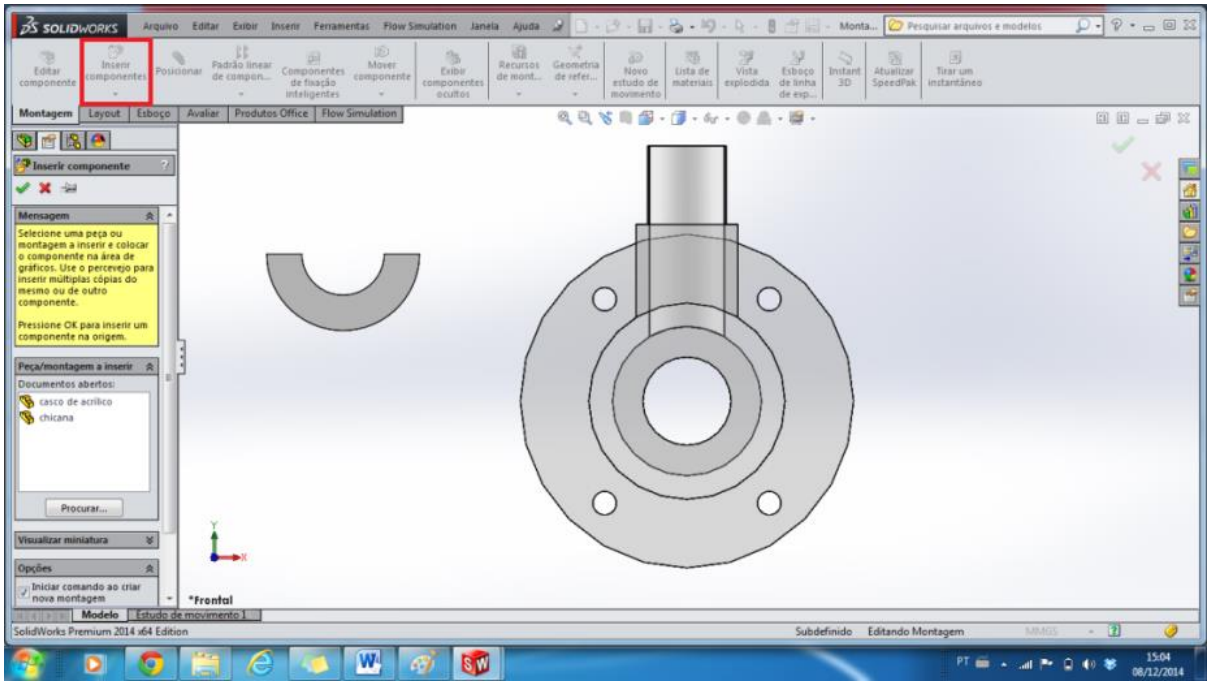


Figura a.48: Inserindo a chicana na montagem.

Com todos os componentes inseridos na montagem, conforme a figura a.49 começou-se agora a posicionar cada um dos componentes na sua posição correta.

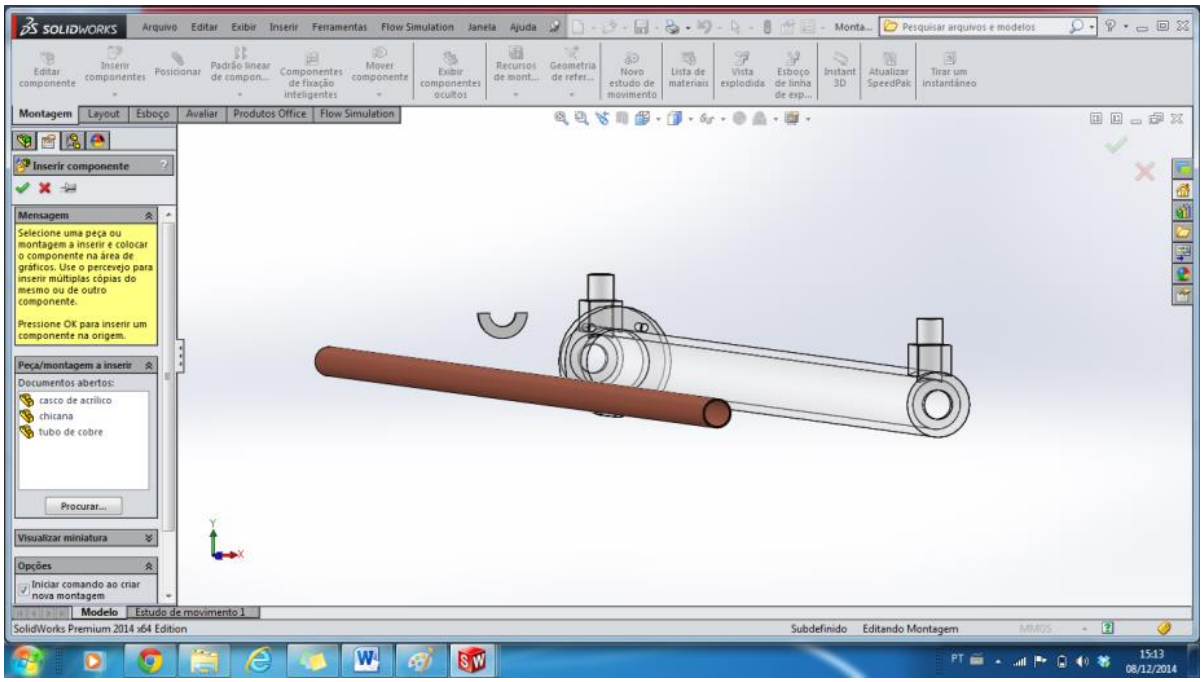


Figura a.49: Todos os componentes do trocador de calor inseridos na montagem.

Para tanto, utilizou-se o comando Posicionar para fixar cada uma das peças em seu devido lugar, mostrado na figura a.50, iniciou-se com o tubo de cobre e o casco de acrílico, selecionou a face externa do tubo de cobre e a face interna do furo do casco de acrílico.

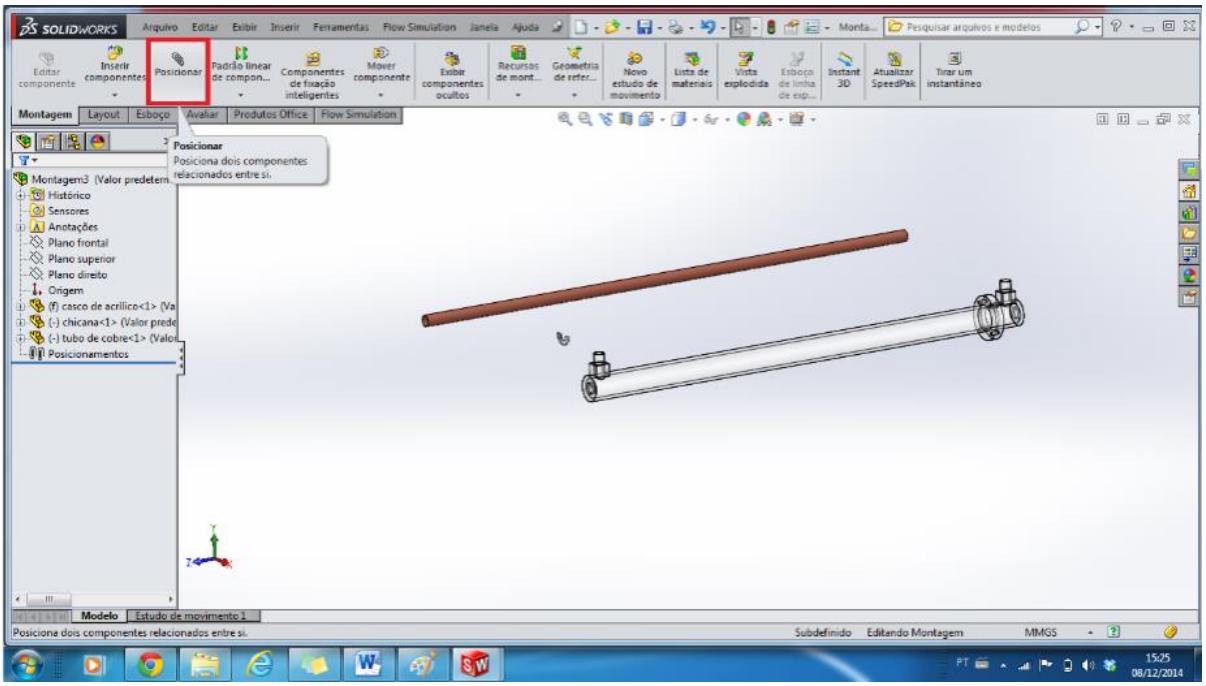


Figura a.50: Comando posicionar utilizado para montar o conjunto

Confirma-se a opção: concêntrico, conforme a figura a.51.

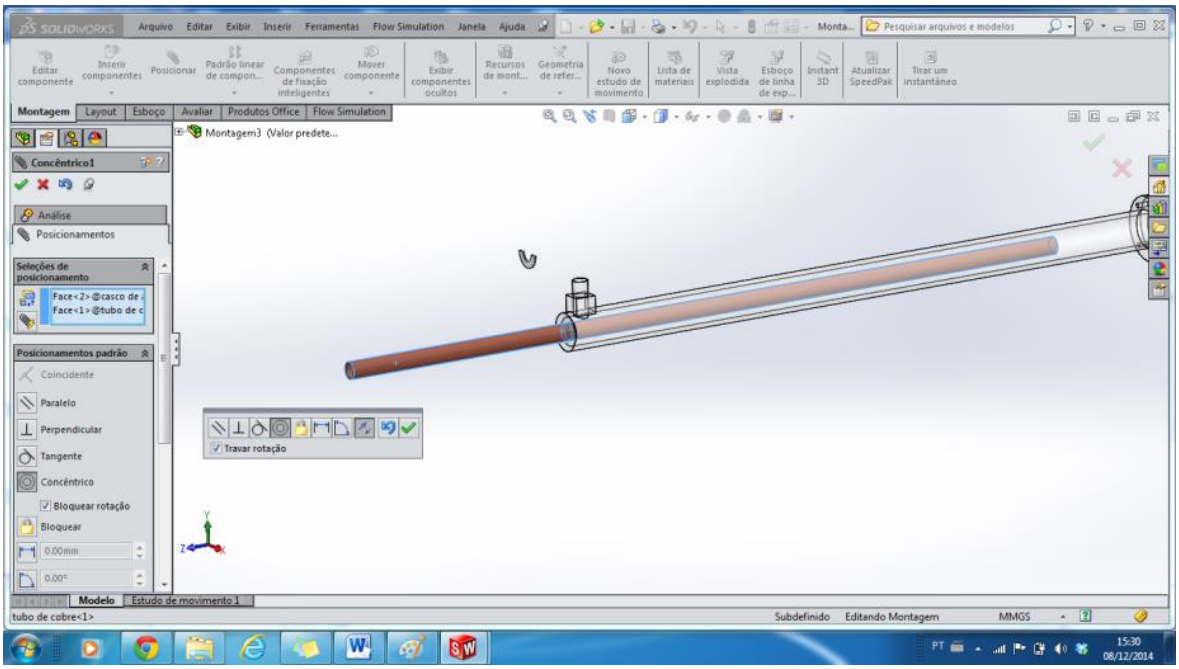


Figura a.51: Posicionamento do tubo de cobre dentro do tubo de acrílico.

Para finalizar a fixação do tubo de cobre, clicou-se no comando Posicionar e selecionou a borda do tubo de cobre e a borda do tubo de acrílico, inicialmente o programa selecionou a opção coincidente, mudou para a opção distância e digitou o valor de 45 mm e deu ok para confirmar e clicou em fechar para finalizar o comando, conforme a figura a.52.

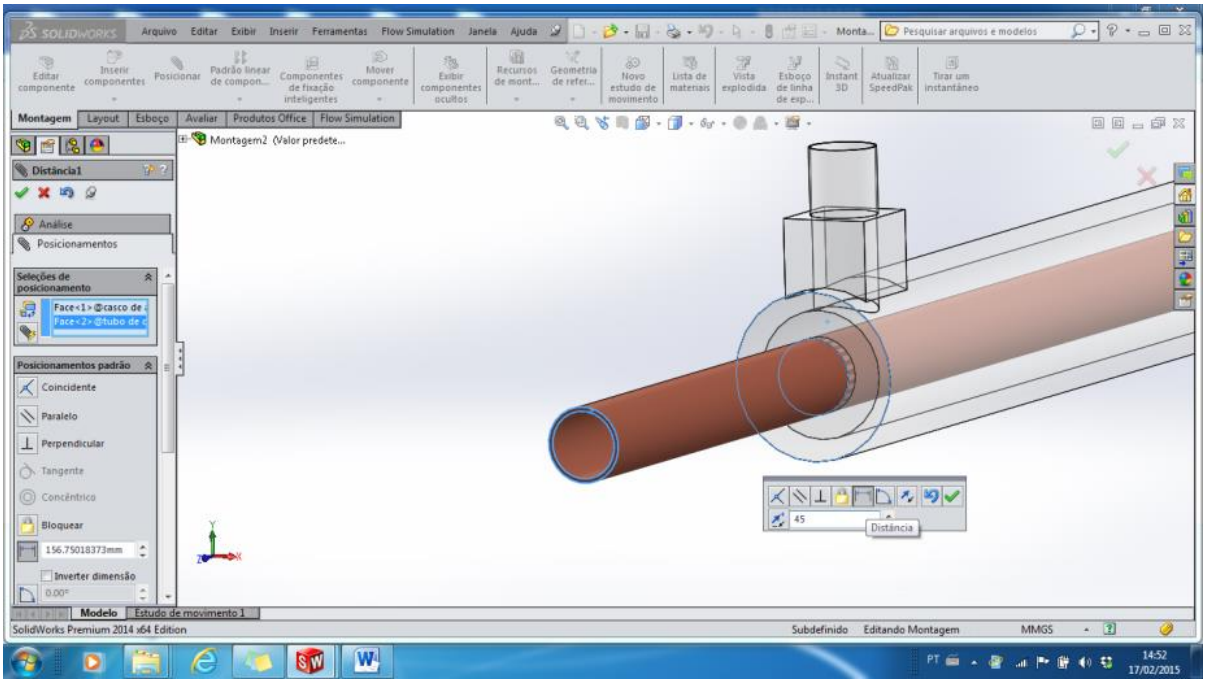


Figura a.52: Posicionamento da distância da borda do tubo de cobre em relação à borda do tubo de acrílico.

O próximo passo foi inserir outra chicana, utilizou-se o seguinte recurso: clicou sobre a chicana e com o botão *Ctrl* do teclado pressionado arrastou com o mouse a peça e soltou, com isso automaticamente o programa criou uma cópia, esse recurso só funciona quando já se tem pelo menos uma peça que se quer copiar inserida na montagem.

Para ser posicionada uma das chicanas no conjunto utilizou novamente o botão posicionar, selecionou a face externa do tubo de cobre com a face interna da chicana e confirmou a opção apresentada pelo programa: concêntrico, conforme a figura a.53.

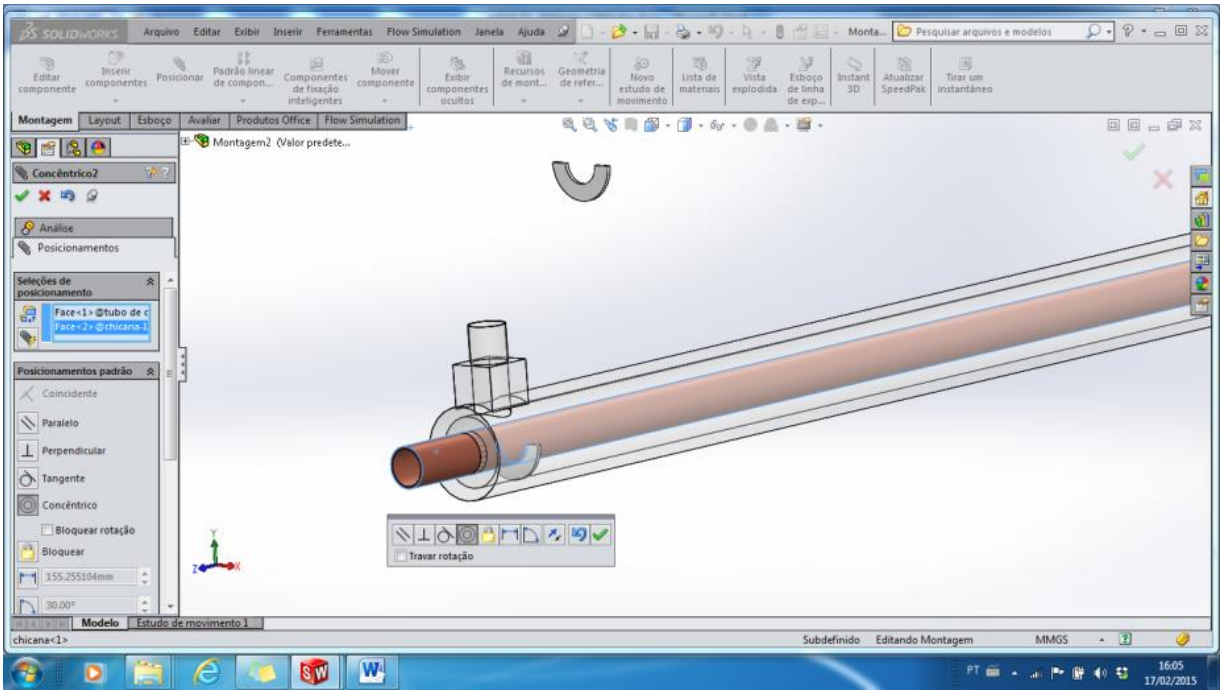


Figura a.53: Posicionamento na face do tubo de cobre em relação à face interna da chicana - concêntrico.

O próximo passo foi fixar a chicana para que ela não se movimentasse em volta do tubo de acrílico, então com o botão posicionar ativo, selecionou-se a face horizontal da chicana e o plano superior (para selecionar o plano clicou-se no sinal de mais ao lado de montagem e selecionou o plano desejado), deixá-los paralelos e confirmou o comando, conforme a figura a.54.

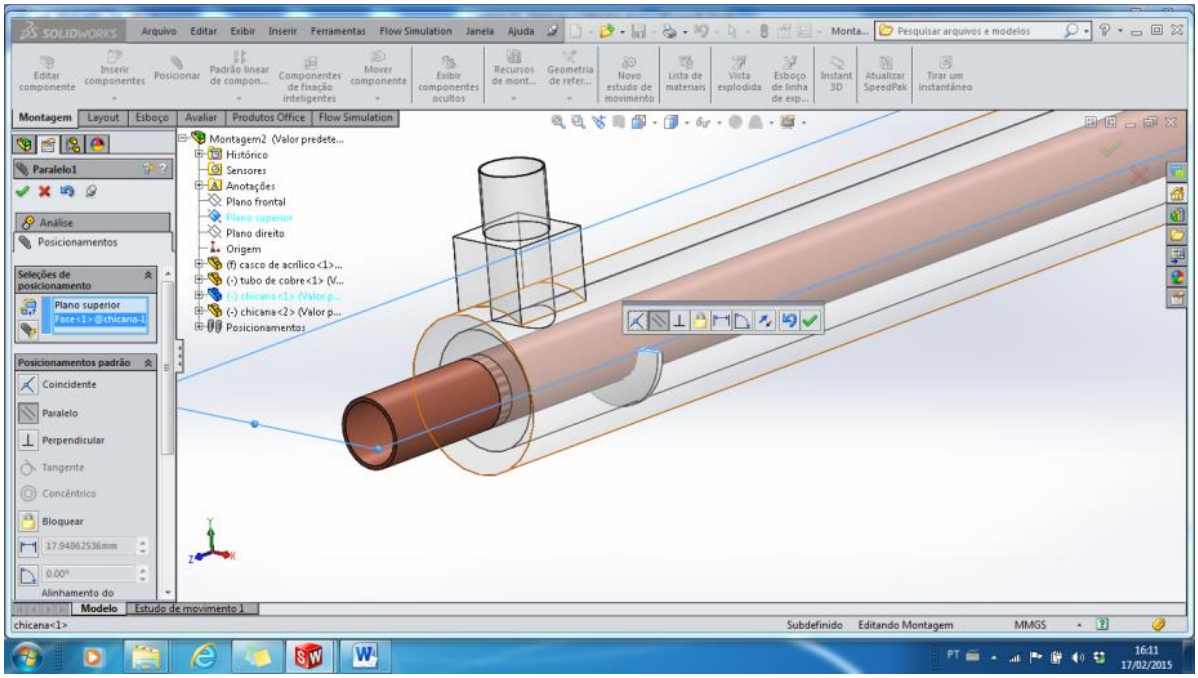


Figura a.54: Posicionamento da chicana em paralelo com o plano superior para evitar que se movimente em volta do tubo de cobre.

Para finalizar o posicionamento da chicana, lembrando que com o comando posicionar ativo, selecionou a face perpendicular do tubo de cobre e a face da chicana, mudou a opção para distância e digitou o valor de 80 mm e confirmou o comando, conforme a figura a.55.

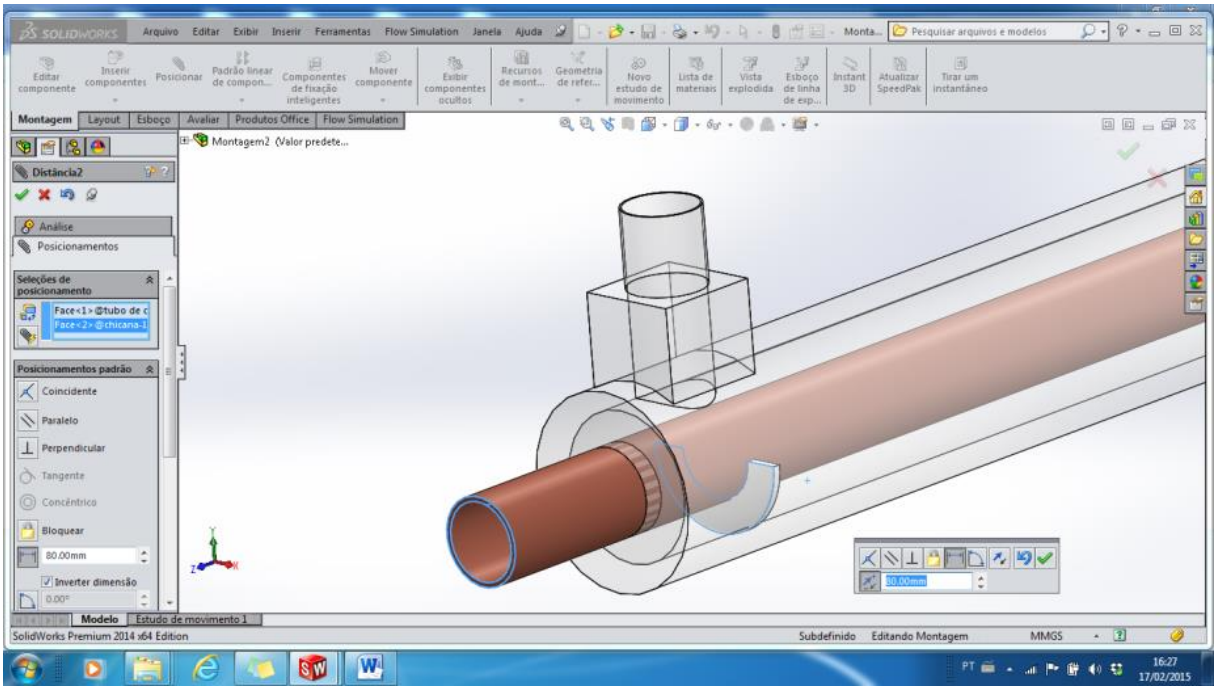


Figura a.55: Posicionamento da distância da chicana em relação à extremidade do tubo de cobre.

O próximo passo foi à colocação da segunda chicana. A segunda chicana foi posicionada da mesma forma que a primeira, ou seja, foi posicionada de forma concêntrica com o tubo de cobre, conforme é mostrada na figura a.56.

Observação: o bom posicionamento dos componentes do dispositivo garante uma boa simulação do funcionamento do mesmo.

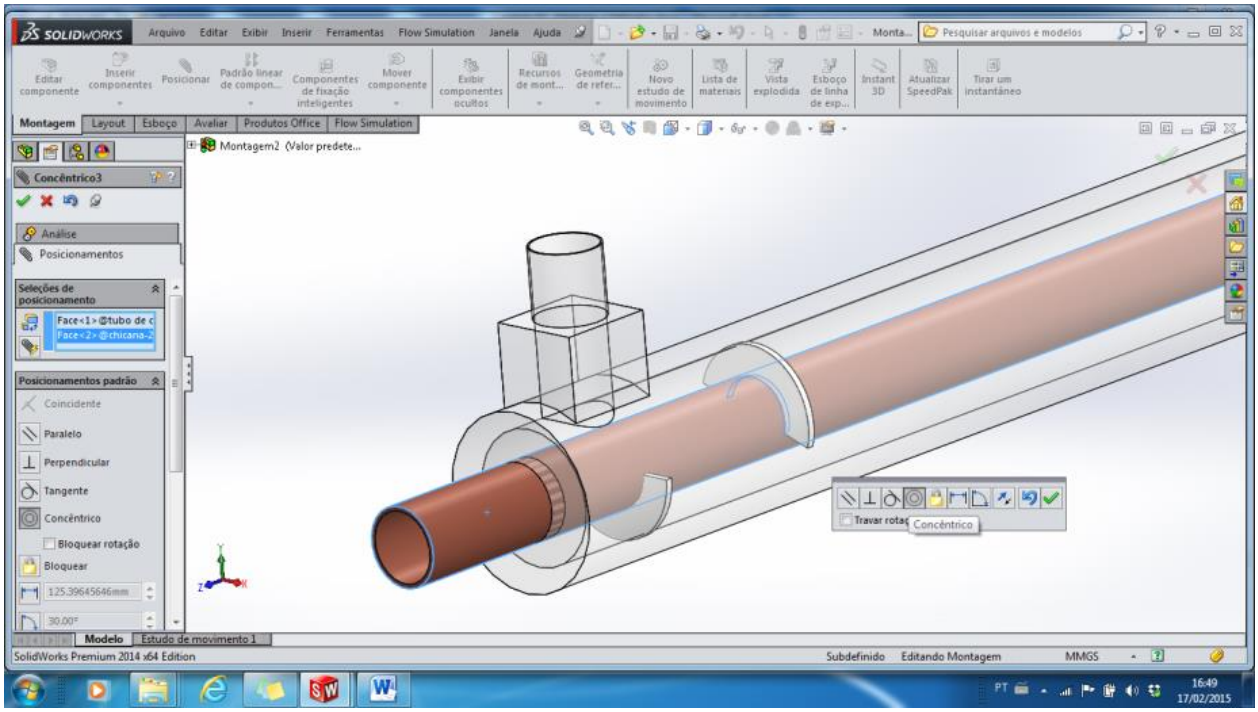


Figura a.56: Posicionamento da chicana concêntrica em relação ao tubo de cobre.

A chicana deve ficar paralela com o plano superior, lembrando que essa chicana ficou na posição contrária à da primeira chicana, portanto posicionou-a primeiramente com o mouse antes de quando foi determinado a posição definitiva, figura a.57.

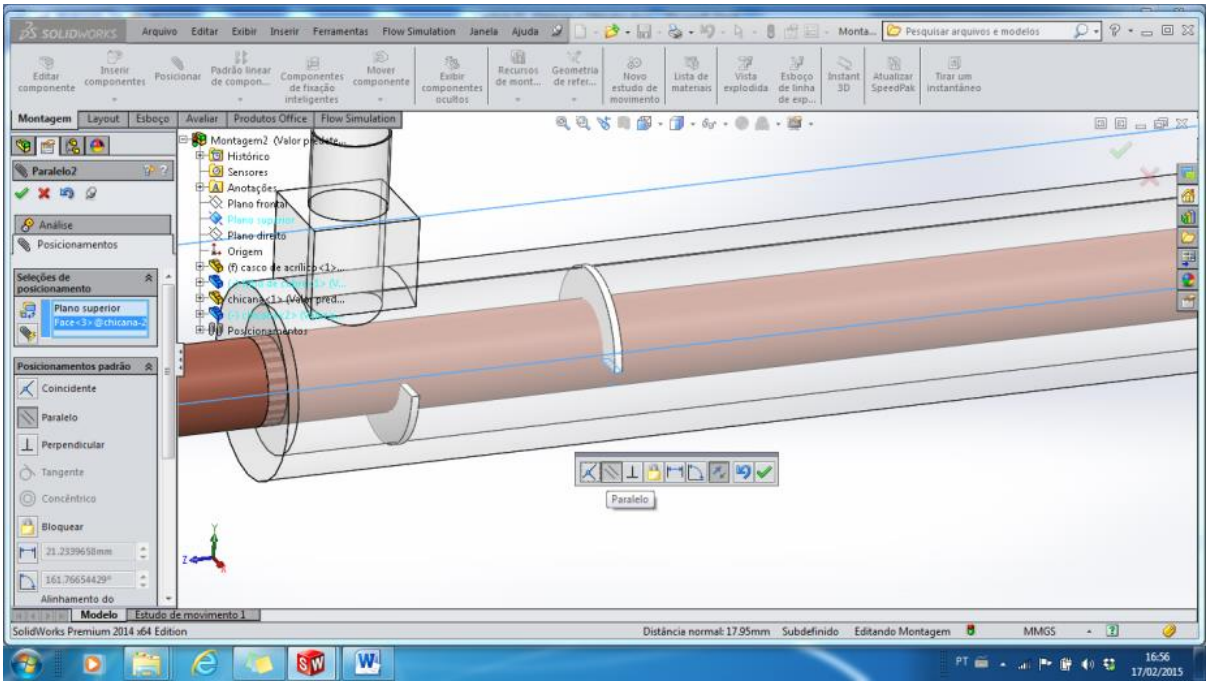


Figura a.57: Posicionamento da chicana – parte horizontal em paralelo com o plano superior note que a segunda chicana fica na parte superior do tubo de cobre.

Agora faltou apenas posicionar a distância entre as chicanas, clicou no botão posicionar e selecionou as faces das duas chicanas, selecionou o comando distância e digitou o valor de 35 mm, deu ok e saiu do comando Posicionar, figura a.58.

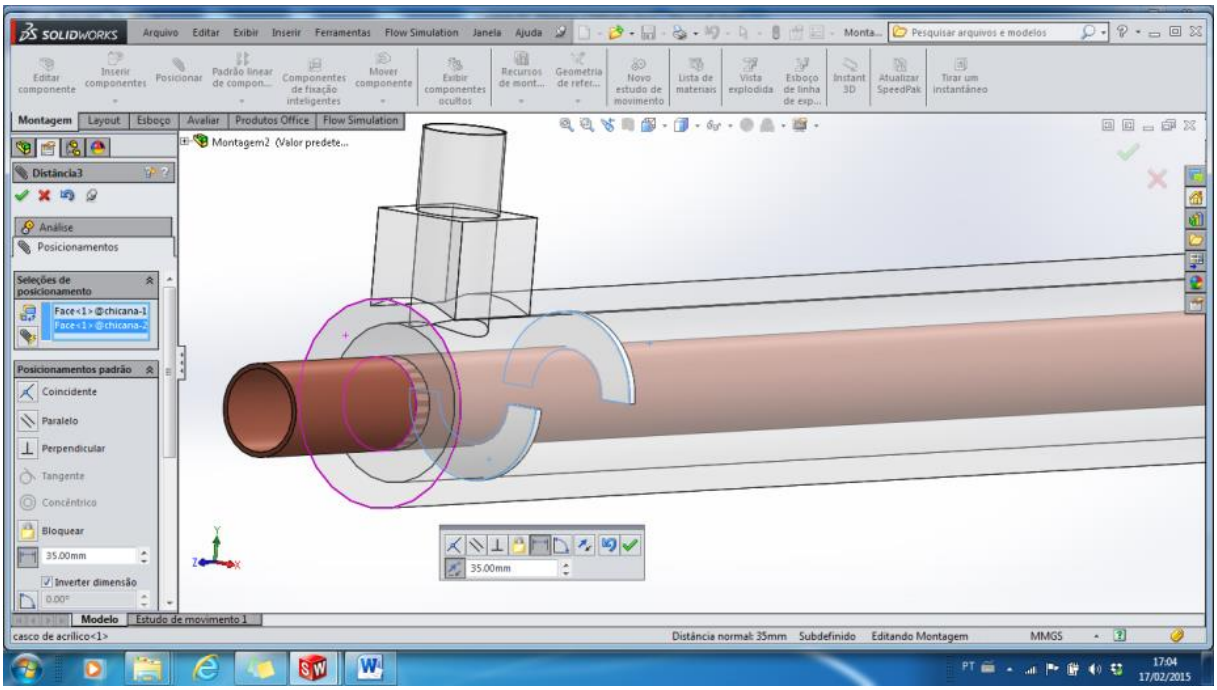


Figura a.58: Posicionamento da distância entre as chicanas – 35 mm

Foi demonstrado como inserir o restante das chicanas utilizou o comando padrão linear de componentes na mesma guia montagem. Começou com o *Menu* Exibir (o menu fica oculto, clique na seta ao lado do nome *Solidworks* e aparecerá o menu, se quiser que ele fique sempre visível clique na tachinha para fixar) e clicou em eixos temporários, apareceu as linhas de centro de cada cilindro, a linha do tubo de cobre foi necessária no próximo comando, conforme a figura a.59.

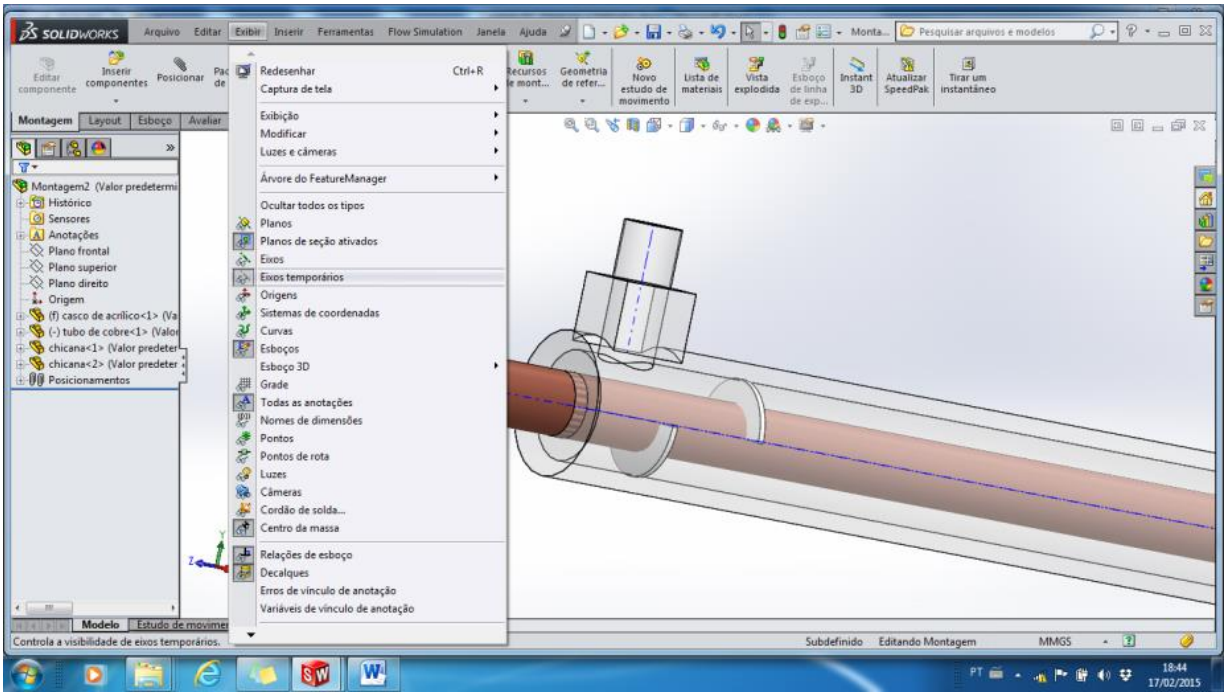


Figura a.59: Exibição dos eixos temporários da montagem.

Clicou-se no Comando Padrão Linear de Componentes, do lado direito e abriu uma janela, clicou-se dentro do retângulo direção1, em direção do padrão selecionou o eixo temporário do tubo de cobre, em espaçamento D1 digitou 70 mm e número de instâncias digitou 13, no retângulo os componentes para o padrão clicou no retângulo abaixo e selecionou a chicana 01, com isso aparecerão às outras chicanas na parte de baixo do tubo de cobre, clicou em ok e o programa fez sair automaticamente do comando, figura a.60.

Para a chicana 02 o procedimento foi similar, entrou novamente no Comando Padrão Linear de Componentes, em direção 1, e selecionou novamente na direção do padrão o eixo temporário do tubo de cobre, no espaçamento D1 digitou 70 mm e número de instâncias digitou 12, no retângulo componentes para padrão clicou no retângulo e selecionou a chicana 2 e finalizando deu ok, figura a.61.

Agora não será mais necessário o eixo temporário, para ocultá-lo basta ir ao Menu Exibir e clique em eixos temporários para desabilitar o comando.

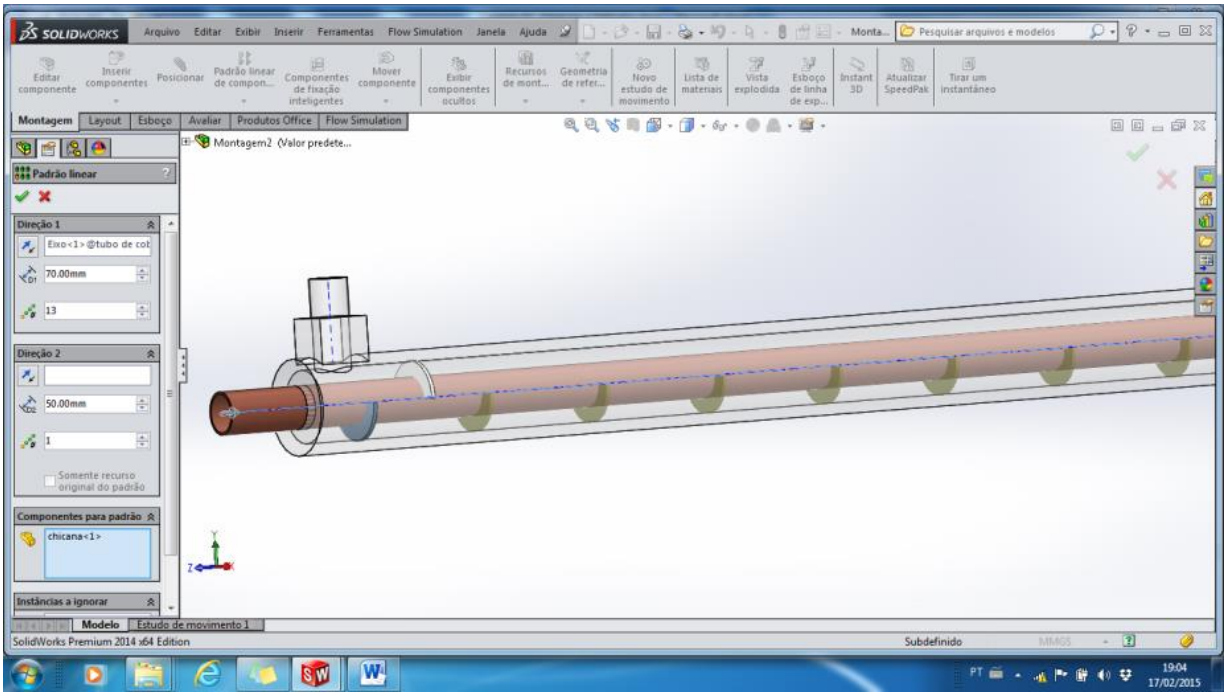


Figura a.60: Número de chicanas reproduzidas na parte inferior do tudo de cobre.

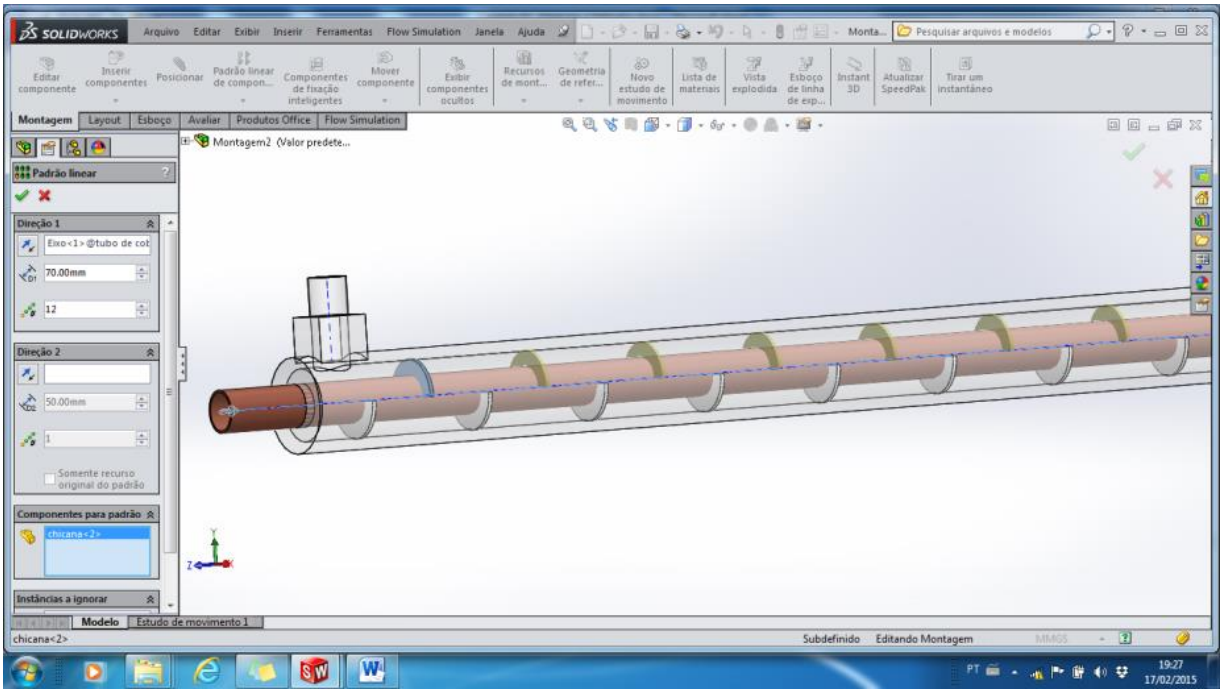


Figura a.61: Número de chicanas reproduzidas na parte superior do tudo de cobre.

Faltou apenas inserir os parafusos e porcas, uma observação é que no modelo real esses parafusos são para unir duas partes com vedação para se efetuar a limpeza do tubo de acrílico quando necessário, ou mesmo a manutenção do dispositivo como, por exemplo, a troca das chicanas, para facilitar a simulação e reduzir o número de cálculos

foi considerada a peça como uma peça inteiriça, foi colocada os parafusos e porcas mesmo que eles não participem da simulação. Foi utilizada a Biblioteca de Projetos que se encontra na guia do lado esquerdo da área de trabalho que é representado por livros, clicou na opção Toolbox e em Adicionar Agora, figura a.62.

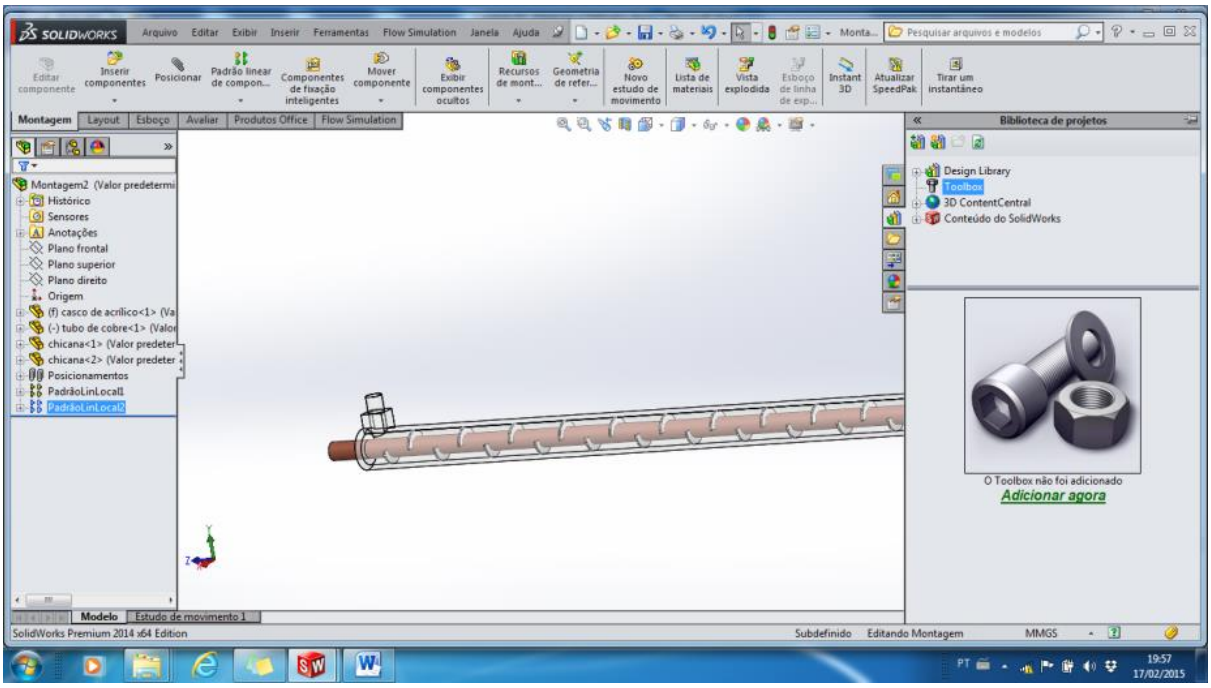


Figura a.62: Biblioteca de projetos com o Toolbox acionado.

Selecionou-se o sistema ISO, figura a.63.

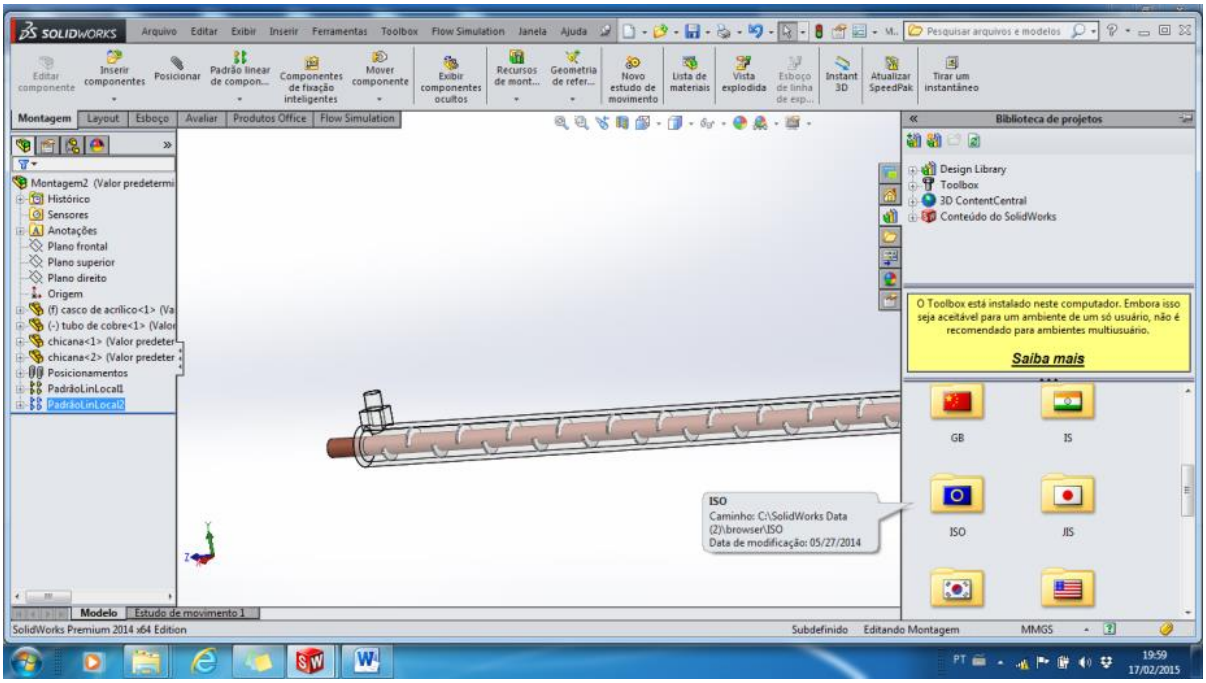


Figura a.63: Biblioteca de projetos com o Toolbox acionado, demonstrando os diversos sistemas em destaque o sistema ISO.

Selecionou a pasta Parafusos, Parafusos Allen de Cabeça Sextavada, Cabeça de Soquete de botão Sextavada ISO 7380, figura a.64.

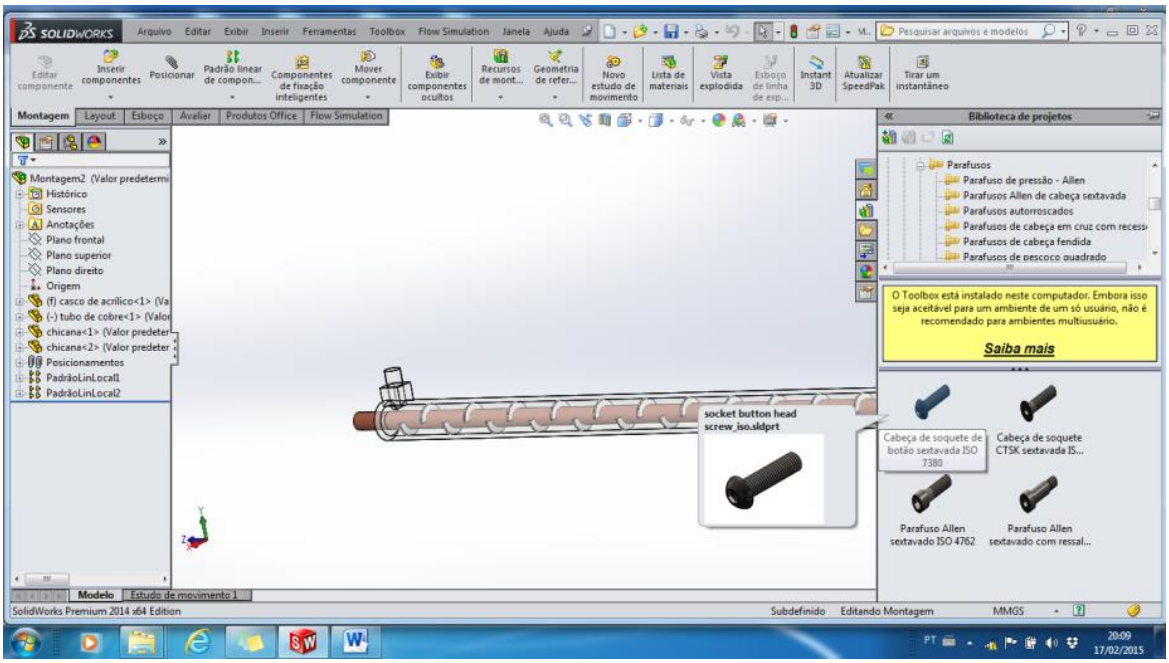


Figura a.64: A seleção do tipo de parafuso na toolbox.

Com o tipo de parafuso que foi selecionado arraste para a área de trabalho, abriu uma janela do lado esquerdo e configurou as dimensões do parafuso, em tamanho: deixou com um M6, Comprimento de 25 mm, selecionando a opção Representação de Rosca Esquemática e clicou em ok e clicou mais três vezes na área de trabalho para obter mais três parafusos, figura a.65.

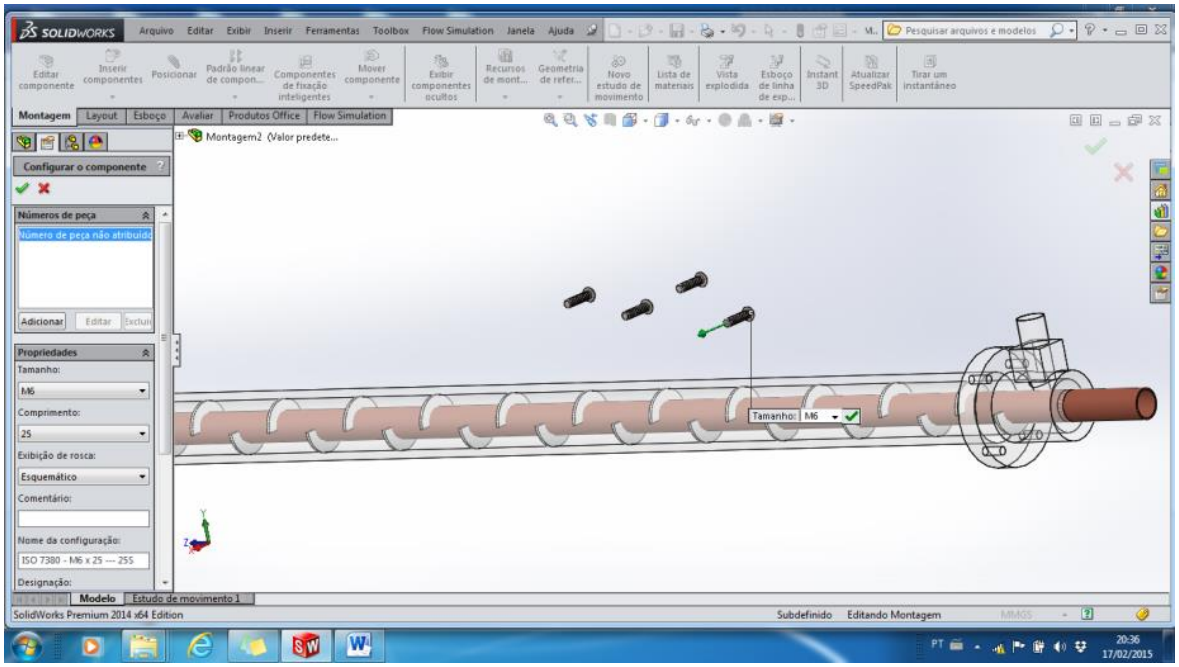


Figura a.65: Configuração do parafuso e dos outros necessários no projeto.

Para inserir a porca, repetimos o procedimento de ir novamente à *toolbox* e desta vez foi selecionado as Porcas Sextavadas – Porca de Flange Sextavada Grau A ISO, figura a.66.

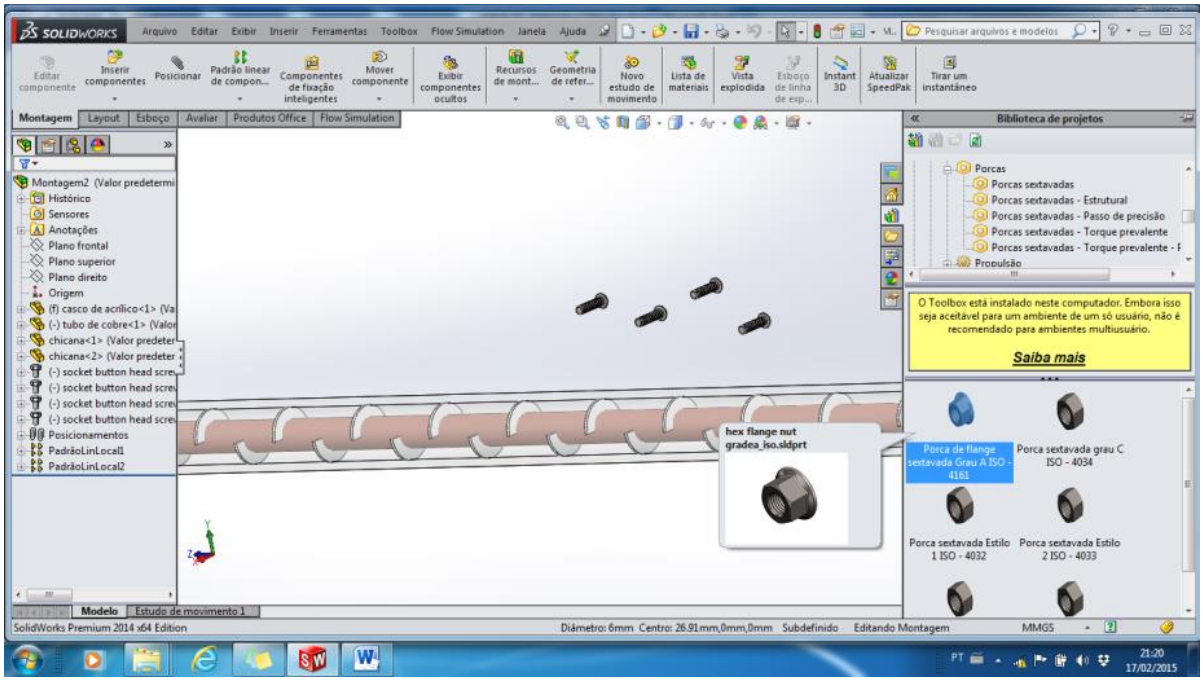


Figura a.66: Configuração da porca sextavada.

Arrastou-se para a área de trabalho e novamente foi aberta uma janela de configuração, tamanho M6 e exibição de rosca: esquemático, deu ok e clicou mais três vezes na área de trabalho para inserir mais três porcas, figura a.67.

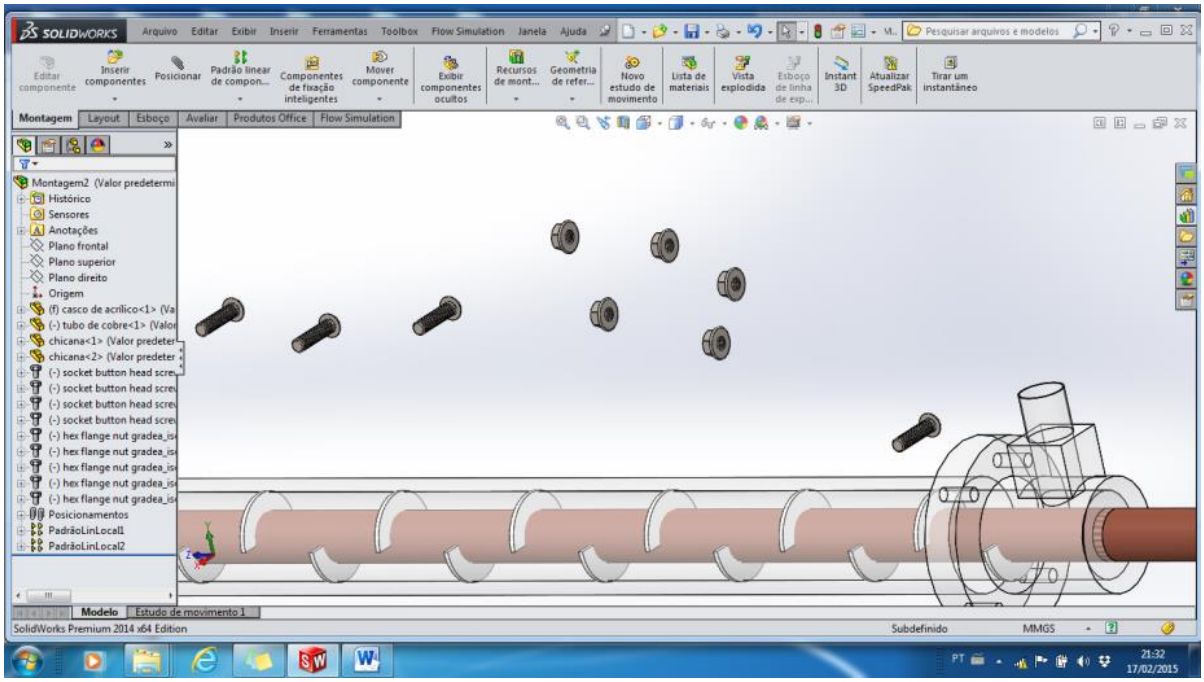


Figura a.67: Porcas e parafusos prontos para serem posicionas nos furos do acrílico.

A última etapa da montagem foi o posicionamento dos parafusos e da porca, clicou no comando Posicionar e selecionou a parte interna do furo no acrílico e a parte externa onde está à rosca do parafuso, concêntrico – se o parafuso estiver na posição contrária clique no botão alinhamento do posicionamento para inverter a posição do parafuso, figura a.68.

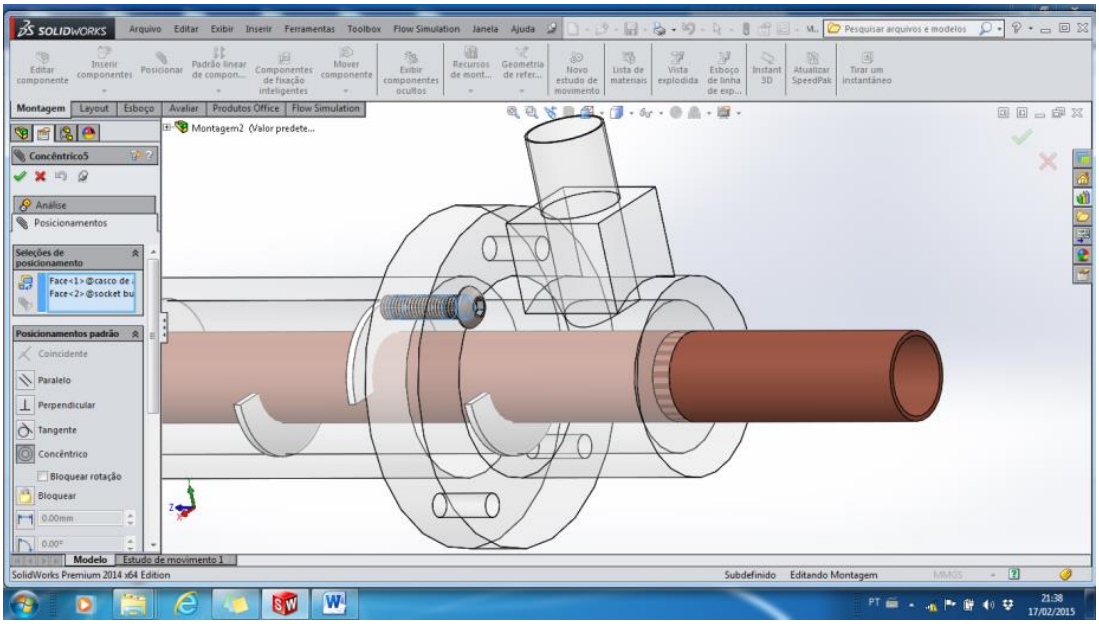


Figura a.68: Posicionamento do parafuso com o furo no acrílico.

Selecionou a face vertical do acrílico e a face lisa da cabeça do parafuso (parte de baixo da cabeça), com comando coincidente selecionado se deu um ok no comando Posicionamento, figura a.69.

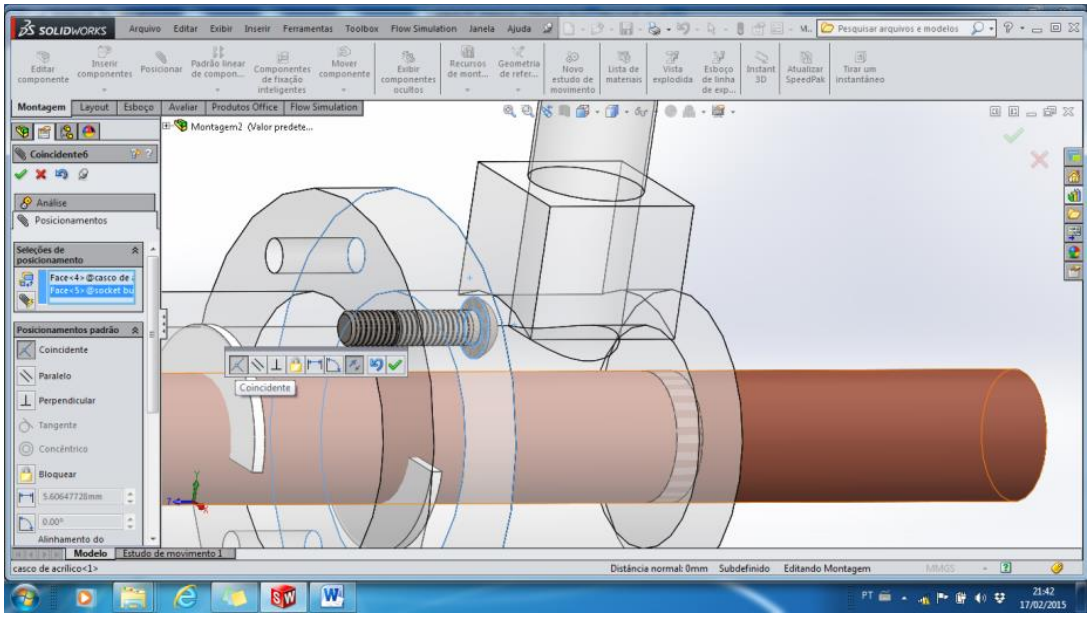


Figura a.69: Posicionamento da face do parafuso.

Posicionou-se a porca, primeiramente não se esqueça de que o comando Posicionar deve estar ativo, selecionou uma parte da rosca interna da porca com a externa do parafuso ficando a opção: concêntrico ativo clicou em ok, figura a.70.

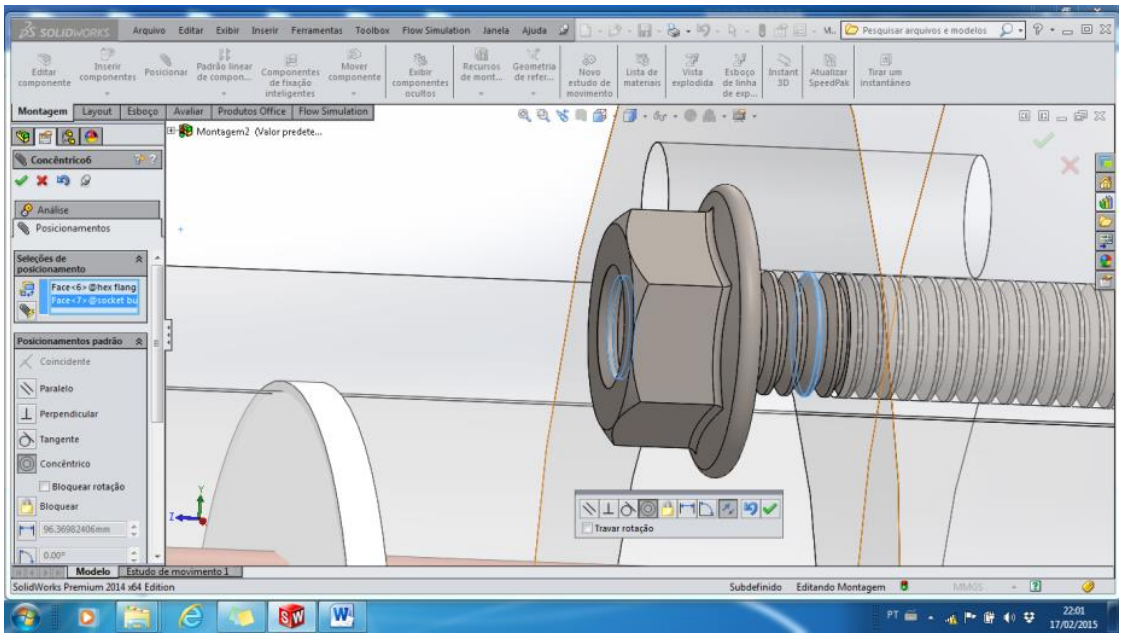


Figura a.70: Posicionamento da rosca da porca a rosca do parafuso.

A última etapa selecionou a face lisa da porca com a face em volta do furo do acrílico, foi ativada a opção coincidente, dê ok e está pronto o furo com parafuso e porca, figura a.71.

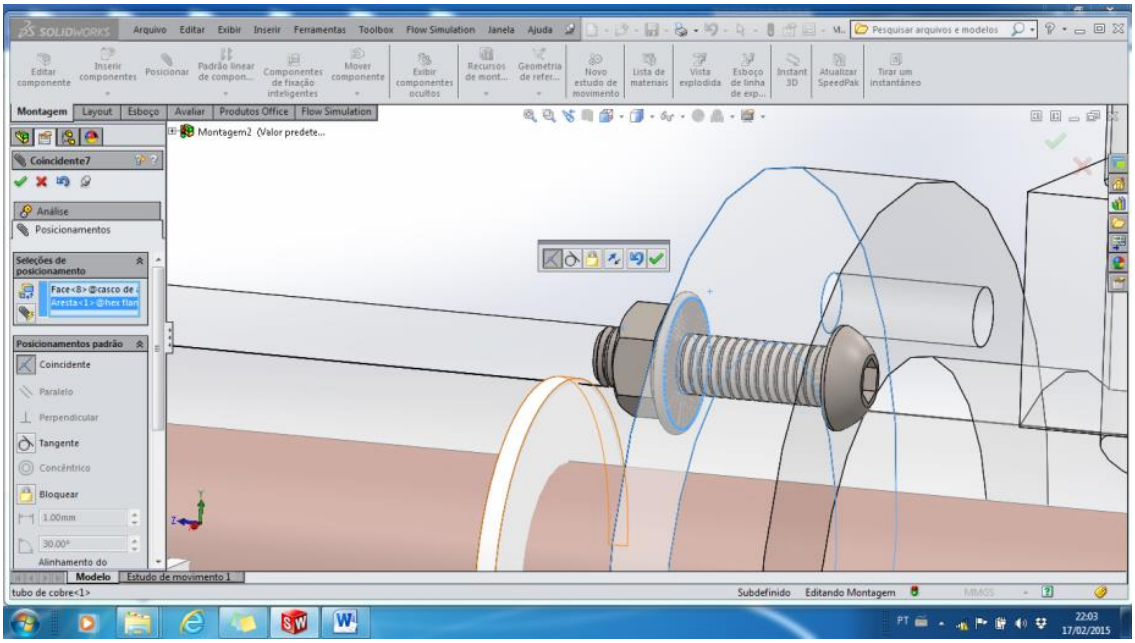


Figura a.71: Posicionamento da face da porca com a face do acrílico.

Foi só repetir o mesmo procedimento com os outros três parafusos e porcas. Neste anexo ficou pronto o trocador de calor modelado e montado, pronto para realizar as simulações necessárias. Figura a.72.

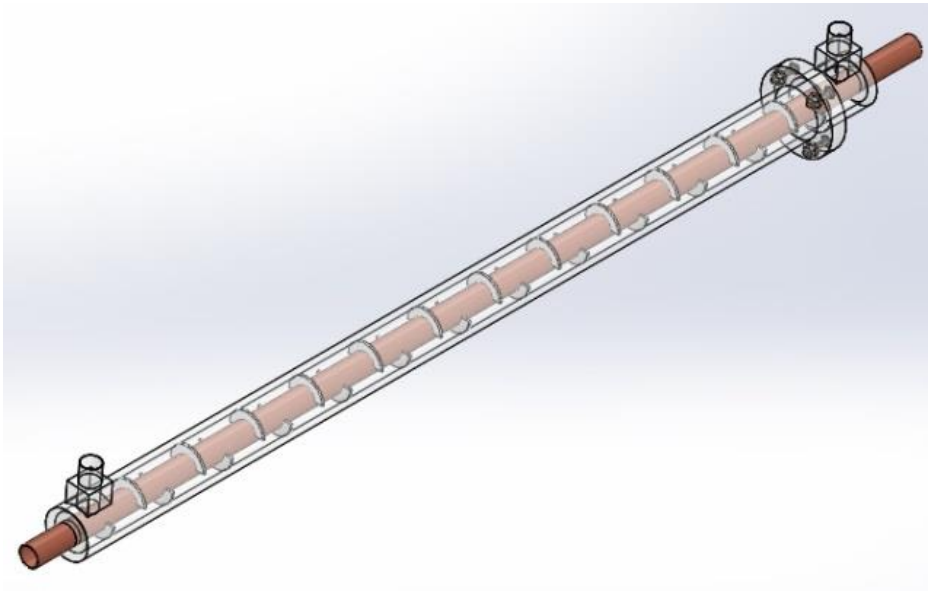


Figura a.72: Modelagem finalizada do trocador de calor, com todas as peças montadas.