



**Júlio de Araújo
Pereira Apa**

**Simulação do escoamento na câmara de injeção de
artefatos de limpeza de um dispositivo inovador de
limpeza *online* de trocadores de calor.**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientadores:

Prof. Maurício N. Frola
Dr. Ivan Fernney Ibañez Aguilar

Rio de Janeiro
Dezembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são devidos aos Professores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, pelos ensinamentos recebidos durante o meu Curso de Engenharia Mecânica e pelo acesso à sua infraestrutura de computação.

Aos meus orientadores do trabalho de conclusão de curso (TCC), Prof. Maurício N. Frota e Dr. Ivan Ibañez Aguilar, agradeço a orientação, escolha do tema e supervisão no uso dos aplicativos SolidWorks e Ansys/Fluent, entendidos como ferramentas computacionais de interesse estratégico em Engenharia Mecânica.

Ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia, agradeço pelo acesso à sua infraestrutura de pesquisa e pela oportunidade de desenvolver o meu TCC em colaboração com o desenvolvimento de uma pesquisa de mestrado em Metrologia.

Ao Mestrando Sergio Luis de La Hoz Truyoll, cuja dissertação de mestrado em Metrologia se desenvolve no mesmo tema, agradeço pelos estímulos e frutíferas discussões sobre o uso das ferramentas computacionais utilizadas.

RESUMO

Simulação do escoamento de um dos fluidos de trabalho de trocadores de calor de hidrogeradores como estratégia de otimização de projeto mecânico de um dispositivo inovador de limpeza online dos tubos do trocador.

O trocador de calor constitui-se em um equipamento crítico do sistema de arrefecimento de diversos equipamentos de processos industriais. A manutenção da sua efetividade, fortemente comprometida pela inevitável acumulação de incrustações nas suas superfícies de transferência de calor, é de fundamental importância para assegurar a eficácia do processo produtivo. Este trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica (TCC) simula o escoamento do fluido de trabalho do trocador de calor (água), que também é o fluido de transporte dos artefatos de limpeza de um dispositivo inovador concebido na PUC-Rio para realizar a limpeza *online* (durante a operação) das superfícies de transferência de calor do trocador de calor, dispositivo esse que permite a limpeza do trocador de calor sem requerer a parada técnica do hidrogerador. A simulação do escoamento realizado cumpriu o propósito de orientar a incorporação de inovações incrementais no projeto construtivo do dispositivo de limpeza *online*, notadamente na câmara de injeção dos artefatos de limpeza utilizados (esferas abrasivas). Duas ferramentas computacionais foram utilizadas no desenvolvimento, um software de CAD 3D desenvolvido pela SolidWorks Corporation (utilizado para construir o projeto mecânico) e o software ANSYS e seus aplicativos utilizados para gerar a malha computacional e a simulação física (solução das equações da continuidade e de Navier Stokes). Os resultados obtidos foram extremamente estratégicos para orientar modificações no projeto construtivo do dispositivo inovador de limpeza de trocadores de calor (em sua versão Modelo OnlineCleaner, de câmaras horizontais, Patente BR102023021858-0, 20/10/2023).

Palavras chaves: Sistema de limpeza online de trocadores de Calor. Artefatos de limpeza. Efetividade de Trocadores de calor Simulação do escoamento do fluido de trabalho do trocador de calor. SolidWorks. ANSYS.

ABSTRACT

Simulation of the flow of one of the working fluids of hydrogenerator heat exchangers as a strategy for optimizing the mechanical design of an innovative *online* cleaning device for the exchanger tubes.

The heat exchanger is a critical equipment for the cooling system in many industrial processes. Its effectiveness maintenance, strongly compromised by the inevitable fouling on the surfaces of the heat exchanger, is of extreme importance to assure effectiveness of the productive process. This Course Conclusion work simulates the flow of the heat exchanger's work fluid (water), which is also the fluid that transports the cleaning artefacts of an innovative device conceived in PUC-Rio to perform the online (during operation) cleaning of the heat exchanging surfaces of the heat exchanger, a device which allows the heat exchanger's cleaning without requiring the technical stop of the hydro generator. The flow simulation accomplished the purpose of guiding the incorporation of incremental innovation in the online cleaning device's constructive project, especially in the injection chamber for the cleaning artefacts used (abrasive spheres). Two computational tools were used in development, a CAD 3D software developed by SolidWorks Corporation (used to build the mechanical project) and the ANSYS Software and its apps used to generate the computational mesh and the physical simulation (solution of the continuity and Navier Stokes equations). The results obtained were extremely strategical to guide the changes in the innovative heat exchanger cleaning device's, OnLineCleaner, Horizontal Chambers Model, constructive project.

Keywords: Heat Exchanger Online Cleaning System. Cleaning Artefacts. Heat Exchanger Efficiency. Heat Exchanger's Work Fluid Flow Simulation. SolidWorks. ANSYS.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Alternativa tecnológica de limpeza de trocadores proposta	10
1.2	Motivação para desenvolvimento deste TCC	13
1.3	Apresentação das câmaras de artefatos de limpeza online	14
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE TROCADORES DE CALOR	17
2.1	Tipos de trocadores de calor	17
2.1.1	Processos de transferência de calor	18
2.1.2	Tipos de trocadores de calor	18
2.2	Fundamentos teóricos	20
3	CÂMARAS DE LIMPEZA DO TROCADOR DE CALOR	23
3.1	Geometria	24
3.2	Modelagem matemática	27
3.2.1	Parâmetros da simulação/propriedades do fluido	28
3.2.2	Condições de contorno	29
3.2.3	Modelo numérico	30
4	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	31
4.1	Campos de magnitude de velocidade e componentes	31
4.2	Linhas de corrente da velocidade	34
4.3	Campo de pressão	36
4.4	Campo de intensidade turbulenta	38
4.5	Síntese dos resultados	39
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	42
5.1	Conclusões	42
5.2	Recomendações	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
	APÊNDICE A – GERAÇÃO DO VOLUME DE CONTROLE	45
	APÊNDICE B – GERAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL E SEU REFINAMENTO	

Lista de Figuras

Figura 1.1 Acoplamento do equipamento de limpeza online desenvolvido por pesquisadores da PUC-Rio aos tramos de entrada e de saída da água de resfriamento do trocador de calor (acoplamento realizado por meio de mangueiras flexíveis e engates rápidos).....	11
Figura 1.2 Comprovação experimental da Eficácia da técnica de limpeza <i>online</i>	12
Figura 1.3 Vista parcial do equipamento de limpeza online, mostrando em destaque as câmaras de injeção e de recuperação dos artefatos de limpeza	14
Figura 2.1 Classificação de trocadores de calor	17
Figura 2.2 Trocador de calor água-ar, de tubos aletados de fluxo cruzado.	19
Figura 3.1 Interligação entre as câmaras de injeção e recuperação dos artefatos de limpeza. Exemplo de circuito hidráulico do escoamento de transporte dos artefatos.	23
Figura 3.2 Projeto gráfico da câmara de injeção associada ao protótipo preliminar.....	25
Figura 3.3 Projeto gráfico da câmara de injeção associada ao protótipo modificado	25
Figura 3.4 Desenho técnico gerado pelo software Solidwoks da versão original da câmara de injeção associada ao protótipo preliminar.	26
Figura 3.5 Desenho técnico gerado pelo software Solidwoks da versão modificada da câmara de injeção associada ao protótipo aprimorado.	27
Figura 4.1 Magnitude do campo de velocidade no plano A da versão original da câmara de injeção.....	31
Figura 4.2 Magnitude do campo de velocidade no plano A da versão modificada da câmara de injeção.....	32
Figura 4.3 Componente Z do campo de velocidade no plano A da versão original da câmara de injeção.....	32
Figura 4.4 Componente Z de velocidade no plano A da versão modificada da câmara de injeção	33
Figura 4.5 Componente Y de velocidade no plano A da versão original da câmara de injeção.....	33
Figura 4.6 Componente Y de velocidade no plano A da versão modificada da câmara de injeção.....	33

Figura 4.7 Componente Z do campo de velocidade no plano B da versão. Imagem da esquerda: escoamento na versão original da câmara; imagem da direita: escoamento na versão modificada da câmara.....	34
Figura 4.8 Linhas de corrente da versão original da câmara de injeção.....	35
Figura 4.9 Linhas de corrente da versão modificada da câmara de injeção.....	35
Figura 4.10 Campo de pressão associado ao escoamento na câmara original	36
Figura 4.11 Campo de pressão associado ao escoamento na câmara modificada.....	37
Figura 4.12 Campo de pressão na câmara de injeção (projeto original), com fracionamento das regiões.....	38
Figura 4.13 Campo de pressão na câmara de injeção (projeto modificado), com fracionamento das regiões.	38
Figura 4.14 Campo de intensidade turbulenta no plano A da câmara original.....	39
Figura 4.15 Campo de intensidade turbulenta no plano A da câmara modificada.....	39
Figura 4.6 Interface do Workbench do ANSYS	45
Figura 4.7 Tela da versão Student (2023 R2), do aplicativo Ansys, mostrando o volume de controle do escoamento a ser simulado.....	46
Figura 4.8 Volume de controle da versão original da câmara de injeção e volume da massa de fluido submetido ao processo de simulação pelo Ansys/Fluent.	47

NOMENCLATURA

Símbolo	Significado	Unidade
ρ	Massa específica	kg/m^3
v	Velocidade	m/s
a	Aceleração	m/s^2
g	Gravidade	m/s^2
p	Pressão	Pa
∇	Operador Gradiente	$1/m$
F	Força	N
μ	Viscosidade Dinâmica	m^2/s
T	Temperatura	K
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor	W
\dot{m}	Vazão Mássica	kg/s
c_p	Calor específico a pressão constante	$J/(kg \cdot K)$
U	Coefficiente de Troca de calor	$W/(m^2 \cdot K)$
h	Coefficiente de troca de calor por convecção	$W/(m^2 \cdot K)$
R	Resistência térmica	K/W
A	Área	m^2
L	Comprimento	m
D	Diâmetro	m
k	Condutividade térmica	$W/m \cdot K$
ε	Eficiência	$\%$
	Efetividade do trocador de calor	-

1 INTRODUÇÃO

O acúmulo indesejado, porém, inevitável, de resíduos e incrustações nas superfícies de transferência de calor de equipamentos térmicos (e.g., trocadores de calor, chillers de equipamentos de refrigeração) causa resistência térmica no processo de transferência de calor podendo impactar drasticamente na efetividade desses equipamentos e nos custos de bombeamento dos fluidos refrigerantes. Sabidamente é complexo o fenômeno de formação de incrustação (*fouling*), cujas causas são as mais variáveis, desde a rápida proliferação de matéria viva ou inorgânica que se acumulam e rapidamente se proliferam nas superfícies de transferência de calor (Bott, 1997), bem como processos não controláveis de decantação do fluido de trabalho e/ou pela presença de contaminantes nos fluidos de trabalho desses equipamentos acessórios do sistema de arrefecimento de equipamentos de processo industrial (Frota et al., 2013; 2014 e 2021).

Os problemas associados à incrustação do trocador de calor são conhecidos desde a criação do primeiro trocador de calor. No início da revolução industrial vários problemas apareceram em equipamentos que geram vapor devido ao acúmulo de resíduos em caldeiras. Esse acúmulo causava o aumento da temperatura das caldeiras levando a sua falha e impondo severos riscos à instalação e a seus operadores.

Na busca por processos mais seguros e eficazes de transferência de calor em equipamentos industriais, fabricantes e projetistas de trocadores de calor passaram a considerar no *design* de seus equipamentos técnicas de mitigação de incrustações, visando ganhos de efetividade e redução de riscos de acidente e paradas técnicas inesperadas de manutenção.

1.1 Alternativa tecnológica de limpeza de trocadores proposta

Dentre outras iniciativas de pesquisa relacionadas às metodologias de limpeza de trocadores de calor, um grupo de pesquisa do Programa de Metrologia da PUC-Rio vem desenvolvendo e aprimorando um equipamento de limpeza *online* de trocadores de calor que apresenta vantagens quando comparado às tecnologias convencionais (denominadas tecnologias *off-line*) de limpeza de trocadores de calor. Embora o equipamento concebido pela PUC-Rio já tenha sido submetido a uma prova

de conceito e validado com base em resultados de ensaios realizados em campo (Frota et al., 2023; Rios et al., 2022; Frota et al., 2021), o seu projeto construtivo vem passando por melhorias incrementais visando otimizar sua eficácia na remoção da incrustação que se acumula nos tubos do trocador durante o seu funcionamento, comprometendo a sua eficácia de funcionamento.

O protótipo do equipamento foi validado pelo seu acoplamento a um dos seis trocadores de calor do sistema de arrefecimento de um dos hidrogeradores (44 MW) de uma usina hidrelétrica operada pela concessionária Light Energia S.A. (Usina Fontes Nova, Piraí, RJ). Os experimentos realizados permitiram comprovar não apenas ser possível realizar a limpeza *online* sem a necessidade de parada técnica da turbina (i.e., sem interromper a geração) mas, também, comprovar a eficácia do dispositivo de limpeza *online* (i.e., técnica capacidade de remover incrustações acumuladas nos tubos do trocador), ilustrado na Figura 1.1.



Figura 1.1 Acoplamento do equipamento de limpeza online desenvolvido por pesquisadores da PUC-Rio aos tramos de entrada e de saída da água de resfriamento do trocador de calor (acoplamento realizado por meio de mangueiras flexíveis e engates rápidos).

Conforme comprovado por resultados de ensaios experimentais de monitoramento do trocador realizados durante após 90 dias de operação, e cujos resultados encontram-se resumidos na Figura 1.2, o equipamento de limpeza foi capaz, em uma única operação, comprovar a eficácia da tecnologia alternativa proposta .

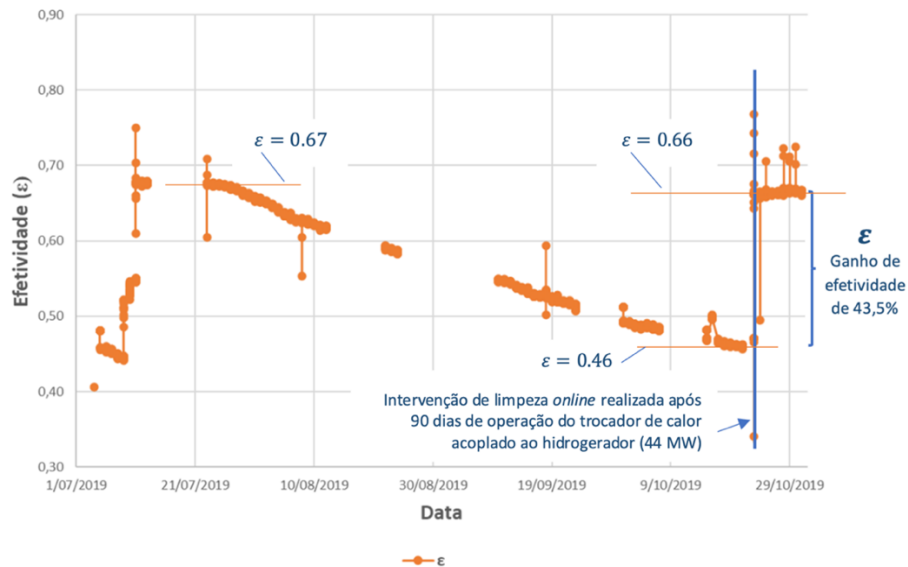


Figura 1.2 Comprovação experimental da Eficácia da técnica de limpeza *online*

Fonte: Frota et al., Proceedings of the Heat Exchangers Fouling and Cleaning Conference (HTRI, 2019).

Em outras palavras, ao longo dos 90 dias de monitoramento, o valor da efetividade do trocador de calor, originalmente avaliado em $\epsilon = 0,67$ no início do ensaio de monitoramento, sofreu forte redução, atingindo o valor de $\epsilon = 0,46$, resultado do inevitável processo acumulativo de incrustação nas paredes internas dos tubos do trocador. Conforme comprovado, após o acoplamento do trocador ao equipamento inovador de limpeza *online*, a efetividade do trocador praticamente recuperou 100% da efetividade perdida, retornando ao valor $\epsilon = 0,66$, imediatamente após a intervenção de limpeza *online* realizada, o que foi conseguido após a realização de apenas alguns ciclos de limpeza. Resultados esses apresentados numa conferência mundial de trocadores de calor realizada que reúne, a cada dois anos, fabricantes e estudiosos de trocadores de calor (Frota et. al, 2019). Não obstante este ensaio ter sido realizado para uma única operação de intervenção após um longo período de funcionamento do trocador de calor, o propósito da tecnologia alternativa proposta é manter o dispositivo de limpeza em operação contínua, assim evitando que a incrustação ainda incipiente se cristalice e deposite nas paredes internas dos tubos do trocador de calor, portanto preservando elevados valores de efetividade durante todo o período de funcionamento do trocador de calor. O valor da efetividade é calculado com base no balanço térmico entre os fluidos de trabalho do trocador, conforme demonstrado no capítulo seguinte deste TCC, que apresenta uma síntese dos fundamentos da teoria de trocadores de calor.

1.2 Motivação para desenvolvimento deste TCC

Três foram as motivações para desenvolver este TCC em engenharia mecânica: (i) contribuir para o esforço de agregar inovações incrementais ao equipamento concebido pela PUC-Rio; (ii) trabalhar em colaboração ao desenvolvimento de uma pesquisa de mestrado em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da universidade, responsável pela concepção desta inovadora tecnologia de limpeza *online* de trocadores de calor e (iii) aprimorar conhecimentos e prática no uso de ferramentas computacionais de interesse estratégico para um engenheiro mecânico.

No curso dos desenvolvimentos de otimização dos tramos hidráulicos do protótipo do dispositivo automatizado de limpeza *online* de trocadores de calor, modificações radicais foram introduzidas nas câmaras de injeção e de recuperação dos artefatos de limpeza, entendidas como componentes centrais do dispositivo concebido. Adicionalmente, modificações construtivas incrementais foram introduzidas nos tramos hidráulicos que interligam essas câmaras aos dutos de entrada e de saída do fluido frio de trabalho do trocador, no presente caso, água. O projeto mecânico de alteração das câmaras de artefatos de limpeza e dos tramos hidráulicos foi desenvolvido fazendo-se uso de um software de engenharia (Solidworks) para modelagem sólida, entendido como ferramenta computacional eficaz de projeto de equipamentos. Após a otimização do projeto e implementadas as modificações, optou-se por desenvolver a simulação numérica do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza no interior da câmara de injeção dos artefatos de limpeza, cujos desenvolvimentos orientaram este trabalho de TCC.

Já no que concerne o estudo teórico objeto deste TCC, o trabalho de simulação do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza fez uso de um sofisticado software de dinâmica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD), que resolve as equações de conservação de massa e energia e de quantidade de movimento no volume de controle no fluido que preenche os tramos hidráulicos e as referidas câmaras de injeção e de recuperação. Enquanto o software SolidWorks gera a geometria do escoamento (via construção do projeto mecânico), o software Ansys Fluent, permite gerar a malha computacional, assim disponibilizando um volume de controle fluido que permite a simulação e visualização do escoamento no interior das câmaras acessórias do equipamento de limpeza *online*. O software

Ansys Fluent resolve as complexas equações que governam o escoamento, conforme será discutido em seção específica deste trabalho.

Conforme será demonstrado, o alcance dessa pesquisa transcende os interesses de curto prazo de reduzir perdas de carga nos tramos do equipamento de limpeza. Embora o estudo concentre-se em trocadores de calor usados na geração de energia hidroelétrica, as contribuições podem ser relevantes e aplicáveis a uma ampla variedade de setores industriais e aplicações tecnológicas, que fazem uso de trocadores de calor em seus sistemas de arrefecimento de processos industriais.

1.3 Apresentação das câmaras de artefatos de limpeza online

De forma sucinta, esta seção apresenta as câmaras de injeção e de recuperação dos artefatos de limpeza que integram o equipamento de limpeza *online* de trocadores de calor, selecionadas como objeto da simulação desenvolvida como tema deste projeto de conclusão de curso de engenharia Mecânica (TCC). Esta descrição tem por objetivo orientar o entendimento da simulação CFD (*Computation Fluid Dynamics*) de um dos fluidos de trabalho do trocador de calor (água, que é o “fluido frio”), que, por sua vez, é o fluido de transporte dos artefatos de limpeza. Conforme discutido neste capítulo, essas câmaras sofreram modificações visando otimizar a hidrodinâmica do escoamento no seu interior, assim agregando inovações radicais e incrementais no equipamento de limpeza *online*, visando torná-lo mais eficiente e operacional.

As imagens da Figura 1.3 mostram, em ângulos distintos, vistas superiores do equipamento de limpeza *online*, colocando em destaque as duas câmaras do equipamento e os tramos hidráulicos que as interconectam.

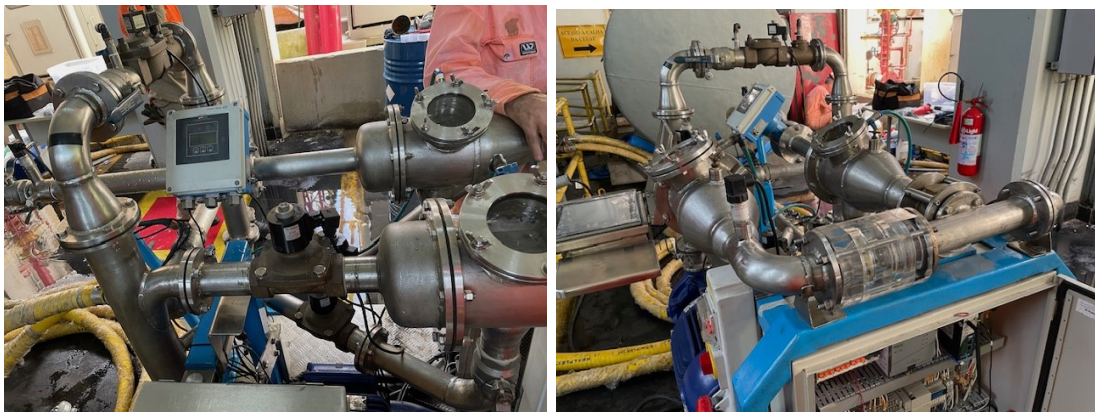


Figura 1.3 Vista parcial do equipamento de limpeza online, mostrando em destaque as câmaras de injeção e de recuperação dos artefatos de limpeza

Conforme mostrado, o dispositivo é bem flexível, permitindo, pelo manejo de eletroválvulas de comando automatizado, criar diferentes fluxos, em diferentes sentidos, assim viabilizando não apenas os desejáveis ciclos de limpeza *online* do trocador de calor, como ciclos de transposição dos artefatos de limpeza de volta à câmara de injeção e ciclos de lavagem dos artefatos, realizados após cada ciclo de limpeza pela sua movimentação de ida e volta entre as câmaras de injeção e de recuperação. As imagens permitem visualizar os circuitos hidráulicos que interconectam as duas câmaras. Na imagem da esquerda, a câmara de recuperação de artefatos de limpeza é a que está conectada em série com o medidor de vazão (marca Endress+Hauser), que mede a vazão do fluido de transporte de artefatos após estes circularem pelos tubos do trocador antes de retornarem à câmara de recuperação. O tramo de entrada da câmara de recuperação passa por uma eletroválvula que, quando acionada, permite a injeção dos artefatos de limpeza na chicana de entrada dos tubos do trocador pela ação de uma bomba hidráulica. Dentre os possíveis modos de funcionamento do equipamento três são as opções de fluxo: (i) fluxo principal, que transporta os artefatos de limpeza diretamente para a chicana do trocador de calor, antes passando pelo contador óptico eletrônico e por um dispositivo comutador de fluxo; (ii) fluxo de transposição, que permite resgatar os artefatos de limpeza da câmara de recuperação de volta para a câmara de injeção após cada ciclo de limpeza e (iii) fluxos, em ambos os sentidos, entre as câmaras de injeção e de recuperação, procedimento esse que pode ser repetido (via parametrização no sistema de automação) tantas vezes quantas forem necessárias para desprender dos artefatos a incrustação que foi removida dos tubos do trocador pelo processo de limpeza *online*.

No curso de desenvolvimento do TCC, modificações foram introduzidas pela equipe de pesquisadores da Metrologia no projeto das câmaras para suavizar o escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza no seu interior e, por conseguinte, a redução de perdas de carga localizadas, o que foi conseguido alterando a geometria e a posição das grades (peneiras) utilizadas para barrar os artefatos de limpeza quando necessário. Conforme evidenciado nas figuras abaixo, no caso da câmara de injeção, o estudo desenvolvido no âmbito deste TCC cumpriu o propósito de avaliar o impacto das duas telas (duas peneiras posicionadas perpendicularmente entre si) para impedir que os artefatos de limpeza fossem ou

descartados pelo tubo interior de descarga ou que retornassem, em sentido reverso, para o duto de recalque da bomba hidráulica. Em ambas as câmaras (de injeção e de recuperação), os tubos de drenagem originais (tubo soldado diretamente ao corpo da câmara) foram substituídos por uma conexão soldada a um segmento de tubo, modificação que suavizou o escoamento no tramo de descarga posicionado na parte inferior das câmaras. Cabe ainda observar que, no interior da conexão de entrada do tipo “cap” foi inserido um tronco de cone para suavizar o escoamento de entrada na câmara (embora o cone inserido no interior da conexão “cap” não apareça na foto ele é mostrado nas figuras dos projetos modificados de ambas as câmaras).

O próximo capítulo apresenta uma breve síntese da teoria de trocadores de calor, formulando os fundamentos básicos necessários ao encaminhamento da simulação do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza no interior da câmara de injeção dos artefatos de limpeza do dispositivo de limpeza *online* de trocadores de calor, objeto deste TCC.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE TROCADORES DE CALOR

Com o propósito de contextualizar o encaminhamento do trabalho de simulação de um dos fluidos de trabalho do trocador de calor, este capítulo apresenta, de forma extremamente sucinta, os diferentes tipos de trocadores de calor e os fundamentos da teoria necessários ao cálculo da sua efetividade.

2.1 Tipos de trocadores de calor

Um trocador de calor é um equipamento acessório, geralmente sem partes móveis, que integra o sistema de arrefecimento de outros equipamentos de processo industrial. Sua função é viabilizar a transferência de energia (calor) entre seus fluidos de trabalho (usualmente dois, comumente denominados fluidos “quente” e “frio” do trocador), gerando um efeito de refrigeração no equipamento de processo.

Os trocadores de calor podem ser classificados de acordo com o processo de transferência de calor ou de acordo com o tipo de construção, como ilustrado na Figura 2.1.

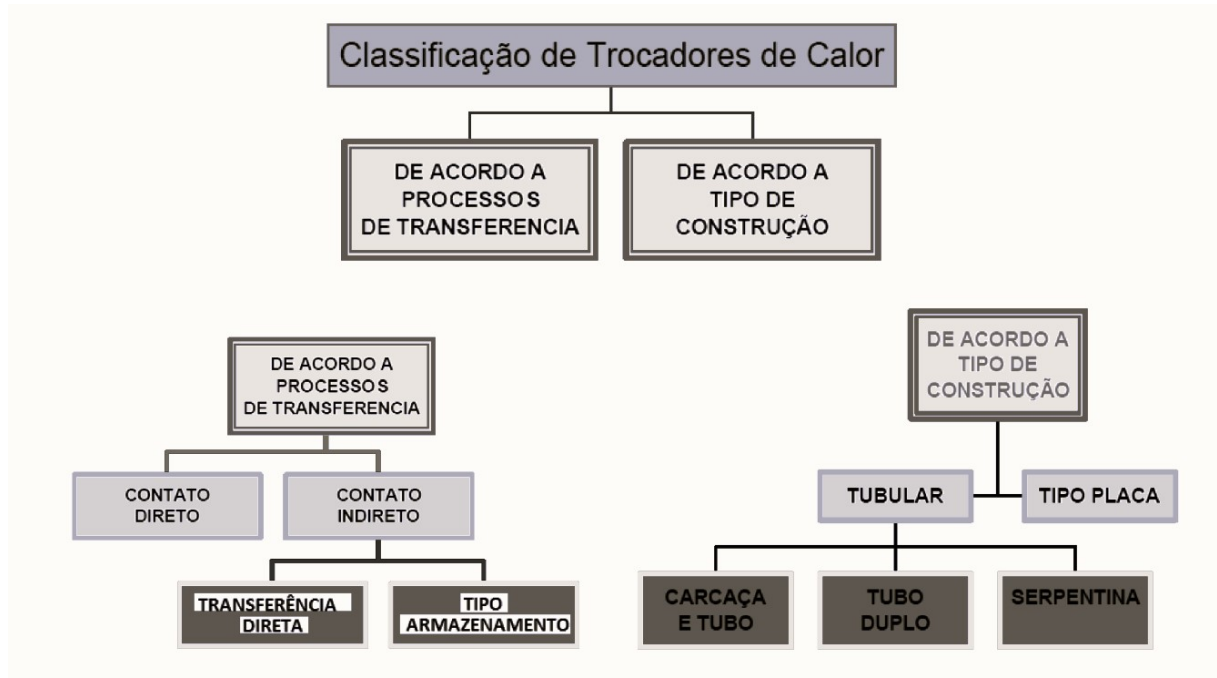


Figura 2.1 Classificação de trocadores de calor

Fonte: https://www2.ufjf.br/washington_irrazabal/files/2014/05/Aula-23_Trocadores-de-Calor.pdf

2.1.1 Processos de transferência de calor

Em um trocador de contato direto ocorre a mistura dos 2 fluidos o que resulta em uma maior taxa de transferência de calor e usualmente em construções relativamente baratas.

Já para trocadores de contato indireto não há contato entre os fluidos tendo em vista que eles são separados por paredes. Eles podem ser de 2 tipos:

- Transferência direta
- Armazenamento

O trocador de transferência direta apresenta um fluxo contínuo de calor durante todo o processo ocorrendo através de uma parede.

Em um trocador de calor de armazenamento ambos os fluidos percorrem o mesmo caminho. Primeiramente o fluido quente escoar pela passagem transferindo o calor para a matriz. Após isso, o fluido frio passa pelo mesmo caminho recebendo o calor armazenado.

2.1.2 Tipos de trocadores de calor

Na maioria das aplicações industriais, os trocadores de calor podem ser de placas planas (horizontais ou verticais) ou do tipo tubular (carcaça e tubo; tubo duplo e serpentina).

No trocador de calor do tipo carcaça e tubo, apenas um fluido flui pelo tubo enquanto o outro escoar externamente aos tubos, pelo interior da carcaça do trocador. Dentre os muitos arranjos possíveis, existe também o trocador de tubos concêntricos, utilizado em trocadores de calor em que ambos os fluidos de trabalho do trocador são líquidos, um fluido escoar pelo tubo interno e o outro pelo espaço anular entre os tubos.

O trocador do tipo serpentina possui uma ou mais serpentinas de tubos circulares posicionadas dentro de uma carcaça. Um fluido escoar pela carcaça enquanto o outro pelas serpentinas.

O trocador de calor de placas é constituído por algumas placas que podem ser planas (horizontais ou verticais), lisas ou onduladas. Esse tipo de trocador de calor tende a ser mais compacto e não suporta pressões elevadas.

Muitas são as classificações de trocadores de calor utilizadas para as diversas aplicações industriais e comerciais disponíveis, cujo análise extrapola os interesses deste trabalho de TCC. Apenas para ilustrar um dos muitos tipos de trocador de calor que foge aos tipos convencionais discutidos acima, a Figura 2.2 mostra um trocador cuja superfície de transferência de calor entre seus fluidos de trabalho constitui-se de um feixe de 75 tubos aletados (25.4 mm de diâmetro interno, 2.000 mm de comprimento) verticais, utilizado para resfriar o cabeamento elétrico e os dispositivos de indução eletromagnética de um hidrogerador. Neste trocador, água (“fluido frio” do trocador) circula em quatro passes pelo interior dos tubos e o ar (“fluido quente”) flui em escoamento cruzado (i.e., perpendicular e externamente aos tubos) para cumprir o papel de fluido refrigerante do núcleo do gerador. O uso de chicanas instaladas nas extremidades do feixe de tubos direciona a água para grupos de tubos (passes), assim permitindo grandes áreas de troca de calor, porém mantendo o trocador compacto. Este trocador de calor foi mencionado pois foi o utilizado para validar o dispositivo de limpeza *online* de trocadores concebido pela PUC-Rio e objeto de estudo neste TCC.

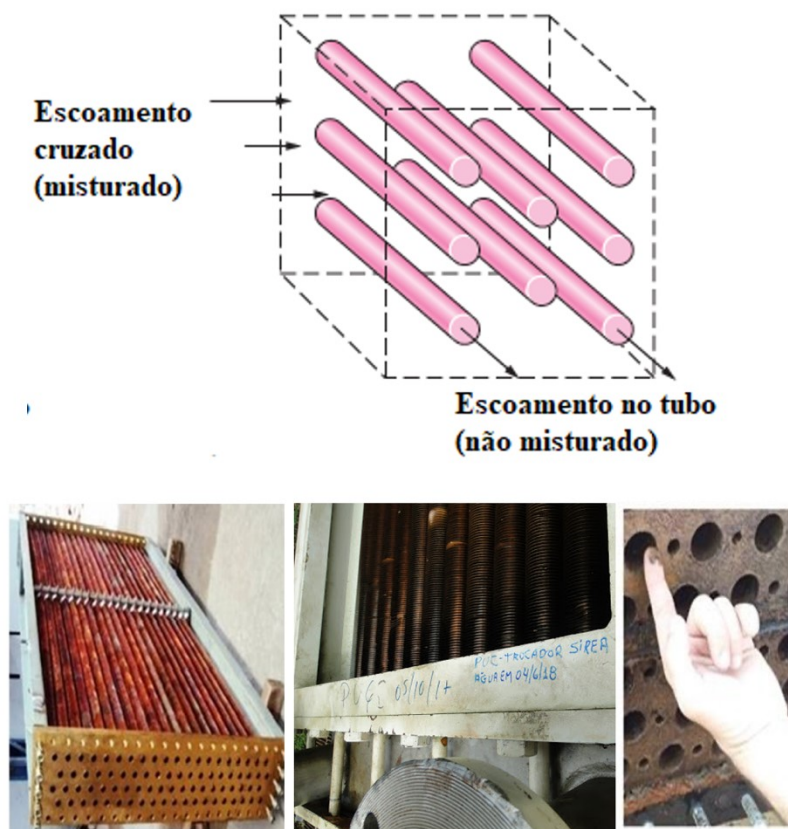


Figura 2.2 Trocador de calor água-ar, de tubos aletados de fluxo cruzado.

Na Figura 2.2, a imagem superior ilustra o princípio de funcionamento enquanto as imagens inferiores mostram detalhes do trocador: à esquerda a vista frontal; a imagem central um “zoom” dos tubos aletados e a imagem da direita o indesejável depósito de “fouling” que se acumula nos tubos do trocador e que comprometem a sua eficácia operacional. O propósito do dispositivo de limpeza de trocadores é evitar a interrupção e a desmontagem do trocador durante a sua manutenção de limpeza.

2.2 Fundamentos teóricos

Para o trocador de calor do tipo escoamento cruzado, em que a água (fluido frio) escoam em 6 passes pelo interior de 75 tubos aletados de 23 mm de diâmetro interno, 1,9 m de comprimento, e ar (fluido quente) escoam externamente e transversalmente aos tubos do trocador—, a transferência de calor entre os fluidos de trabalho do trocador pode ser calculada pela equação do balanço de energia entre esses fluidos, dada pela Equação (2.1).

$$\dot{Q}_w = \dot{Q}_a = \dot{Q} = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{w,out} - T_{w,in}) = \dot{m}_a c_{p,a} (T_{a,in} - T_{a,out}) \quad (2.1)$$

Nesta expressão, T denota as temperaturas de entrada e de saída dos fluidos de trabalho, devidamente identificadas pelos índices w (água), a (ar), in (medida na entrada), out (medida na saída). As siglas \dot{m}_w , \dot{m}_a , denotam, respectivamente, a vazão mássica da água e do ar, enquanto $c_{p,w}$ e $c_{p,a}$, referem-se aos calores específicos a pressão constante desses fluidos de trabalho.

Alternativamente, a transferência de calor entre os fluidos de trabalho pode ser calculada em função do Coeficiente Global de transferência de calor e da diferença de temperatura média logarítmica entre esses fluidos, dada pela equação (2.2).

$$\dot{Q} = UA \frac{[(T_{a,in} - T_{w,out}) - (T_{a,out} - T_{w,in})]}{\ln \left(\frac{(T_{a,in} - T_{w,out})}{(T_{a,out} - T_{w,in})} \right)} \quad (2.2)$$

A área A corresponde a área de troca do lado externo dos tubos. O coeficiente Global de Transferência de Calor U pode ser calculado pela combinação de

resistências térmicas impostas ao processo de troca de calor, dado pela equação (2.3).

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{h_a \cdot A_a} + \frac{1}{h_w \cdot A_w} + R_{wall} + R_{fouling} \quad (2.3)$$

Em que a resistência térmica na parede do tubo é calculada pela expressão (2.4)

$$R_{wall} = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi kL} \quad (2.4)$$

Nestas expressões, L é o comprimento do tubo; D_i e D_o são os diâmetros interno e externo do tubo; k é a condutividade térmica do material do tubo; R_{wall} a resistência térmica da parede do trocador de calor enquanto $R_{fouling}$, denota a resistência ao fluxo de calor imposta pela presença das impurezas acumuladas na superfície interna da tubulação.

O acúmulo de impurezas na superfície dos tubos do trocador de calor é considerado também como uma resistência térmica para a transferência de calor, que pode ser calculada pela equação 2.5.

$$R_{fouling} = \left(\frac{1}{U_{dirty}} - \frac{1}{U_{clean}} \right) \cdot \frac{1}{A} \quad (2.5)$$

Sendo U_{dirty} o coeficiente de troca de calor encontrado antes da limpeza de um trocador de calor e U_{clean} o coeficiente de troca de calor calculado após a limpeza.

A efetividade do trocador de calor é calculada pela razão entre a quantidade de calor efetivamente trocada entre os fluidos de trabalho do trocador e a quantidade máxima que poderia ser trocada em condições termodinamicamente ideais, dada pela equação (2.6).

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{C_h(T_{h,in} - T_{h,out})}{C_{min}(T_{h,in} - T_{c,in})} = \frac{C_c(T_{c,in} - T_{c,out})}{C_{min}(T_{h,in} - T_{c,in})} ; 0 \leq \varepsilon < 1 \quad (2.6)$$

$$C = \dot{m} \cdot c_p \quad (2.7)$$

Sendo C_h e C_c as capacidades térmicas do fluido quente e frio, respectivamente, e C_{min} a menor capacidade térmica entre os 2 fluidos.

3 CÂMARAS DE LIMPEZA DO TROCADOR DE CALOR

Estudos de simulação foram realizados para auxiliar no projeto de um sistema de limpeza de trocador de calor. A simulação objetivou orientar melhorias incrementais no equipamento, mais especificamente eliminar perdas de carga desnecessárias que impactam nos custos de bombeamento. E, ainda mais importante, eliminar zonas localizadas de turbulência e recirculação de fluidos no interior das câmaras de artefatos de limpeza, que dificultam a navegação dos artefatos de limpeza no curso de sua injeção no interior dos tubos do trocador de limpeza para realizar ao processo de limpeza *online*.

A Figura 4.1 apresenta uma imagem construída em Solidworks da interconectividade das duas câmaras de artefatos, que circulam pela ação do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza pelo interior do equipamento. No contexto do escopo deste trabalho de TCC, a simulação se restringiu à simulação do escoamento do interior de uma dessas duas câmaras, mais especificamente no interior da câmara de injeção, porém analisando duas versões dos projetos construtivos, antes da implementação das melhorias incrementais e após a sua inclusão. Como parâmetros básicos de entrada no software Fluent/Ansys, ambas as simulações numéricas fizeram uso de dados experimentais medidos de vazão e pressão realizados em experimentos com o equipamento acoplado ao trocador de calor de um hidrogerador, tal qual ilustrado pela Figura 1.1.

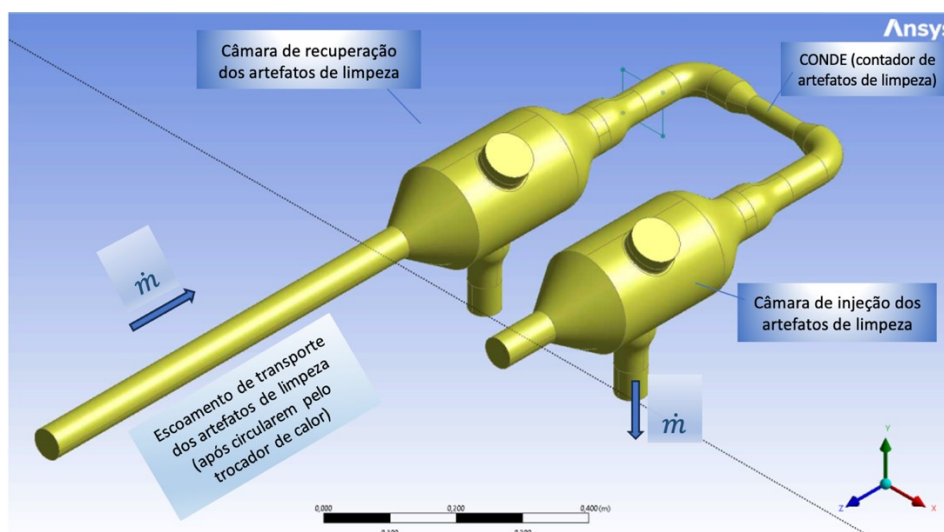


Figura 3.1 Interligação entre as câmaras de injeção e recuperação dos artefatos de limpeza. Exemplo de circuito hidráulico do escoamento de transporte dos artefatos.

Cabe observar que, embora o dispositivo concebido cumpra o propósito de limpeza *online* de trocadores de calor, portanto envolvendo transferência de energia na forma de calor, as simulações realizadas são restritas ao escoamento no interior da câmara de injeção, considerado isotérmico já que a transferência de calor é localizada na região dos tubos internos do trocador, cuja simulação é objeto da pesquisa de mestrado em metrologia que se desenvolve em paralelo ao desenvolvimento deste trabalho de TCC.

3.1 Geometria

O processo de modelagem requer a definição do escoamento a ser simulado, no caso, o escoamento no interior das duas versões (projeto original e modificado) da câmara de injeção de artefatos de limpeza. Como ponto de partida, fez-se necessário modelar a versão do projeto do protótipo original. Na sequência, e com base nas lições aprendidas, a simulação foi repetida para a versão da câmara utilizada no protótipo modificado.

Para efeito da simulação, o trabalho considerou a câmara como uma composição das diferentes peças que a integram. E, na sequência, considerou a montagem da câmara pela integração das partes que a compõem. Essa montagem trava o posicionamento das peças a partir de relacionamentos definidos entre as próprias peças, permitindo determinar que as duas faces sejam coincidentes ou que os dois furos sejam concêntricos.

A partir da montagem consegue-se realizar a montagem final da câmara para compor o modelo. As Figuras 3.2 e 3.3, a seguir, ilustram as imagens dos projetos original e modificado da câmara de injeção de artefatos de limpeza, mostrando, em destaque, no seu interior, as duas peneiras perpendiculares entre si, que são os elementos mais impactantes no escoamento no interior de ambas as versões (projeto original e modificado) da câmara de injeção de artefatos de limpeza. Já as Figuras 3.4 e 3.5 apresentam as lâminas dos respectivos desenhos técnicos, também gerados pelo software Solidworks, dos respectivos projetos construtivos, mostrados com suas dimensões reais.

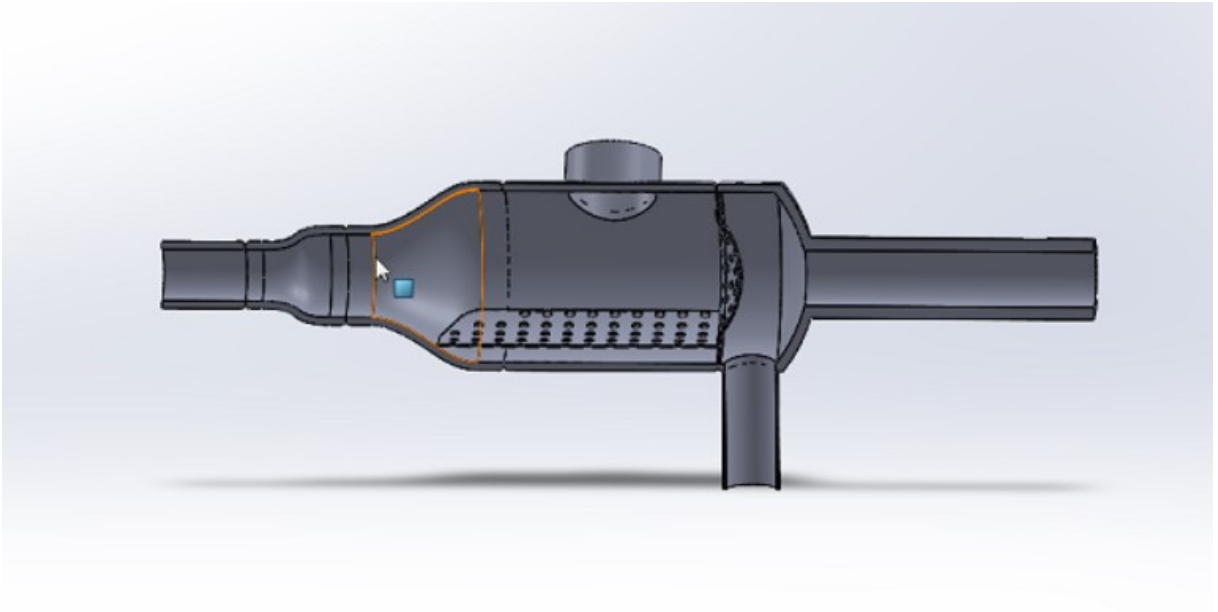


Figura 3.2 Projeto gráfico da câmara de injeção associada ao protótipo preliminar

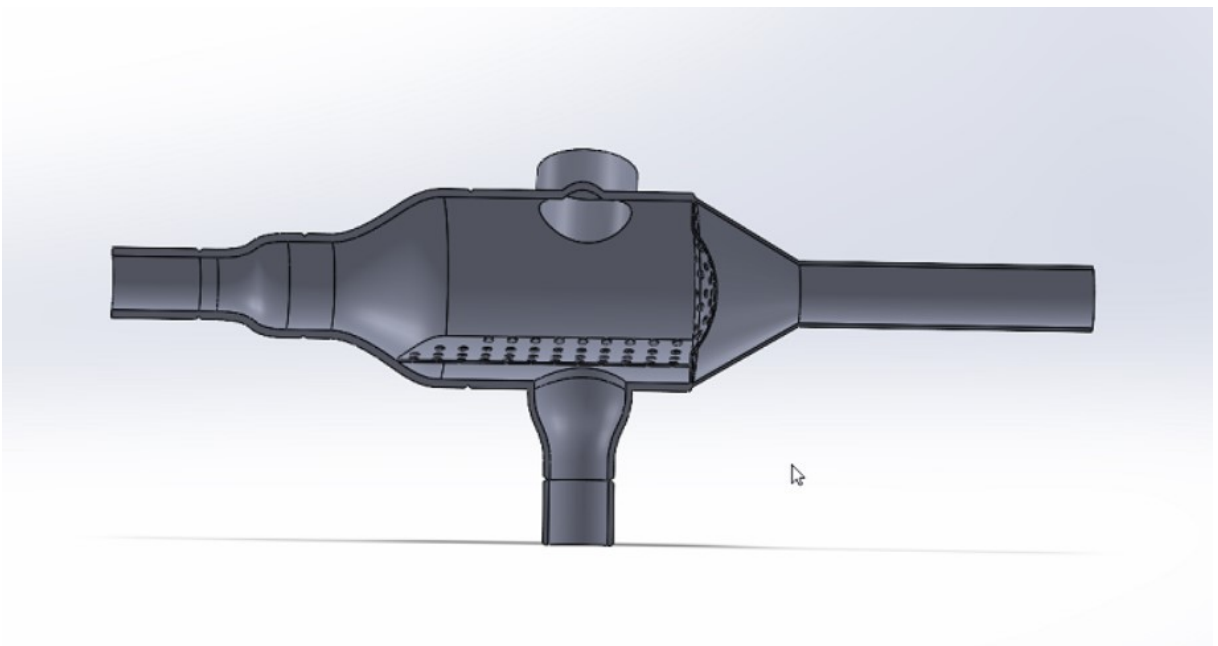


Figura 3.3 Projeto gráfico da câmara de injeção associada ao protótipo modificado

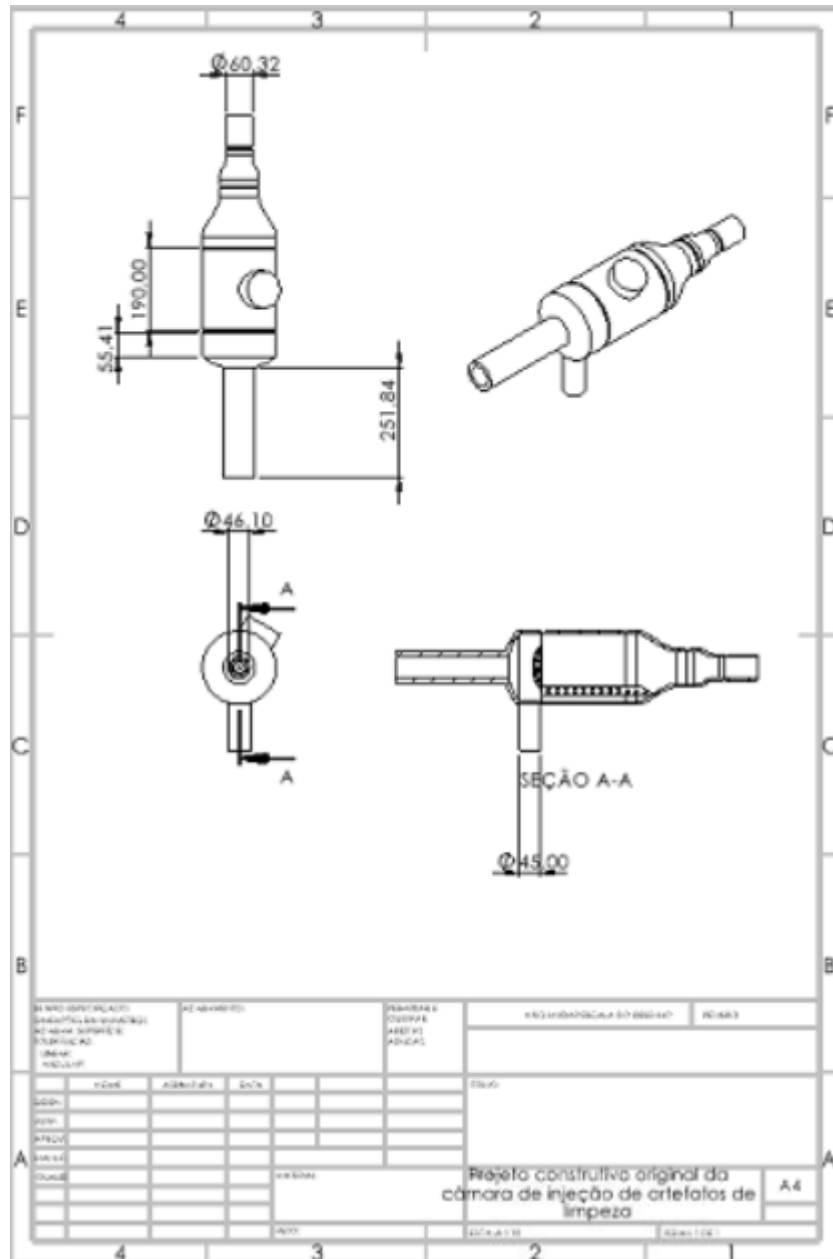


Figura 3.4 Desenho técnico gerado pelo software Solidwoks da versão original da câmara de injeção associada ao protótipo preliminar.

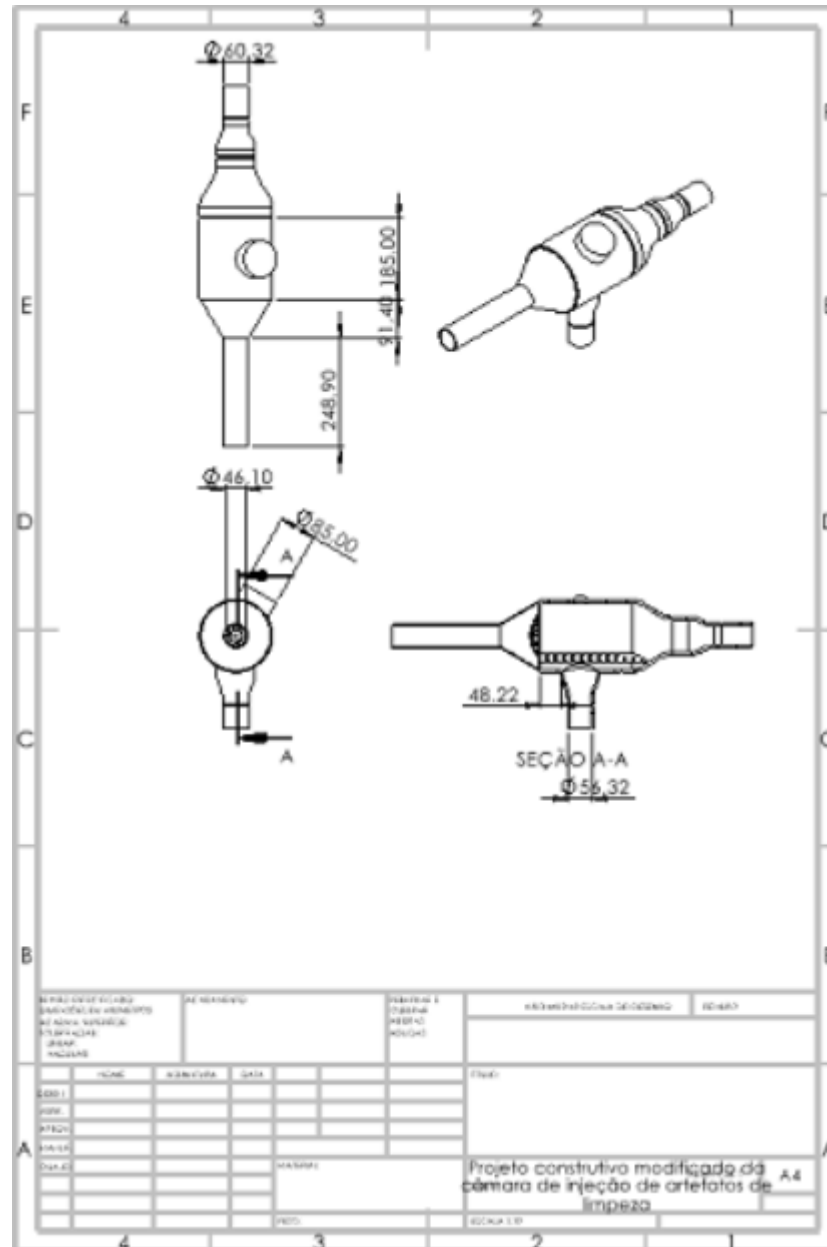


Figura 3.5 Desenho técnico gerado pelo software Solidwoks da versão modificada da câmara de injeção associada ao protótipo aprimorado.

3.2 Modelagem matemática

O escoamento a ser resolvido apresenta as seguintes características: escoamento turbulento de fluido incompressível (água), isotérmico, propriedades constantes do fluido de trabalho objeto da simulação ($\rho = 998,2$; $\mu = 0,001003$; $c_{p,água} = 1,07 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, regime permanente, fluido Newtoniano e escoamento tridimensional.

Já que o escoamento a ser resolvido é turbulento, faz-se necessário resolver um modelo de turbulência para captar o comportamento turbulento que é intrínseco ao escoamento. Neste TCC optou-se por utilizar o enfoque de média de Reynolds (RANS – Reynolds Average Navier-Stokes) (Pope, 2000).

As equações de conservação de quantidade de movimento linear e de conservação de massa que descrevem as hipóteses descritas são apresentadas a seguir.

$$\frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.2)$$

Nestas equações, u_i refere-se aos componentes do vetor velocidade, ρ é a densidade, x_i são os eixos de referência, μ indica a viscosidade molecular, μ_t é a viscosidade turbulenta, g é a aceleração gravitacional e p é a pressão modificada dada por,

$$p = P + \frac{2}{3} \rho \kappa + \rho_o \vec{g} \cdot \vec{r} \quad (3.3)$$

Na equação acima, P denota pressão termodinâmica e κ a energia cinética turbulenta. O modelo de turbulência utilizado foi o modelo k- ω SST (Menter, 1994).

A simulação propriamente dita do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza requer dois tipos de parametrização: parâmetros da simulação/propriedades do fluido de trabalho e dados de entrada (e.g., vazão na entrada e pressão na saída).

3.2.1 Parâmetros da simulação/propriedades do fluido

O módulo de gravidade do Fluent foi acionado no cálculo de escoamento na direção do eixo Y, eixos evidenciados na Figura 4.1, com o valor de -9.81 m/s^2 .

Foi definido também o método de especificação da turbulência a partir da sua intensidade, que foi definida para 5%, e a razão da viscosidade turbulenta, escolhida como 10. Esses parâmetros são necessários para a resolução das equações das variáveis turbulentas.

3.2.2 Condições de contorno

A imagem da Figura 4.14 ilustra o acoplamento da câmara de injeção com o duto de recalque da bomba hidráulica que pressuriza os tramos do dispositivo inovador de limpeza online concebido pela PUC-Rio, assim gerando o escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza objeto de investigação neste TCC.

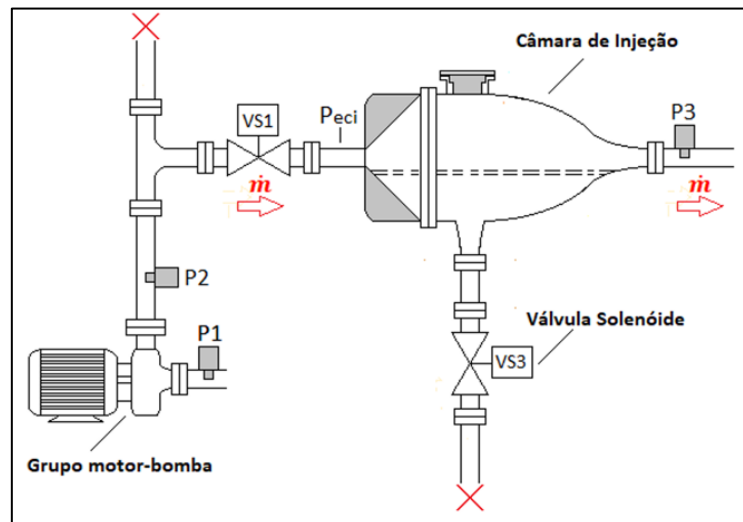


Figura 3.6 Esquemático para definição dos dados de entrada da simulação

Fazendo uso de dados experimentais obtidos em experimentos de acoplamento do dispositivo de limpeza *online* de trocadores de calor a um dos trocadores de uma usina hidrelétrica de 44 MW de capacidade de geração de energia elétrica, os valores de duas grandezas físicas foram definidas como dados de entrada requeridos pelo processo de simulação do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza: (i) a vazão volumétrica de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ (medida em experimento, que corresponde à uma vazão mássica de $5,55 \text{ kg/s}$ de água) e (ii) a pressão na saída da câmara de injeção, adotado como o valor da pressão atmosférica, já que no experimento realizado a saída da câmara de injeção estava aberta para o meio ambiente; ou seja, pressão manométrica parametrizada com o valor zero.

3.2.3 Modelo numérico

Para o modelo numérico foi importada uma malha de elementos computacionais a partir da montagem 3D realizada no SolidWorks para ambas as versões da câmara de injeção. Os passos realizados para a obtenção dessa malha que consta com aproximadamente 1,5 milhão de elementos estão descritos nos apêndices A e B.

Uma vez inseridas as parametrizações acima indicadas, que caracterizam o fluido de trabalho e os dados de entrada (vazão e pressão nas seções de entrada e de saída), faz-se necessário definir outros parâmetros intrínsecos (associados à convergência do método numérico utilizado).

O esquema SIMPLEC foi selecionado para o acoplamento velocidade- pressão. Os esquemas de discretização para a resolução das diversas equações foram definidos para “*Second Order Upwind*” para a maioria, “*Second Order*” para pressão e “*Least Squares Cell Based*” para gradiente.

O critério de convergência escolhido foi de 10^{-4} para as equações de continuidade de movimento e 10^{-3} para as equações de conservação de massa. Para ajudar na convergência foram também definidos fatores de subrelaxamento, 0,5 para densidade, 0,4 para forças corporais, energia cinética turbulenta e taxa específica de dissipação e 0,3 para momento e viscosidade turbulenta.

Para completar o processo de parametrização, resta definir o número de iterações e o modelo de turbulência escolhido, tendo sido realizadas 5.000 iterações, o que assegurou que o programa apresentou excelente desempenho operacional, tempo adequado de convergência para um baixo valor de resíduo (10^{-4} para as equações de quantidade de movimento linear e 10^{-3} para conservação de massa) para cada uma das equações de governo resolvidas.

Inicialmente foi escolhido o modelo de turbulência $k - \varepsilon$, posteriormente substituído pelo modelo $k - \omega$ SST, já que com o primeiro a solução se mostrou instável e a convergência não foi obtida.

4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Os campos de velocidade e pressão no interior da câmara de injeção são analisados a seguir.

4.1 Campos de magnitude de velocidade e componentes

Visando identificar o comportamento geral dos padrões do escoamento nas duas versões da câmara de injeção foram analisados os campos da magnitude de velocidade e seus componentes em planos de interesse, um perpendicular (plano A) e outro paralelo (plano B) ao escoamento principal, que é evidenciado visto na figura 3.6.

Para as duas versões construtivas da câmara de injeção, as Figuras 4.1 e 4.2 ilustram o campo de magnitude de velocidade no plano A. A observação dessas figuras mostra que, de uma forma geral, os níveis máximos e mínimos da velocidade são similares nas duas câmaras. Contudo, as principais diferenças ocorreram na região posterior da peneira vertical, região em que claramente se observa um escoamento em jato bem-comportado para o caso do projeto modificado da câmara de injeção, contrastando-se com fortes indícios de zonas de recirculação para o caso do projeto original da câmara. Com o intuito de confirmar se a câmara original apresenta maiores níveis de recirculação, a investigação incluiu o estudo computacional dos componentes do campo de velocidade, assim disponibilizando informações adicionais para validar a conclusão.

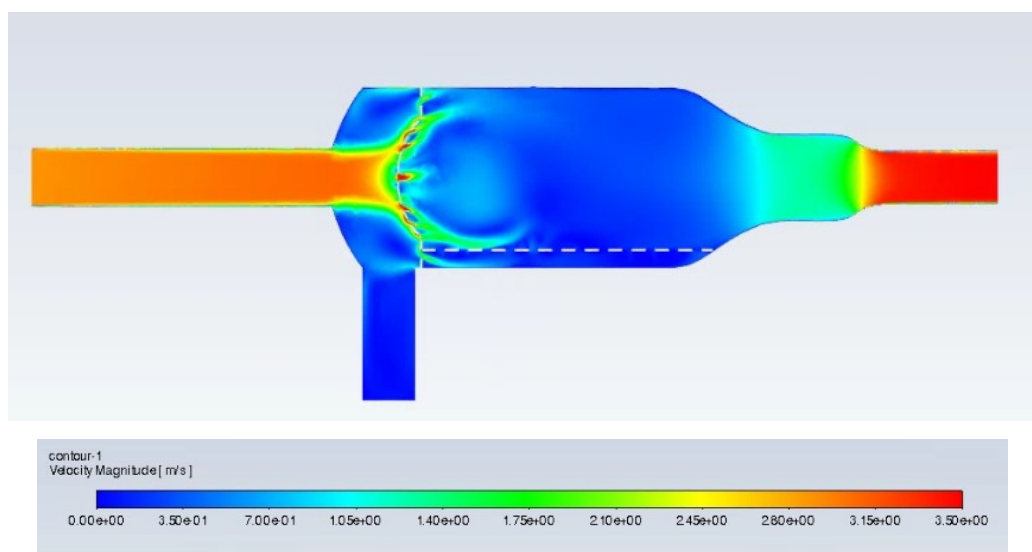


Figura 4.1 Magnitude do campo de velocidade no plano A da versão original da câmara de injeção.

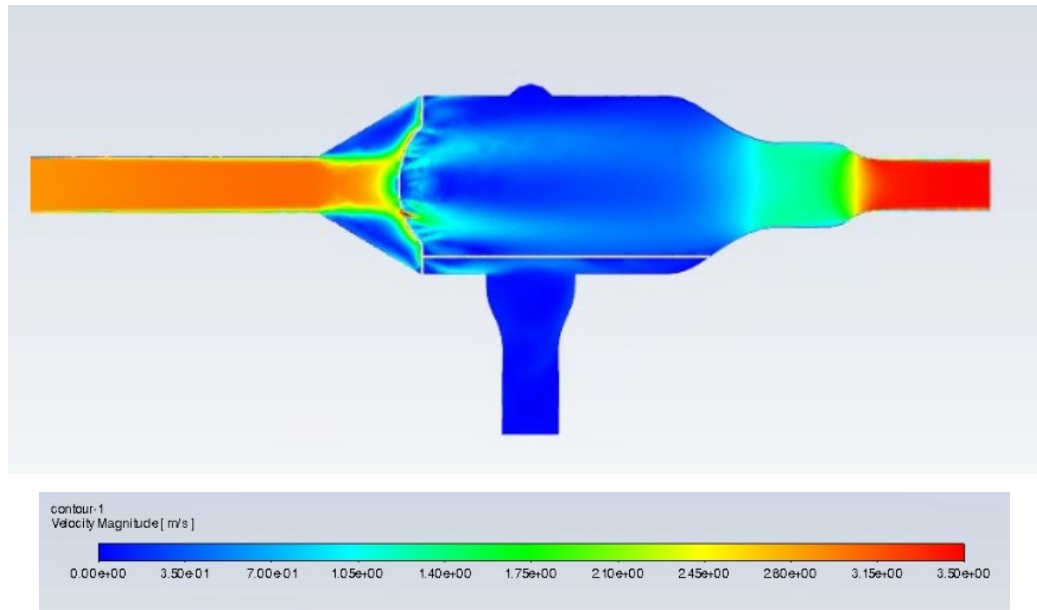


Figura 4.2 Magnitude do campo de velocidade no plano A da versão modificada da câmara de injeção.

Os resultados da simulação mostrados nas figuras 4.3 e 4.4 mostram para ambas as versões da câmara de injeção (projetos original e modificado), o componente do campo de velocidade na direção Z. Certamente pode-se ver que a câmara original apresenta maiores níveis de recirculação (tons vermelhos) tanto na região anterior e posterior da peneira. Raciocínio análogo pode ser realizado quando observado a distribuição espacial do componente Y de velocidade associado ao escoamento no interior das duas versões da câmara, ilustradas nas Figuras 4.5 e 4.6. Nessas imagens percebe-se um maior número de regiões com valores positivos e negativos associados ao componente Y do campo de velocidade na câmara original que, também, apresenta um maior nível de recirculação, o que é indesejável.

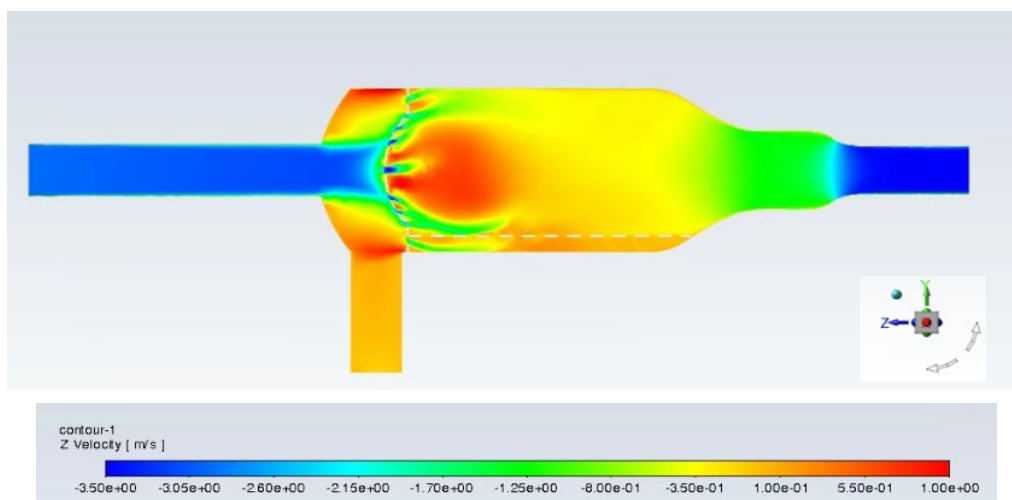


Figura 4.3 Componente Z do campo de velocidade no plano A da versão original da câmara de injeção.

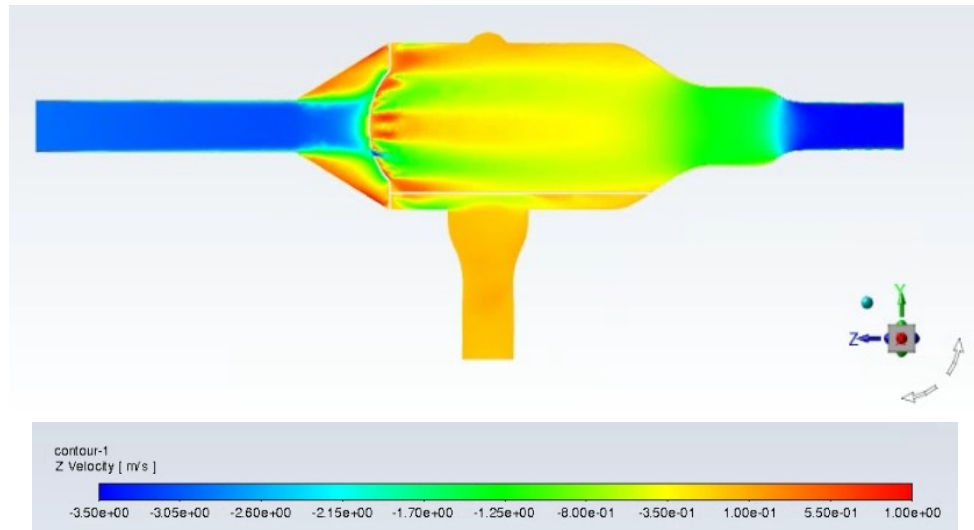


Figura 4.4 Componente Z de velocidade no plano A da versão modificada da câmara de injeção

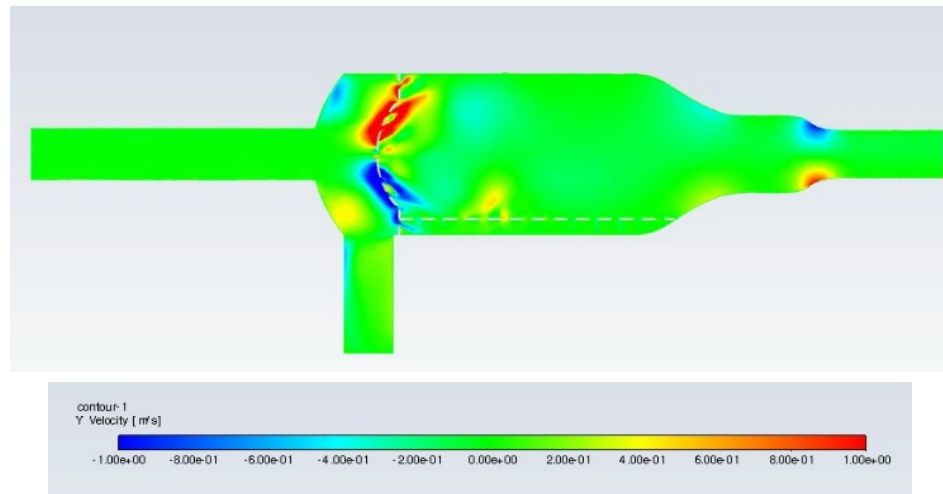


Figura 4.5 Componente Y de velocidade no plano A da versão original da câmara de injeção.

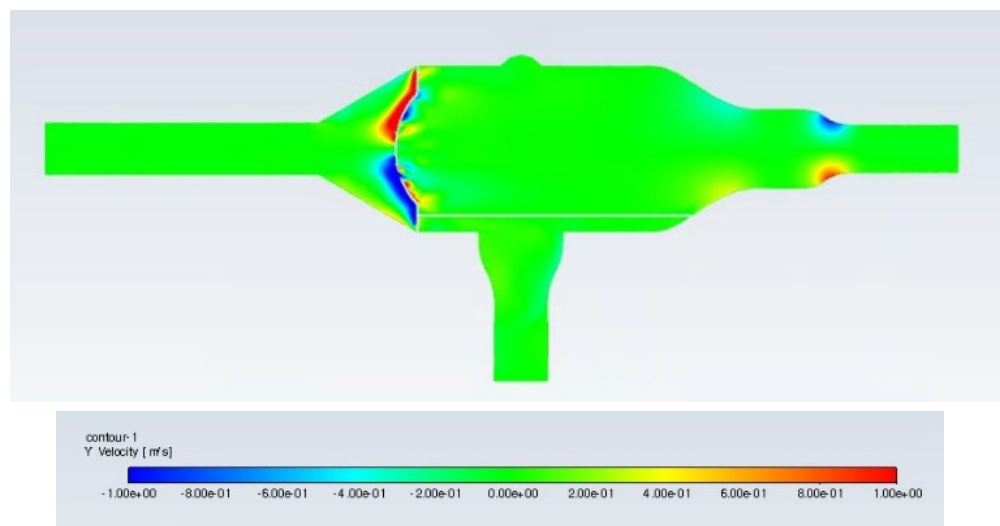


Figura 4.6 Componente Y de velocidade no plano A da versão modificada da câmara de injeção.

A Figura 4.7 apresenta o componente Z do campo de velocidade no plano B para cada uma das versões (original e modificada) da câmara de injeção. O plano B encontra-se localizado exatamente na proximidade posterior, a montante da peneira vertical. A análise do escoamento neste plano oferece uma visão transversal do escoamento, i.e., uma visão frontal da seção transversal do escoamento, comprovando que o escoamento na região posterior da peneira vertical associado ao estudo na versão original da câmara de injeção apresenta níveis mais intensos de recirculação, especialmente na região próxima do centro do plano, o que é indesejável do ponto de vista da funcionalidade do transporte dos artefatos de limpeza.

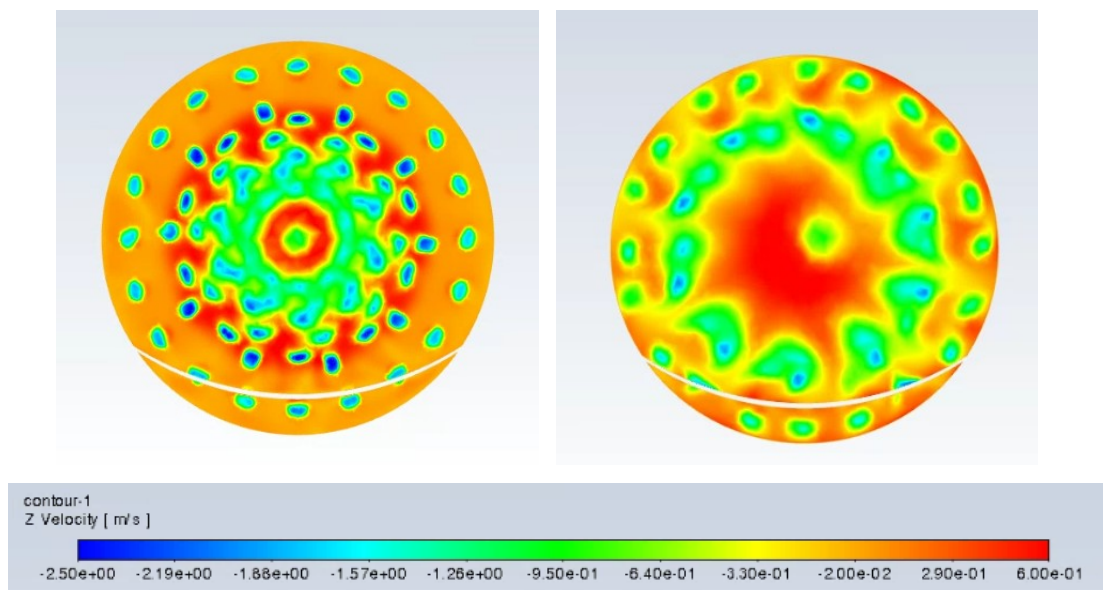


Figura 4.7 Componente Z do campo de velocidade no plano B da versão. Imagem da esquerda: escoamento na versão original da câmara; imagem da direita: escoamento na versão modificada da câmara.

4.2 Linhas de corrente da velocidade

As imagens das Figuras 4.8 e 4.9 apresentam, respectivamente, o resultado da simulação do escoamento nas versões original e modificada da câmara de injeção, das linhas de corrente, auxiliando na visualização da trajetória do escoamento.

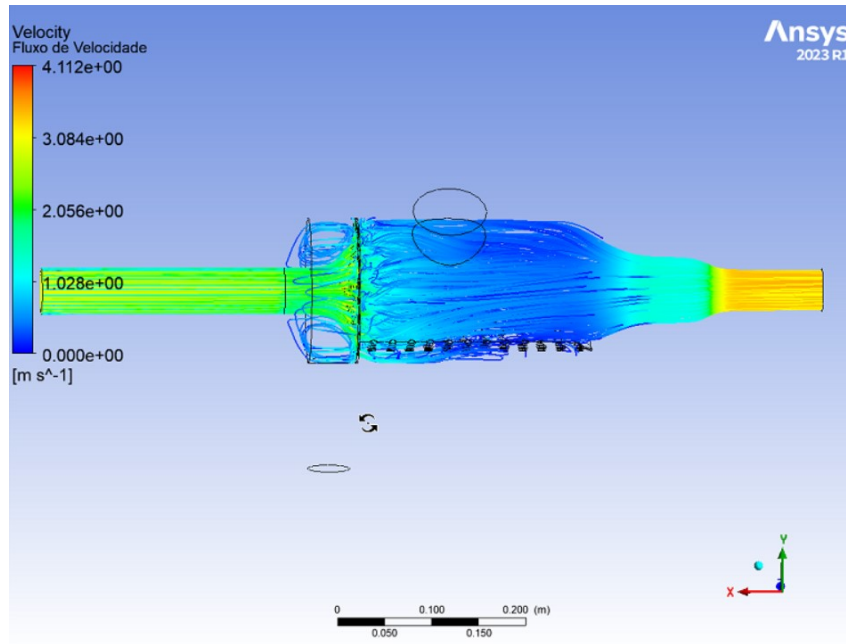


Figura 4.8 Linhas de corrente da versão original da câmara de injeção.

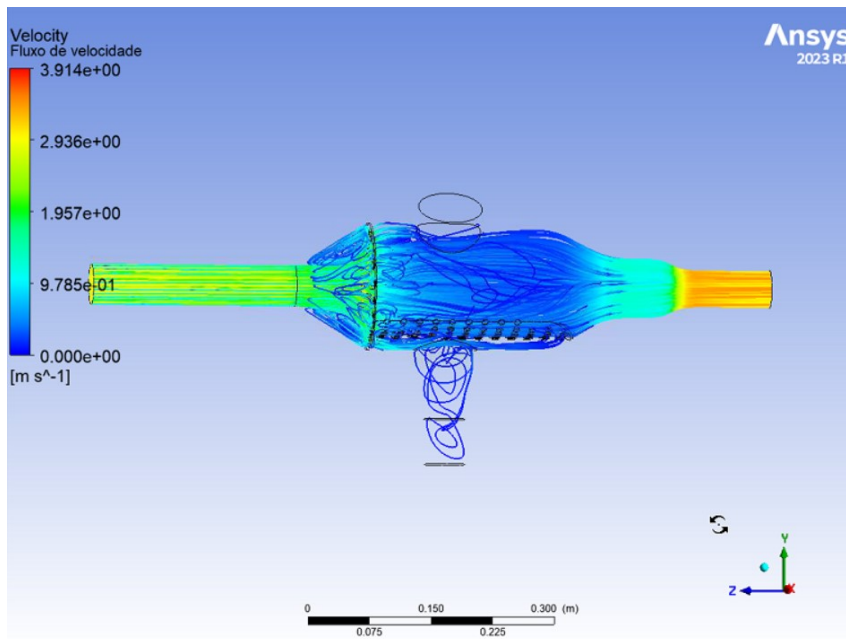


Figura 4.9 Linhas de corrente da versão modificada da câmara de injeção.

As imagens mostradas refletem 500 linhas de corrente geradas para os escoamentos estudados nas duas versões da câmara de injeção (projeto original e projeto modificado). As linhas de corrente denotam o escoamento na câmara (escoamento da esquerda para a direita), permitindo visualizar o seu comportamento hidrodinâmico. A comparação das linhas de corrente obtidas pela simulação dos estudos realizados nas duas versões da câmara de injeção permite avaliar até que

ponto as mudanças introduzidas no projeto construtivo da câmara resultaram em melhorias no escoamento do fluido de transporte dos artefatos, ou seja, na redução de zonas de recirculação que dificultam a navegação dos artefatos e reduzem perdas de carga. O resultado da avaliação encontra-se reportado no final do capítulo, após apresentação dos resultados associados aos diferentes campos de pressão estudados com base nas simulações realizadas do escoamento do fluido de trabalho estudado.

4.3 Campo de pressão

As imagens das Figuras 4.10 e 4.11 mostram, respectivamente, os campos de pressão no plano A que contém o eixo central da câmara original e modificada, na região do escoamento principal.

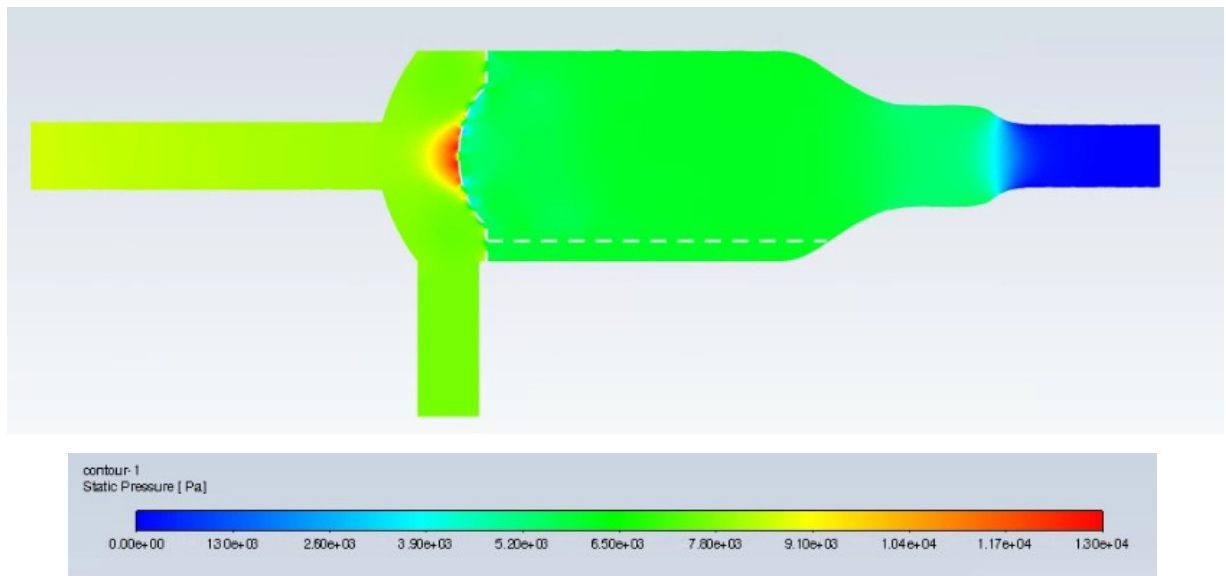


Figura 4.10 Campo de pressão associado ao escoamento na câmara original

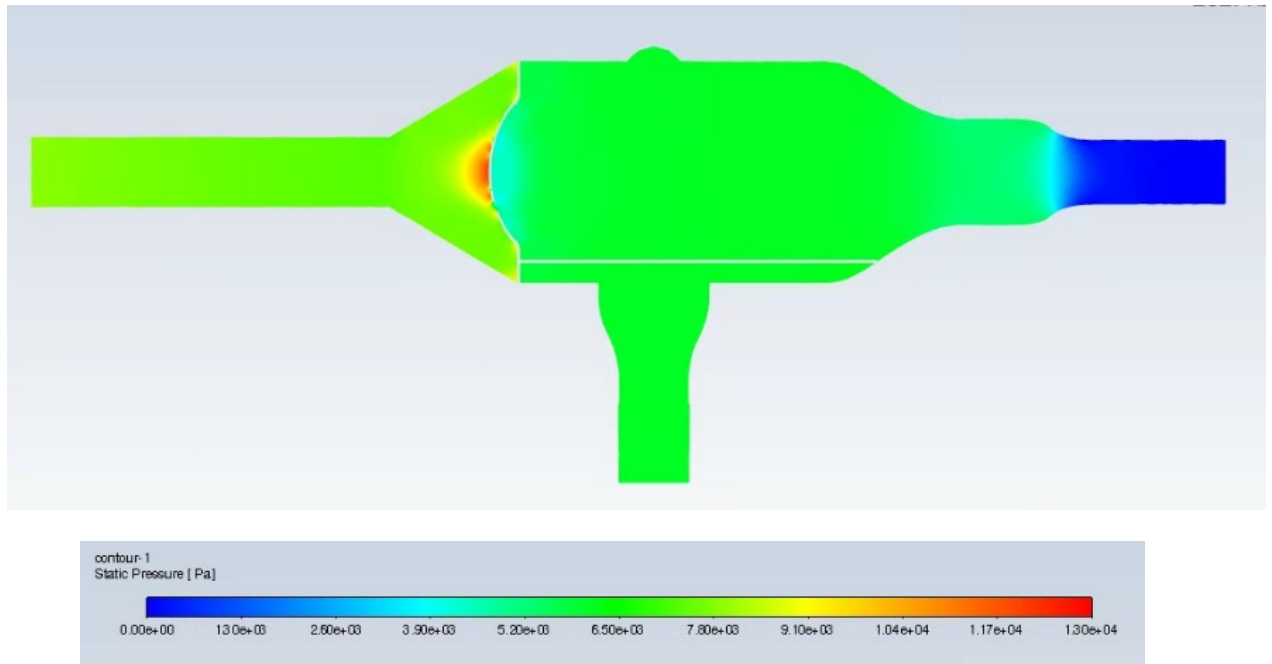


Figura 4.11 Campo de pressão associado ao escoamento na câmara modificada.

As imagens acima representam um bom exemplo da importância de se escolher adequadamente a escala de medição da variável de interesse da grandeza física em questão (no caso a pressão calculada no escoamento). Conforme mostrado, com base na escala selecionada (escala em códigos de cor mostrada na parte esquerda das figuras) a comparação pode ficar prejudicada tendo em vista que a baixa resolução na distribuição de cores ofusca a imagem, dificultando a análise comparativa. Para contornar essa dificuldade e assegurar melhor visualização dos campos de pressão (distribuição espacial), optou-se por subdividir a região de análise do plano em dois estágios, na região da seção de entrada (antes da peneira vertical) e na região da câmara como um todo, porém utilizando diferentes amplitudes da escala, assim conseguindo revelar detalhes da simulação associados a diferentes níveis de pressão em cada região da câmara. Conforme mostrado, na seção de entrada do projeto original, a escala de pressão variou de 7400 Pa a 8946 Pa enquanto a escala de pressão associada à região do corpo como um todo foi de menor amplitude, variando entre 5600 Pa a 6200 Pa. Esse detalhamento do cálculo do campo de pressão em escalas diferentes foi realizado no estudo de ambas as versões das câmaras de injeção (projetos original e modificado). Esse detalhamento nos resultados da simulação geraram as novas imagens, mostradas nas Figuras 4.12 e 4.13, cada uma com duas imagens ilustrando o fracionamento da região.

A análise do campo de pressão nas vizinhanças da peneira vertical, confirmam uma maior uniformidade do escoamento no interior da versão modificada da câmara modificada, quando comparado ao escoamento no interior da câmara original.

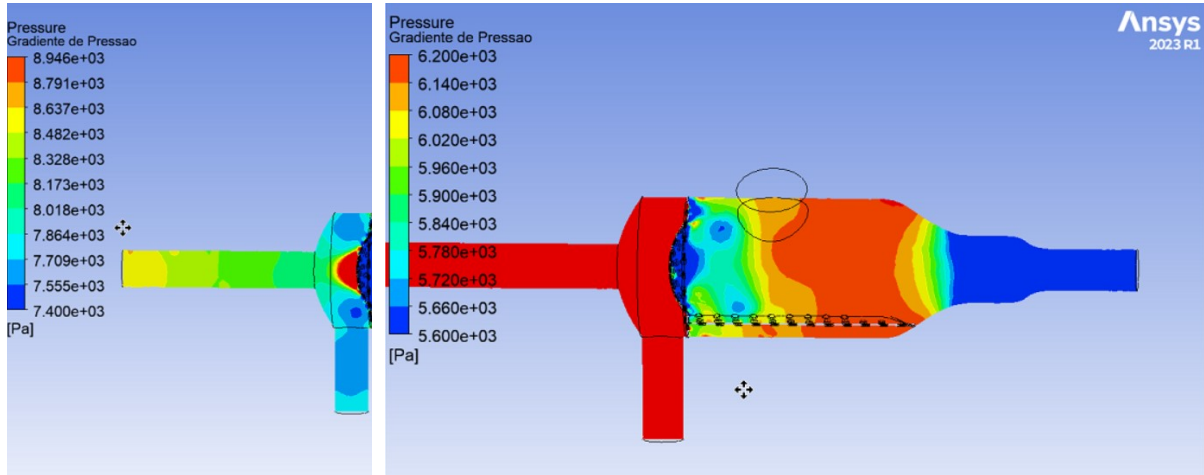


Figura 4.12 Campo de pressão na câmara de injeção (projeto original), com fracionamento das regiões

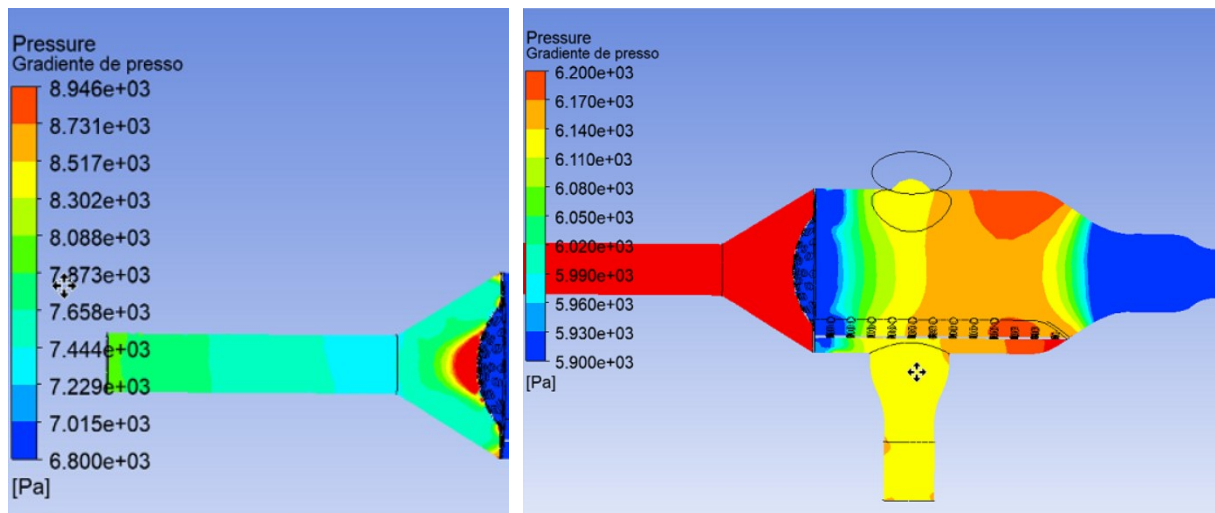


Figura 4.13 Campo de pressão na câmara de injeção (projeto modificado), com fracionamento das regiões.

4.4 Campo de intensidade turbulenta

Finalmente, as Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os resultados da simulação do campo de intensidade turbulenta para ambas as versões da câmara de injeção.

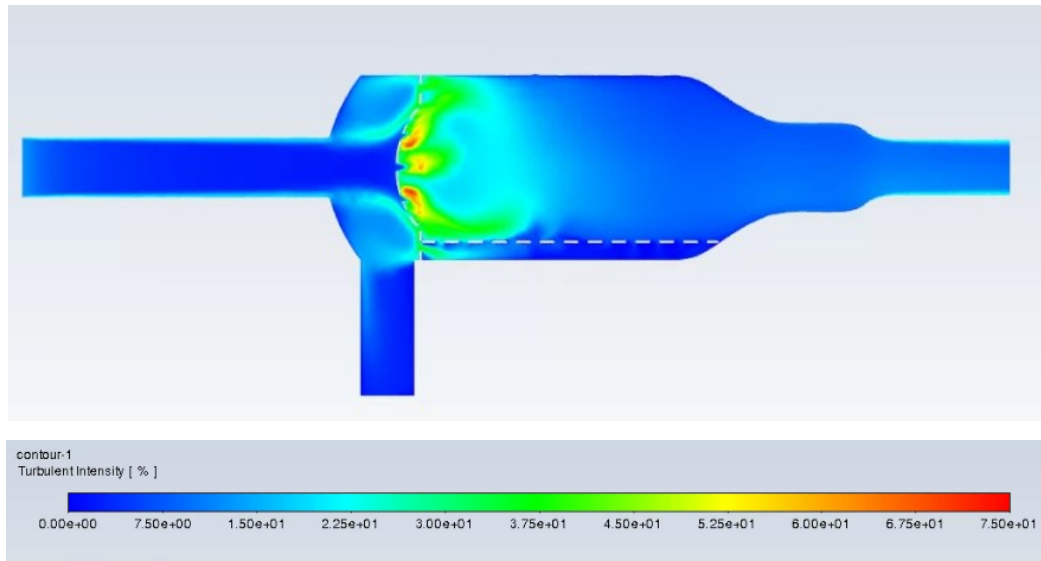


Figura 4.14 Campo de intensidade turbulenta no plano A da câmara original.

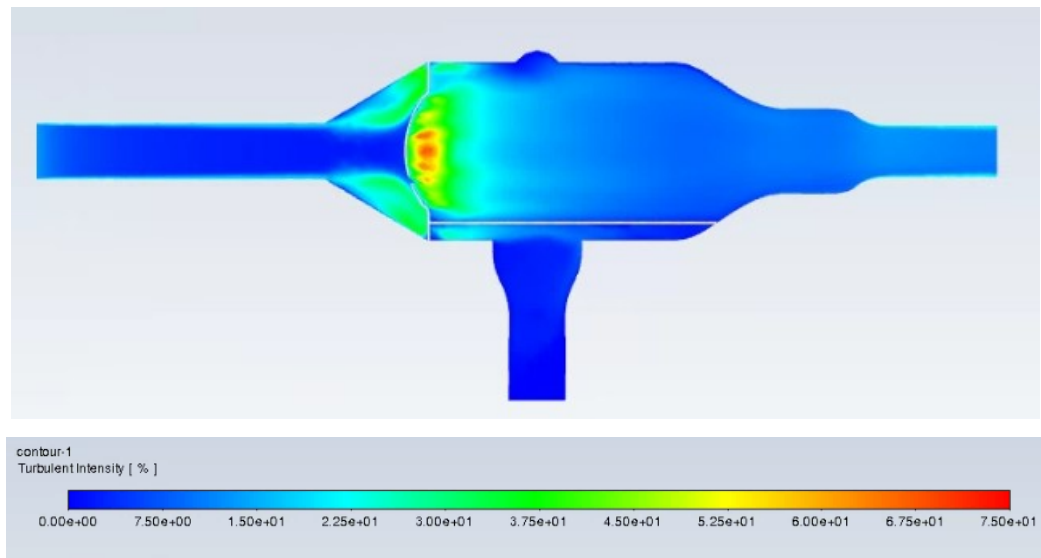


Figura 4.15 Campo de intensidade turbulenta no plano A da câmara modificada.

4.5 Síntese dos resultados

A análise comparativa dos resultados das simulações do escoamento na câmara de injeção de artefatos de limpeza (realizada para ambas as versões do projeto original e projeto modificado), realizadas fazendo-se uso do aplicativo Fluent/Ansys, conduzem às seguintes observações:

- Os resultados ilustrados nas Figuras 5.1 a 5.7, referentes ao estudo do campo de velocidades em ambas as versões da câmara de injeção, comprovam que, de fato, o projeto modificado da câmara de injeção reduziu de forma expressiva o fenômeno da recirculação, que tão drasticamente compromete o transporte

dos artefatos de limpeza no equipamento de limpeza *online* de trocadores de calor.

- O laminarizador de fluxo do tipo tronco de cone introduzido no interior da conexão do tipo cap na versão modificada da câmara de injeção, melhorou substancialmente a hidrodinâmica do escoamento. Conforme observado nas imagens das Figuras 5.8 (versão original) e 5.9 (versão modificada), nesta última não mais se observa a zona de recirculação na entrada da câmara. Em outras palavras, a inserção do laminarizador não apenas reduziu perdas de carga localizadas como, principalmente, eliminou completamente a zona de recirculação que, drasticamente compromete o transporte dos artefatos de limpeza (coletados na câmara de injeção e direcionados para dentro dos tubos do trocador).
- Na análise das linhas de corrente mostradas na Figura 5.9 (projeto modificado), observa-se uma suave recirculação no interior da câmara, na região próxima à parte superior da peneira horizontal (sobre a qual são depositadas as esferas abrasivas antes de se iniciar a operação do dispositivo de limpeza *online*), o que favorece o processo de captação dos artefatos de limpeza que deverão ser injetadas para dentro dos tubos do trocador de calor;
- No que concerne o campo de pressão, para ambas as simulações realizadas (na câmara original e na versão modificada), constata-se, claramente, que a versão original da câmara demanda um nível de pressão maior para viabilizar o escoamento na sua entrada, o que se traduz em redução da perda de carga e na redução da potência hidráulica requerida do grupo motor-bomba responsável pela pressurização do dispositivo de limpeza online.
- Ainda no que concerne a simulação dos campos de pressão, a montante da peneira vertical, na sua face anterior, observa-se que a pressão de saturação (pressão de maior amplitude) é concentrada na região central côncava da referida peneira, conforme mostrado na cor vermelha e circundada por um anel na cor amarela de menor amplitude associada à escala de cor utilizada, nitidamente indicando um gradiente decrescente na direção oposta ao escoamento. A identificação desta pressão de saturação comprova o seu indesejável impacto no aumento da perda de carga e, conseqüentemente, dos custos de bombeamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza.
- Especificamente sobre a peneira vertical, numa primeira análise, esses resultados sugerem a sua eliminação ou substituição por outro dispositivo de contenção dos artefatos de limpeza, decisão esta que será considerada em desdobramentos deste trabalho. Cabe aqui observar que nenhuma simulação foi realizada do escoamento no dreno vertical inferior da câmara, associado a ciclos de transposição dos artefatos de limpeza da câmara de recuperação de volta para a câmara de injeção.
- Conforme esperado, os resultados da simulação confirmam um decaimento da pressão à medida que o escoamento avança a jusante da peneira, bem como a correlação inversa do campo de pressão com o campo de velocidade, ou

seja, a pressão decresce quando a velocidade aumenta, nitidamente observável nos dutos de entrada e de saída horizontais da câmara.

- Dentre as conclusões mais relevantes, destacam-se os resultados da intensidade de turbulência no interior das câmaras, ilustradas na seção anterior. Conforme mostrado, a análise das imagens geradas pela simulação comprova claramente um nível de turbulência ligeiramente inferior, porém substancialmente mais espacialmente uniforme no interior da câmara de injeção modificada, a montante da peneira vertical, quando comparado com o nível de turbulência observado na câmara original. Ou seja, a melhoria do projeto construtivo da câmara inquestionavelmente reduziu o nível de turbulência no seu interior, o que é um resultado altamente desejado já que evita recirculação dos artefatos de limpeza no interior da câmara, fenômeno que prejudicaria o processo de injeção associado a um ciclo de limpeza do trocador de calor quando este estiver acoplado ao dispositivo de limpeza *online*.

Concluindo, observa-se que, de uma forma geral, as modificações introduzidas na câmara de injeção cumpriram o seu papel de suavizar o comportamento hidrodinâmico do escoamento nas conexões que realizam o acoplamento da câmara aos tramos hidráulicos do equipamento de limpeza *online*.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo sintetiza as principais conclusões do trabalho e encaminha recomendações para possíveis desdobramentos do estudo.

5.1 Conclusões

O resultado desta análise numérica do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza na câmara de injeção do dispositivo de limpeza *online* mostrou que a ferramenta computacional pode orientar na melhoria de projetos construtivos de equipamentos que operam por fluxos hidráulicos, como é o caso dos trocadores de calor.

Em particular, as simulações realizadas e discutidas neste TCC contribuíram para um desenvolvimento mais amplo do equipamento inovador de limpeza automatizada de superfícies de transferência de calor em fase de melhoria pelo Programa de Metrologia da PUC-Rio, visando a sua inserção no mercado. Evidências contundentes comprovam que as melhorias introduzidas na câmara de injeção de artefatos reduziram de forma considerável o indesejável fenômeno de recirculação no seu interior, atribuindo maior funcionalidade ao equipamento de limpeza durante a operação dos trocadores de calor.

5.2 Recomendações

Conforme revelado pela análise numérica desenvolvida, os resultados da variável turbulenta Y^+ não apresentaram valores igual ou inferior a 5 (cinco) para todas as paredes conforme recomendado pelo modelo $k-\omega$ SST. Este fato sugere a necessidade de se utilizar malha computacional mais refinada (malha mais fina) nas regiões próximas das paredes. Não obstante este valor de Y^+ se apresentar mais próximo de 5 nas regiões de maior interesse (próximos à peneira vertical e horizontal objeto desta investigação) sugere-se uma extensão do trabalho para introduzir os aprimoramentos necessários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGA, S.L., FROTA, M.N., MILON, J.J., TICONA, E.M., NETO, J.R.C.A. **Hydrodynamic and thermal evaluation of fouling mitigation in hydro generators heat exchangers**. In: 8th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 2011, Point Aux Piments, Mauritius Island. (2011. Proceedings of the 8th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics). June 26th -July 1st, 2011.

BOTT, T. R. **Fouling of heat exchangers and its mitigation with special reference to biofouling**. In: 2nd European Thermal Science UTI National Heat Transfer Conference, 1996, Rome. Proceedings of the 2nd European Thermal Science UTI National Heat Transfer Conference. Rome: UIT, 1996, vol 1, pp 115-125.

BOTT, T. R., MELO, L.F. **Fouling of heat exchangers**. Experimental thermal and fluid science, v.14, n.4, p.315, 1997.

Frota M.N.; Ticona E.M.; Neves A.V; Marques R.P.; Braga S.L.; Valente G. **On-line cleaning technique for mitigation of biofouling in heat exchangers: A case study of a hydroelectric power plant in Brazil**. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 53, p. 197-206, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.12.006>.

Frota M. N.; CASTRO-PACHECO, E. R.; HERNANDEZ-VASQUEZ, J. D.; SILVA, R. P. M. **Alternative method for assessing the effectiveness of heat exchangers**. Measurement: Sensors, v. 18, p.100066, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100066>.

FROTA, M.N. et al. **Alternative approaches for real-time monitoring of the effectiveness of hydrogenerator heat exchangers**. Accepted for publication in the International Journal of Heat Transfer Engineering. 2023.

HANS, U.; ZETTLER, **Proceedings of the XIII Heat Exchanger Fouling and Cleaning Conference**. 2-7 June, Warsaw, Poland, 2019

ISHIKAWA, K. **Guide to Quality Control**, 2nd Edition. Asia Productivity Organization/Quality Resources, White Plains, New York, 1986.

ISO GUM 2008, **Avaliação de dados de Medição** - Guia para a expressão de incerteza de medição. 1ª ed. Rio de Janeiro, 2012.

JEFFERSON RANGEL RIOS. **Avaliação metrológica de um dispositivo servo-hidráulico para mitigação de incrustação em trocadores de calor industriais**. Dissertação de Mestrado em Metrologia. 26 fev. 2021.

KAKAC, S; LIU, H. **Heat Exchangers Selection, Rating and Thermal Design**, Department. of Mechanical Engineering. University of Miami, Coral Gables, Florida, 2002.

KAYS, W. M.; LONDON, A. L. **Compact heat exchangers**. McGraw-Hill, New York, 1964.

Launder, B.E.; Spalding, D.B. (March 1974). "**The numerical computation of turbulent flows**". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 3 (2): 269–289.

MENTER, F.R. **Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications**. *AIAA Journal*, v. 32, n. 8, p. 1598-1605, 1994

M.N. FROTA, J.D. HERNÁNDEZ-VÁSQUEZ, E.R. CASTRO-PACHECO, S.B. GERMANO. **Enhancing the Effectiveness of Hydro Generator Heat Exchangers through the Control of Measurement Uncertainties**. Proceedings of the Heat Exchangers Fouling and Cleaning Conference (HTRI, 2019). Organized by the Heat Transfer Research, Inc. Warsaw/Poland, June 2-7.

ORLANDO IRRAZABAL BOHORQUEZ, W. **Aula 23 -Trocadores de Calor**. UFJF: Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica, maio 2014. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/washington_irrazabal/files/2014/05/Aula-23_Trocadores-de-Calor.pdf>.

PACHECO, E. S. **Desenvolvimento e validação experimental em usina hidrelétrica de alternativas de cálculo da efetividade de trocadores de calor**. Dissertação de Mestrado em Metrologia. 22 dez. 2020.

POPE, S.B. **Turbulent flows**. Cambridge University Press, 2000.

RIOS, J. L. R.; FROTA, M. N.; HERNANDEZ-VASQUEZ, J. D.; BARBOSA, C. R. H. **Monte Carlo Study of Online Cleaning Cycles of Hydrogenerator Heat Exchangers**. *HEAT TRANSFER ENGINEERING*, p. 1-12, 2022. <https://doi.org/10.1080/01457632.2021.2022327>

APÊNDICE A – GERAÇÃO DO VOLUME DE CONTROLE

Conforme mencionado, para que a modelagem tridimensional pudesse ser realizada pelo programa de simulação de escoamento 3D (Fluent/Ansys), fez-se necessário unir todas as peças na montagem e criar uma peça única para ambas as versões (original e modificada) da câmara de injeção objeto do estudo. Realizada esta integração das peças, as geometrias foram direcionadas para o ambiente de trabalho do Ansys. Somente, então, conseguiu-se realizar todos os processos de simulação, com a respectiva geração do volume de controle objeto do estudo e da malha computacional. A Figura 4.6 ilustra a interface do ambiente de trabalho (Workbench) na qual podem ser gerenciados todos os processos da simulação numérica.

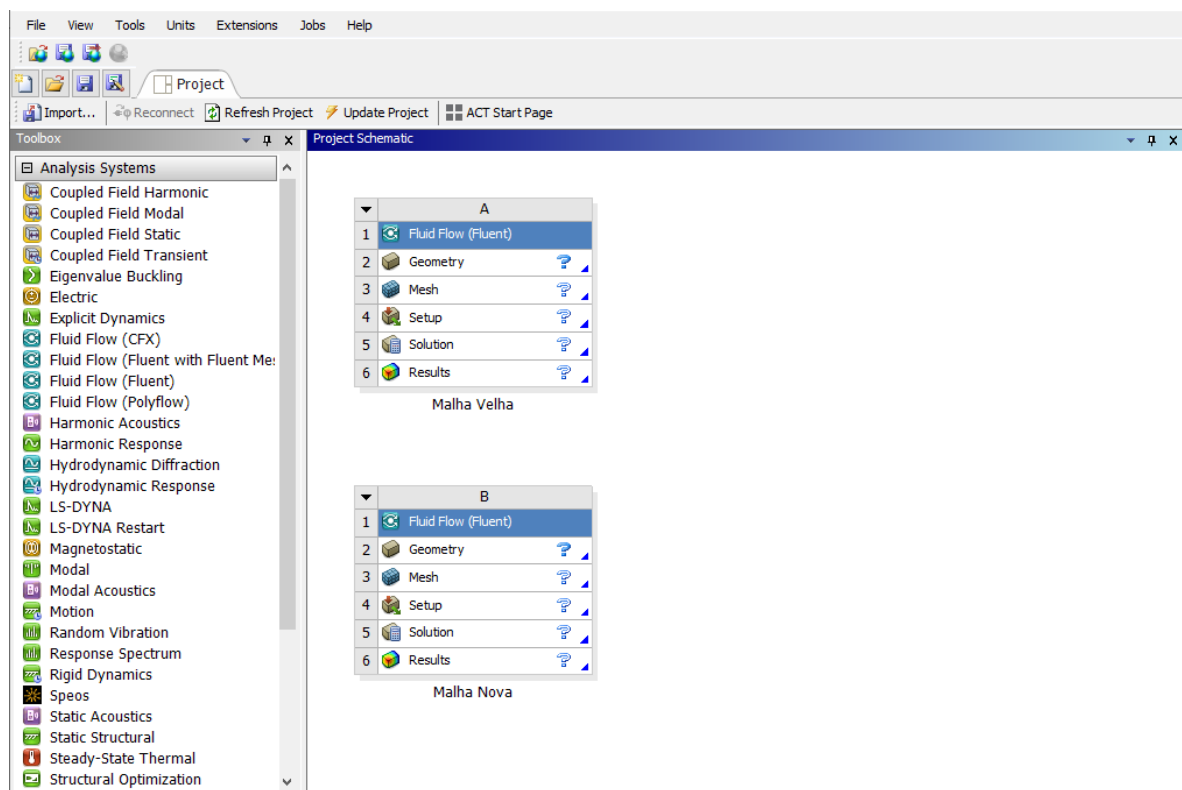


Figura 0.1 Interface do Workbench do ANSYS

Como ponto de partida, foi utilizado o aplicativo DesignModeler, que permite criar o volume de controle a partir da carcaça modelada realizada pelo aplicativo Solidworks, para cada uma das versões (original e modificada) da câmara de injeção, conforme ilustrado na Figura 4.7, a seguir.

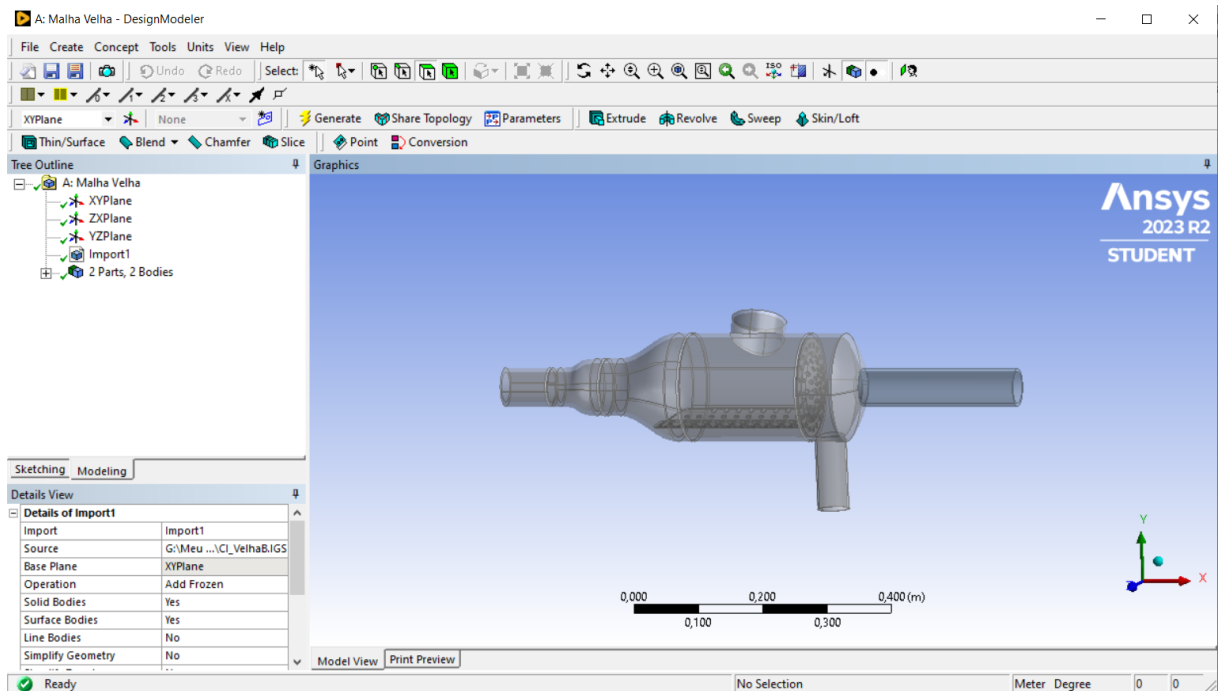


Figura 0.2 Tela da versão Student (2023 R2), do aplicativo Ansys, mostrando o volume de controle do escoamento a ser simulado.

Este aplicativo computacional possui embarcada uma ferramenta estratégica, denominada *fill*, que permite, preencher todo o interior do modelo a partir da definição de informações relevantes de entrada e saída do modelo. De forma automática, interpreta as paredes de contorno da peça objeto da modelagem, criando um sólido representativo do volume de controle que fundamentará a simulação do escoamento. Em outras palavras, enquanto o aplicativo Solidworks gera o volume físico, o aplicativo DesignModeler gera o volume da massa de fluido cujo escoamento será simulado pelo Ansys/Fluent. Os resultados dessa operação de geração do volume de controle e do volume de fluido a ser submetido ao processo de simulação encontram-se caracterizados nas imagens das Figuras 4.8 e 4.9, para as respectivas versões original e modificada da câmara de injeção de artefatos de limpeza.

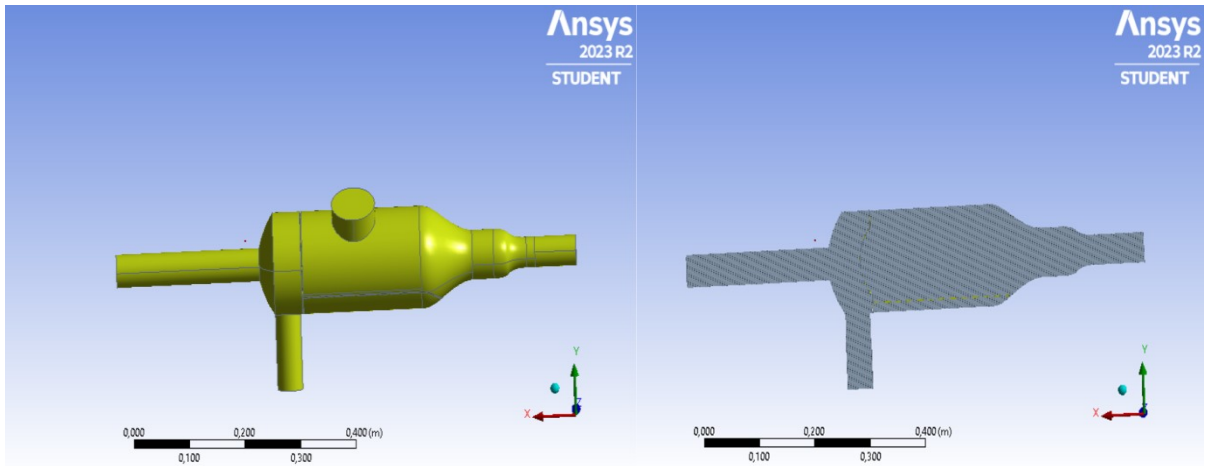
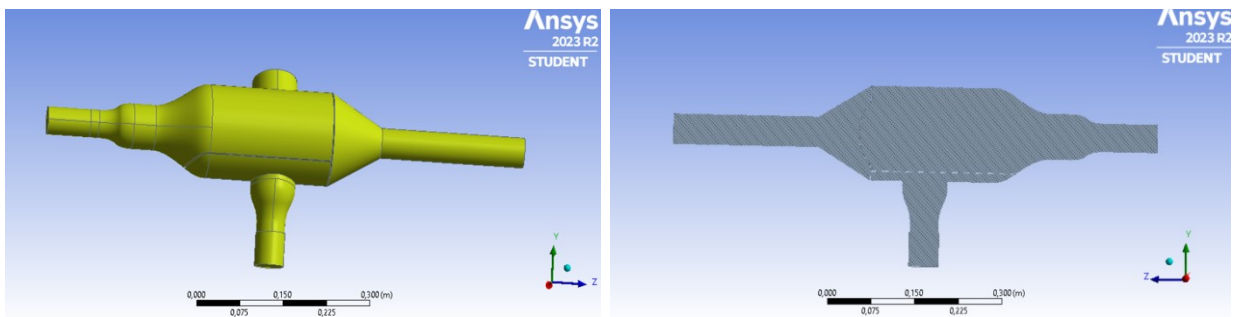


Figura 0.3 Volume de controle da versão original da câmara de injeção e volume da massa de fluido submetido ao processo de simulação pelo Ansys/Fluent.



Volume de controle da versão modificada da câmara de injeção e volume da massa de fluido submetido ao processo de simulação pelo Ansys/Fluent.

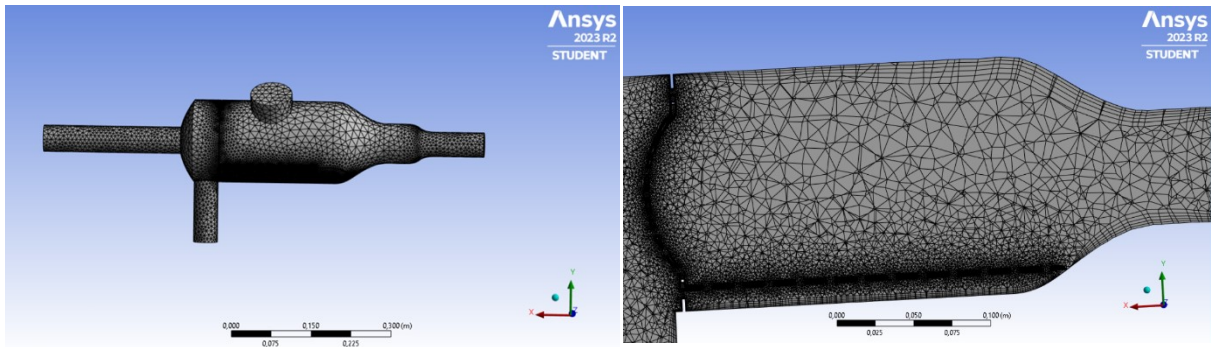
APÊNDICE B – GERAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL E SEU REFINAMENTO

Na sequência dos procedimentos preparatórios, cujo objetivo final é a simulação do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza no interior da câmara de injeção, para ambas as versões (original e modificada dessas câmaras, consegue-se, a partir do volume de controle, gerar a malha computacional requerida para que a simulação possa ser realizada. Essa malha consiste na subdivisão do volume de controle em um grande número de células computacionais (da ordem de milhares), que é o artifício clássico de métodos numéricos que permite que as complexas equações que governam a física do problema sejam adequadamente resolvidas de forma a refletir a solução de problemas complexos difíceis ou impossíveis de oferecer solução exata. Segundo este preceito básico de métodos numéricos, quanto maior o número de elementos maior será a confiabilidade do resultado da simulação pretendida.

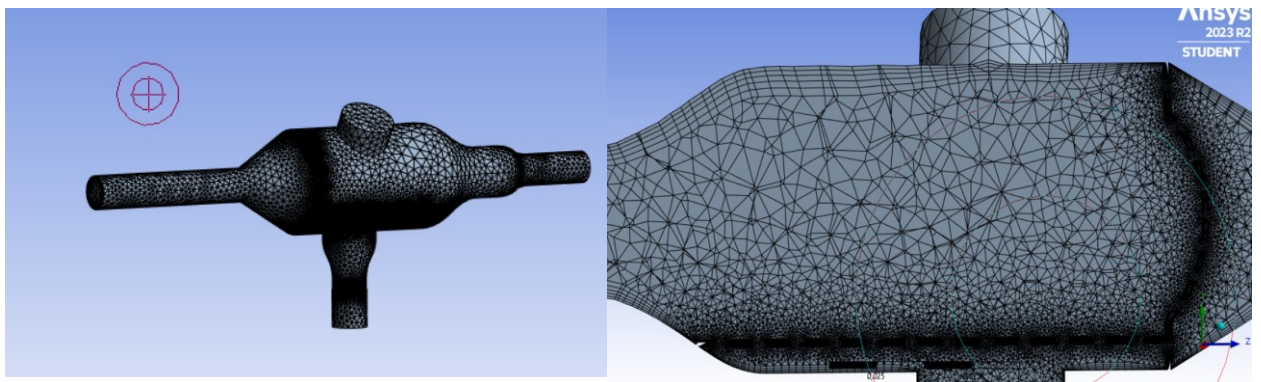
Ainda no curso dos procedimentos de preparação da modelagem, duas outras ferramentas foram utilizadas. A interface *Meshing* permite refinar a malha, mais precisamente realizar a captura de proximidade e a inflação.

- **a captura de proximidade** define o número mínimo de elementos em regiões em que duas faces (paredes) estão muito próximas entre si. Quanto menor a distância entre as paredes, maior o número de elemento alocados a fim de priorizar melhor exatidão dos cálculos na região selecionada. Esta ferramenta é de extrema utilidade, tendo em vista que o escoamento em uma estrangulação é mais inconsistente, necessitando de maior discretização.
- **a inflação** é uma ferramenta que cria elementos da malha a partir das faces selecionadas, podendo-se definir a espessura e o número de camadas criadas a partir dela. Este é um artifício que ajuda a detectar de forma mais eficaz os efeitos das paredes no escoamento, além de criar uma transição suave entre a parede e o fluido.

Os efeitos benéficos dessas duas ferramentas adicionais são mostrados na imagem da Figura 4.10, e no zoom da mesma da mesma imagem (Figura 4.11), que ilustram uma maior densidade de células computacionais nas regiões que oferecem mais complexidade para a simulação, no caso, nas regiões mais próximas às peneiras de retenção dos artefatos de limpeza. Para cada uma das versões (original e modificada) da câmara de injeção, o total de elementos foi de 1,5 milhões de elementos (células computacionais).



Refinamentos da malha computacional para a câmara de injeção original conseguidas pelo uso da interface Meshing.



Refinamentos da malha computacional para a câmara de injeção modificada conseguidas pelo uso da interface Meshing.