



Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Sergio Luis De La Hoz Truyoll

**Simulação CFD do escoamento nos circuitos
hidráulicos de um dispositivo de limpeza *online* de
trocadores de calor**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Metrologia (Área de concentração:
Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Mauricio Nogueira Frota
Co-orientador: Dr. Iván Ibañez Aguilar

Rio de Janeiro
março 2024



Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Sergio Luis De La Hoz Truyoll

**Simulação CFD do escoamento nos
circuitos hidráulicos de um dispositivo de
limpeza *online* de trocadores de calor**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Metrologia (Área de concentração:
Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo
assinada.

Prof. Maurício Nogueira Frota

Orientador

Programa de Pós-graduação em Metrologia (PósMQI/PUC-Rio)

Iván Ibáñez Aguilar

Co-orientador

Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Prof. José Daniel Hernández Vásquez

Universidad Antonio Nariño/Colômbia – UAN

Prof. Dr. Gutemberg Borges França

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Prof. Dr. Ênio Pereira de Souza

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Rio de Janeiro, 20 de março de 2024

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Sergio Luis De La Hoz Truyoll

Formando em Engenharia Mecânica (2021) pela Faculdade de Engenharia da Universidad del Atlántico, Colombia (2021).

Pesquisador bolsista no Projeto Catalisa ICT/SEBRAE Nacional, Referência: 29083-116, *Inovação de Processos Industriais Automatizados* (2022-23).

Ficha Catalográfica

Hoz Truyoll, Sergio Luis De La

Simulação CFD do escoamento nos circuitos hidráulicos de um dispositivo de limpeza online de trocadores de calor / Sergio Luis De La Hoz Truyoll; orientador: Mauricio Nogueira Frota; co-orientador: Iván Ibañez Aguilar. – 2024.

131 f.: il. color.; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2024.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Metrologia para Qualidade e Inovação – Teses. 3. Metrologia. 4. Trocadores de calor. 5. Dispositivo de limpeza online de trocadores de calor. 6. Simulação CFD de escoamentos internos em geometrias complexas. 7. Otimização de projetos construtivos de equipamentos. I. Frota, Mauricio Nogueira. II. Ibañez Aguilar, Iván. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia. IV. Título.

CDD: 389.1

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela oportunidade e experiência únicas. Infinita gratidão a meus pais, por sua constante motivação. Ao professor Maurício Nogueira Frota, pela orientação detalhada e apoio generoso em CFD e mecânica dos fluidos, marcando meu crescimento acadêmico e pessoal. Agradeço ao Dr. Iván Ferney Ibañez Aguillar pela dedicação ao ensinar dinâmica dos fluidos computacional e por ser mais que um coorientador, mas um amigo. Ao Professor Christian Pedraza, por impulsionar meus estudos em Engenharia Mecânica na Universidad del Atlántico e ao Professor José Daniel Hernández Vásquez, por sua assistência inicial.

Meus agradecimentos à equipe do Programa de Pós-Graduação em Metrologia, especialmente ao coordenador Hall Barbosa, aos secretários Márcia Ribeiro e Felipe Coimbra, e aos professores Fátima Ludovico, Élcio Cruz, Daniel Louzada, Jefferson Ríos, entre outros, por suas valiosas contribuições e companheirismo.

Agradeço ao Eng. Sérgio Bragantine Germano pelo suporte técnico e revisões essenciais. Também agradeço a todos no Rio de Janeiro que fizeram minha estadia melhor e mais motivadora.

À minha namorada, Gynna Gómez, por sua presença constante, apoio e encorajamento. E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para este trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À PUC-Rio, pelo acesso à sua infraestrutura de pesquisa e pela bolsa de estudos, liberando-me do pagamento de anuidades, assim viabilizando os meus estudos.

Resumo

De La Hoz Truyoll, Sergio Luis. Frota, Mauricio Nogueira (Orientador). Ibañez Aguilar, Ivan Ferney (Co-orientador). **Simulação CFD do escoamento nos circuitos hidráulicos de um dispositivo de limpeza online de trocadores de calor**. Rio de Janeiro, 2024. 131p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Trocadores de calor são equipamentos essenciais do sistema de resfriamento de equipamentos de processo, visando assegurar a sua eficácia e eficiência operacional. O **objetivo** do trabalho é a simulação computacional do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza de uma alternativa tecnológica de trocadores de calor que dispensa a interrupção do processo industrial. A **motivação** resultou do potencial da ferramenta computacional CFD em gerar resultados numéricos de interesse, complementando a base de dados experimentais em locais críticos do escoamento difíceis de serem instrumentados. A simulação foi realizada pelo *Fluent/Ansys 2023 R2*, utilizando-se o modelo de turbulência κ - ω SST (Transporte da tensão de cisalhamento), baseado na abordagem média de Reynolds (RANS - Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Os **resultados** da simulação (campos de velocidade, pressão e estruturas da turbulência) orientaram ajustes e melhorias localizadas no projeto construtivo da alternativa tecnológica de limpeza *online* proposta, permitindo eliminar zonas de recirculação e uma redução de 62,2% nas perdas de carga localizadas, que tão drasticamente impactam nos custos de bombeamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza. A pressão simulada reproduziu o resultado da medição com 2,5% de concordância. Como **conclusão**, a ferramenta computacional provou ser estratégica para orientar a melhoria do projeto construtivo do dispositivo inovador de limpeza *online*. Se por um lado os dados experimentais provêm uma referência confiável fundamentada em medições rastreáveis a padrões de referência, por outro, a simulação numérica provê relevantes informações em todo o domínio do escoamento.

Palavras-chave

Metrologia, trocadores de calor, dispositivo de limpeza *online* de trocadores de calor; simulação CFD de escoamentos internos em geometrias complexas; otimização de projetos construtivos de equipamentos.

Abstract

De La Hoz Truyoll, Sergio Luis. Frota, Mauricio Nogueira (Advisor). Ibañez Aguilar, Ivan Ferney (Co-advisor). **CFD Simulation of the Flow in the Hydraulic Circuits of an Online Heat Exchanger Cleaning Device.** Rio de Janeiro, 2020. 119p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Heat exchangers are essential equipment in the cooling system of various process equipment, aiming to ensure its effectiveness and operational efficiency. The objective of the work is the computational simulation of the fluid flow transporting cleaning artifacts from a technological alternative for heat exchangers that does not require interruption of the industrial process. The motivation resulted from the potential of the CFD computational tool to generate numerical results of interest, complementing the experimental database in critical flow locations that are difficult to instrument. The simulation was carried out by Fluent/Ansys 2023 R2, using the κ - ω SST (Shear Stress Transport) turbulence model based on the Reynolds average approach (RANS - Reynolds-Averaged Navier-Stokes). The simulation results (velocity, pressure fields, and turbulence structures) guided adjustments and localized improvements in the constructive design of the proposed online cleaning technological alternative, allowing the elimination of recirculation zones and a 62.2% reduction in localized pressure losses that so drastically impact the costs of pumping the fluid to transport cleaning artifacts. The simulated pressure reproduced the measurement results with 2.5% agreement. In conclusion, the computational tool proved to be strategic in guiding the improvement of the constructive design of the innovative online cleaning device. If, on the one hand, experimental data provides a reliable reference based on measurements traceable to reference standards, numerical simulation provides relevant information across the entire flow domain.

Keywords

Metrology, heat exchangers, online heat exchanger cleaning device; CFD simulation of internal flows in complex geometries; optimization of equipment construction projects.

Sumário

1. Introdução	12
1.1. Definição do problema de pesquisa	14
1.2. Objetivos: Geral e específicos	15
1.3. Metodologia	16
1.4. Estrutura da dissertação	17
2. Trocadores de calor: retrospectiva histórica e aplicações industriais.	19
2.1. Classificação e aplicações de trocadores de calor	25
2.1.1. Trocadores segundo o processo de transferência de calor	26
2.1.2. Trocadores segundo os fluidos de trabalho	27
2.1.3. Classificação de acordo com a superfície compacta	27
2.1.4. Classificação de acordo com sua construção	28
2.1.5. Classificação de acordo com a direção do fluido	29
2.2. Alternativas off-line e online de limpeza de trocadores de calor	30
2.2.1. Alternativas de limpeza <i>off-line</i>	33
2.2.2. Alternativas de limpeza <i>online</i>	33
2.2.3. Trocadores de calor: fundamentos teóricos	35
2.2.4. O fenômeno de formação da incrustação	37
3. O <i>OnlineCleaner</i> e contextualização do estudo	45
3.1. Dispositivo de limpeza <i>online</i> de trocadores de calor	45
3.2. Escopo do estudo	51
4. Inovações introduzidas e fundamentos da simulação CFD	54
4.1. Câmaras de injeção e de recuperação dos artefatos de limpeza	55
4.2. Concepção preliminar da câmara de injeção dos artefatos de limpeza	57
4.3. Aprimoramentos no projeto construtivo das câmaras	57
4.4. Projeto construtivo da câmara de injeção dos artefatos de limpeza	59
4.5. Ferramentas computacionais utilizadas	60
4.6. Ferramentas acessórias do software Fluent Ansys 2023 R2	61
4.7. Equações que governam o escoamento estudado	62
4.8. <i>OnlineCleaner</i> acoplado ao trocador de calor de um hidrogenador	65
4.9. Encerramento do capítulo	70
5. Simulação CFD do escoamento de transporte dos artefatos	71
5.1. Caracterização das simulações realizadas	73
5.2. Confiabilidade do método computacional	73
5.3. Simulações do escoamento de transporte dos artefatos de limpeza	75
5.3.1. Simulação do escoamento na câmara de injeção	75
5.3.2. Simulação do escoamento integrado em ambas as câmaras	95
6. Conclusões e recomendações	115
6.1. Conclusões	115
6.2. Recomendações para desdobramentos do trabalho	118
Referências bibliográficas	119

Lista de figuras

Figura 1 - Desenho da pesquisa.....	16
Figura 2 - Mapa conceitual da pesquisa.....	17
Figura 3 - Alternativa de taxonomia de trocadores de calor.....	26
Figura 4 - Exemplos de tipos de trocadores de calor.....	28
Figura 5 - Técnicas de mitigação de incrustação.....	32
Figura 6 - Fases de indução e consolidação do fenômeno de incrustação.....	39
Figura 7 - Fases de cristalização da incrustação no trocador de calor.....	39
Figura 8 - Resistência térmica local imposta pela incrustação (CaSO ₄).....	41
Figura 9 - Redução da seção transversal devido à incrustação.....	42
Figura 10 - Projeto construtivo e protótipo do OnlineCleaner.....	45
Figura 11 - Câmara de injeção com artefatos de limpeza e vista interior.....	47
Figura 12 - Plataforma de acoplamento do OnlineCleaner ao trocador de calor.....	48
Figura 13 - Acoplamento do OnlineCleaner ao trocador de calor.....	48
Figura 14 - Remoção de incrustações pela ação do artefato de limpeza.....	49
Figura 15 - Comprovação experimental da eficácia da técnica de limpeza.....	51
Figura 16 - OnlineCleaner e tela do sistema de automação embarcado.....	55
Figura 17 - Interconexão das câmaras dos artefatos do OnlineCleaner.....	57
Figura 18 - Projeto original da câmara de injeção dos artefatos.....	57
Figura 19 - Projeto original da câmara de recuperação dos artefatos.....	58
Figura 20 - Projeto modificado da câmara de injeção dos artefatos.....	58
Figura 21 - Projeto modificado da câmara de recuperação dos artefatos.....	58
Figura 22 - OnlineCleaner acoplado, injetando artefatos.....	66
Figura 23 - OnlineCleaner acoplado, recuperando artefatos.....	68
Figura 24 - Câmara de injeção: alternativas de projetos construtivos.....	75
Figura 25 - Volume de controle e malha computacional da câmara de injeção.....	77
Figura 26 - Malha da simulação do escoamento na câmara de injeção.....	78
Figura 27 - Imagens 3D da simulação de velocidade na câmara modificada.....	79
Figura 28 - Plano para orientar a simulação na seção central da câmara.....	80
Figura 29 - Velocidade no plano XY (versão modificada da câmara de injeção).....	80
Figura 30 - Resultados da simulação do módulo do vetor velocidade.....	82
Figura 31 - Simulação do vetor velocidade na câmara de injeção modificada.....	83
Figura 32 - Componente w da velocidade no plano ZY.....	83
Figura 33 - Componente v da velocidade no plano ZY.....	85
Figura 34 - Componente u da velocidade no plano ZY.....	86
Figura 35 - Simulação das linhas de corrente do escoamento.....	88
Figura 36 - Imagens capturadas da trajetória dos artefatos de limpeza.....	89
Figura 37 - Resultados da simulação do campo de pressão do escoamento.....	91
Figura 38 - Resultados da pressão simulada na câmara de injeção.....	91
Figura 39 - Resultados da simulação do Número de Reynolds Turbulento.....	93
Figura 40 - Resultado da simulação da intensidade de turbulência.....	94
Figura 41 - Circuito hidráulico de recuperação dos artefatos de limpeza.....	98
Figura 42 - Volume de controle do escoamento no circuito das câmaras.....	98
Figura 43 - Malha computacional do escoamento no circuito das câmaras.....	99
Figura 44 - Detalhes da malha computacional em áreas críticas.....	99
Figura 45 - Módulo V do vetor velocidade no plano central ZX.....	100
Figura 46 - Módulo V do vetor velocidade no plano central XY.....	101
Figura 47 - Linhas de corrente (streamlines) no domínio do escoamento.....	102
Figura 48 - Artefatos de limpeza navegando nas linhas de corrente.....	103
Figura 49 - Componente w do vetor velocidade do escoamento no plano ZX.....	104
Figura 50 - Componente w do vetor velocidade do escoamento no plano YX.....	105

Figura 51 - Componente u do vetor velocidade do escoamento no plano ZX ..	106
Figura 52 - Componente u do vetor velocidade (escala modificada)	106
Figura 53 - Componente u do vetor velocidade (escala modificada)	107
Figura 54 - Componente v do vetor velocidade do escoamento no plano ZX...	107
Figura 55 - Componente v do vetor velocidade do escoamento no plano XY ..	108
Figura 56 - Pressão do escoamento no plano ZX	109
Figura 57 - Pressão do escoamento no plano XY	110
Figura 58 - Pressão do escoamento no plano XY (escala modificada)	110
Figura 59 - Número de Reynolds turbulento (escoamento no plano ZX)	111
Figura 60 - Número de Reynolds turbulento (escala modificada)	112
Figura 61 - Número de Reynolds turbulento (escoamento no plano XY)	112
Figura 62 - Intensidade de turbulência no escoamento, no plano ZX	113
Figura 63 - Intensidade de turbulência no escoamento, no plano XY	113
Figura 64 - Intensidade de turbulência no plano XY (escala modificada)	114

Lista de tabelas

Tabela 1 - Ensaios de injeção do <i>OnlineCleaner</i> acoplado ao trocador de calor	67
Tabela 2 - Ensaios de recuperação do <i>OnlineCleaner</i> acoplado ao trocador	69
Tabela 3 - Ganhos de perda de carga resultante da mudança da peneira	92
Tabela 4 - Teste de malha de cada grandeza utilizada	130

Lista de Apêndices

APÊNDICE A: Projeto Construtivo das Câmaras de artefatos de limpeza	127
APÊNDICE B: Confiabilidade dos resultados, convergência da simulação e teste de malhas	129

Nomenclatura

A	Área	$[m^2]$
a	Ar fluido quente	$[-]$
c_p	Calor específico à pressão constante	$[J/(kg \cdot K)]$
D	Diâmetro do tubo	$[m]$
D_i	Diâmetro interno	$[m]$
D_o	Diâmetro externo	$[m]$
D_ω	Termos de difusão definidos pelo usuário (S_k e S_ω)	$[-]$
F_1	Função de mistura principal	$[-]$
F_2	Função de mistura auxiliar	$[-]$
g	Gravidade	$[m/s^2]$
G_κ	Produção de energia cinética	$[(kg \cdot m^2) / s^2]$
G_ω	Produção de ω (<i>omega</i>)	$[(kg \cdot m^2) / s^2]$
h_i	Coefficiente de transferência de calor por convecção (fluxo de entrada)	$[W/(m \cdot K)]$
h_o	Coefficiente de transferência de calor por convecção (fluxo de saída)	$[W/(m \cdot K)]$
k	Condutividade térmica	$[W/(m \cdot K)]$
L	Comprimento do tubo	$[m]$
\dot{m}	Vazão mássica do fluido de trabalho	$[kg/s]$
\dot{m}_a	Vazão mássica do ar	$[kg/s]$
\dot{m}_w	Vazão mássica da água	$[kg/s]$
n	Número de artefatos de limpeza	$[-]$
N	Número de tubo do trocador de calor	$[-]$
p	Quantidade de ciclos individuais de limpeza online	$[-]$
\bar{q}	Soma média quadrática dos componentes da flutuação de velocidade	$[m/s]$
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor	$[kW]$
\dot{Q}_{Real}	Taxa da quantidade real de calor trocado entre os fluidos de trabalho	$[kW]$
\dot{Q}_{Maximo}	Taxa da quantidade máxima de calor que poderia ser trocada	$[kW]$
$R_{fouling}$	Resistência térmica imposta pela incrustação	$[(m^2 \cdot K) / kW]$
R_{wall}	Resistência térmica da parede do sistema	$[(m^2 \cdot K) / kW]$
S_{ij}	Tensor taxa de deformação	$[-]$
U	Coefficiente global de transferência de calor	$[kW/(m^2 \cdot K)]$
u	Componente do vetor velocidade do fluido ao longo do eixo x	$[m/s]$
u', v', w'	Componentes da flutuação de velocidade turbulenta nas direções x, y e z	$[m/s]$
v	Componente do vetor velocidade do fluido ao longo do eixo y	$[m/s]$
$ \vec{V} $	Vetor velocidade	$[m/s]$
w	Componente do vetor velocidade do fluido ao longo do eixo z	$[m/s]$
x, y, z	Eixos coordenados de referência	$[m]$
Y_κ	Dissipação da energia cinética	$[m^2/s^3]$
Y_ω	Dissipação devido a turbulência ω (<i>omega</i>)	$[m^2/s^3]$

Símbolos gregos

ΔP	Perda de carga	[Pa]
κ	Energia cinética turbulenta	[m ² /s ²]
μ	Viscosidade cinemática do fluido	[m ² /s]
μ_t	Viscosidade turbulenta do fluido	[m ² /s]
ρ	Densidade do fluido de trabalho do trocador	[kg/m ³]
σ_κ	Número de Prandtl turbulento para κ (<i>kappa</i>)	[-]
σ_ω	Número de Prandtl turbulento para ω (<i>omega</i>)	[-]
ω	Dissipação de turbulência	[m ² /s ³]

Siglas

CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CONDE	Contador de artefatos de limpeza
HTRI	Heat Transfer Research, Inc.
MIT	Instituto Tecnológico de Massachusetts
<i>OnlineCleaner</i>	Dispositivo inovador de limpeza online de trocadores de calor
PHEs	Plate Heat Exchangers
PósMQI	Programa de Pós-Graduação em Metrologia
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
SST	Shear Stress Transport
STHE	Shell Tubes Heat Exchangers
TEMA	Tubular Exchanger Manufacturer's Association

1. Introdução

No contexto da evolução da engenharia contemporânea, o uso de trocadores de calor se consolida como alternativa tecnológica prática e eficaz, encontrando aplicação em diversos segmentos do setor produtivo. A simplicidade do equipamento (desprovido de partes móveis), associado à sua capacidade de viabilizar a troca de calor entre dois ou mais fluidos em diferentes condições termodinâmicas, qualificam o uso de trocadores de calor para distintas aplicações industriais. Dentre os muitos exemplos, destacam-se o seu uso em sistemas de arrefecimento de equipamentos de processos de geração de energia, sistemas centrais de condicionamento de ar de grandes centros comerciais e hospitais; plataformas de prospecção e extração de petróleo e gás natural, fabricação de produtos químicos, processamento de hidrocarbonetos (Kays & London, 1964; Bott & Melo, 1997; Frota et al., 2023). A eficácia do processo de transferência de energia térmica entre os fluidos de trabalho do trocador é essencial para assegurar a eficiência operacional dos processos industriais, com impacto econômico nos setores em que são utilizados. Não obstante a sua aplicabilidade e simplicidade de operação, há que se ter em mente que os fluidos de trabalho do trocador ao circularem pelo trocador, inevitavelmente, causam depósito de incrustação nas superfícies de troca de calor, não apenas comprometendo a efetividade do processo de troca de calor, mas, também, drasticamente impactando nos custos de bombeamento desses fluidos de trabalho.

O acúmulo de incrustações no trocador de calor compromete o processo de transferência de calor em suas superfícies internas, podendo, inclusive, causar corrosão de partes metálicas e, em situações extremas, levar à falha operacional do equipamento (OGBONNAYA; AJAYI, 2017). Alternativas de técnicas para remover incrustações continuam motivando pesquisas tecnológicas. O combate a esse inevitável problema que tão drasticamente compromete a eficácia dos sistemas de arrefecimento de processos industriais é, portanto, vital para aprimorar a operação de trocadores de calor, por conseguinte impactando na eficácia dos processos industriais que fazem uso de trocadores de calor. Como uma abordagem

proativa, engenheiros encontram motivação para realizar pesquisas que visam a mitigação da incrustação em trocadores de calor (BOTT; MELO, 1997; OGBONNAYA; AJAYI, 2017).

Várias técnicas de limpeza de trocadores de calor foram desenvolvidas para manter as condições hidrodinâmicas e a eficácia desses dispositivos, aliviando assim as consequências da incrustação. As estratégias aplicadas dependem dos componentes presentes nos fluidos de trabalho do trocador de calor e variam em sua abordagem, desde práticas que exigem o desligamento completo do equipamento para permitir a limpeza dos trocadores (denominadas técnicas de limpeza *off-line*), às que podem ser implementadas enquanto o equipamento de processo encontra-se em operação (denominadas técnicas de limpeza *online*).

As técnicas *off-line* incluem a limpeza química, em que detergentes e/ou produtos químicos mais agressivos são geralmente usados para remover depósitos de incrustação, corrosão e outros contaminantes (OBOT *et al.*, 2019; SINGH *et al.*, 2021); a limpeza magnética, em que o escoamento é submetido a um campo magnético para capturar partículas ferromagnéticas presentes nos fluidos de trabalho. Alternativas do método de limpeza eletrônica (CHO; CHOI, 1999) contribuem para a prevenção de incrustações minerais nas superfícies de troca de calor do trocador. Esse método utiliza um dispositivo que cria um campo magnético ou elétrico para alterar a forma como os minerais se aglomeram no fluido, contribuindo para que se desprendam das paredes internas e sejam descartados no fluxo do fluido de trabalho. Como resultado, em vez de aderir às superfícies internas do trocador, esses minerais permanecem em suspensão e fluem pelo escoamento do fluido refrigerante, reduzindo a necessidade de limpeza mais intensa e frequente (CHO *et al.*, 1998; GARCÍA GÓMEZ, 2016; HUANG; LIN, 2023). Dentre os processos de limpeza *off-line*, os mais comuns são os de limpeza abrasiva por escovação mecânica das superfícies internas dos tubos do trocador, o que requer a sua completa desmontagem e, por conseguinte, a interrupção do processo fabril já que o processo manual faz uso de material abrasivo para remover a sujeira por meio de jatos de água em altas pressões (AWAIS; BHUIYAN, 2019; SEOL *et al.*, 2020). Embora os métodos acima descritos possam ser considerados eficazes, apresentam certas limitações, incluindo interrupções dispendiosas do processo produtivo e um tempo considerável para viabilizar a limpeza, o que prolonga a duração da

interrupção. Além disso, os custos associados a essas intervenções podem ser expressivas e, em alguns casos, os métodos que fazem uso de materiais abrasivos que podem comprometer a integridade mecânica de partes do trocador e contaminar o meio ambiente (PRETORO et al., 2021).

As alternativas de limpeza *online* são promissoras, já que não interrompem o processo fabril durante a sua execução, o que resulta em ganhos econômicos, maior eficiência e vida útil prolongada do equipamento (MA et al., 2022).

No contexto de um esforço integrado de pesquisa desenvolvido pelo Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio, três projetos de P&D foram desenvolvidos com sucesso, cada um deles contribuindo para o avanço do desenvolvimento de uma alternativa tecnológica de limpeza *online* de trocadores de calor, progressivamente agregando-lhe melhorias incrementais. Características desses desenvolvimentos são discutidas neste trabalho. Em sintonia com esses desenvolvimentos, esta dissertação de mestrado concentra-se na simulação hidrodinâmica do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza em circuitos hidráulicos críticos do sistema de limpeza *online de trocadores de calor*, enquadrando-se em uma das linhas de investigação do Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio.

1.1.

Definição do problema de pesquisa

O problema central desta pesquisa refere-se ao estudo e solução de limitações operacionais identificadas em componentes do dispositivo de limpeza online de trocadores de calor acima referenciado. Num primeiro momento, fez-se uso de uma ferramenta computacional de projetos mecânicos (SolidWorks) para avaliar a consistência mecânica de componentes críticos do projeto construtivo anteriormente desenvolvido.

Na sequência, uma outra ferramenta computacional foi utilizada (Ansys Fluent) para simular o complexo escoamento que ocorre no interior de tramos hidráulicos críticos do dispositivo de limpeza online, mais especificamente, simulação CFD (Computation Fluid Dynamics) do escoamento no interior das câmaras de injeção e de recuperação dos artefatos de limpeza utilizados para realizar a remoção da incrustação acumulada nas superfícies de transferência de calor do trocador.

No contexto dos desenvolvimentos realizados, foi possível formular a questão principal que a pesquisa proposta busca responder, questão essa relacionada ao aprimoramento do projeto construtivo do dispositivo de limpeza online de

trocadores de calor. O objetivo específico é reduzir as perdas de carga nos circuitos hidráulicos do equipamento concebido, visando ganhos de eficácia e eficiência operacional do processo de limpeza online concebido para remover indesejáveis incrustações que tão drasticamente comprometem a efetividade dos trocadores de calor e impactam nos custos de bombeamento.

A formulação desta questão central levanta as seguintes questões específicas, que este trabalho também se propôs a responder:

- qual é o impacto das inovações incrementais introduzidas no escoamento hidrodinâmico do fluido refrigerante utilizado como meio de transporte dos artefatos de limpeza na eficácia operacional do dispositivo de limpeza online concebido?
- quais é a eficácia de utilizar um código computacional de CFD (Ansys Fluent) como ferramenta estratégica de aprimoramento de projetos complexos de equipamentos industriais?
- são as são as perspectivas de utilizar a ferramenta computacional para orientar estudos mais complexos do escoamento tridimensional dos fluidos de trabalho de trocadores de calor, expostos a gradientes moderados de temperatura (cerca de 10 a 20 °C) no pequeno espaço entre os tubos do trocador?

1.2.

Objetivos: Geral e específicos

Para atingir o objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a eficácia dos métodos atuais de limpeza de trocadores de calor e destacar as limitações das alternativas tecnológicas disponíveis.
- Avaliar, do ponto de vista hidrodinâmico, a eficácia de operação do dispositivo de limpeza *online* de trocadores de calor em sua configuração atual, com atenção especial aos problemas relacionados às quedas de pressão que resultam da intrincada geometria de seus tramos hidráulicos.
- Analisar os resultados das simulações computacionais dos campos de velocidade, pressão e intensidade de turbulência associados ao escoamento no interior de componentes críticos do dispositivo de limpeza *online*.
- Comparar resultados da simulação CFD com resultados experimentais medidos durante ensaios de validação do equipamento desenvolvido.
- Comprovar, por meio das simulações realizadas antes e após a incorporação das modificações introduzidas no projeto construtivo do dispositivo de limpeza online de trocadores de calor, os reais ganhos obtidos no desempenho operacional do equipamento de limpeza *online*.

1.3. Metodologia

Em conformidade à abordagem sistemática proposta por Almeida (ALMEIDA, 2021), esta pesquisa de mestrado classifica-se como:

- **Pesquisa descritiva**, já que busca descrever as características de um fenômeno ou a relação entre variáveis. Nesse caso, a pesquisa descritiva contribui para o entendimento e descrição das características dos fenômenos envolvidos no sistema de limpeza *online* de trocadores de calor, com impacto na perda de carga que precisa ser superada em função de indesejáveis incrustações, que, inevitavelmente, comprometem a efetividade do trocador e impactam nos custos de bombeamento.
- **Pesquisa aplicada**, já que visa gerar conhecimento para a solução de problemas específicos. Nesse caso, a pesquisa aplicada contribui para encontrar soluções para mitigar o inevitável problema da incrustação que se acumula no interior dos tubos de trocadores de calor.
- **Pesquisa intervencionista**, já que está relacionada à participação ativa do pesquisador no fenômeno objeto do estudo, cujo objetivo central é conseguir contribuir para desdobramentos futuros de alternativas de limpeza *online* de trocadores de calor. No caso desta pesquisa de mestrado, as intervenções objetivam contribuir para reduzir as perdas de carga que comprometem a eficácia de operação do dispositivo de limpeza.

A Figura 1 detalha as diferentes etapas do projeto de pesquisa desenvolvido segundo as variantes metodológicas acima caracterizadas (descritiva, aplicada e conclusiva).

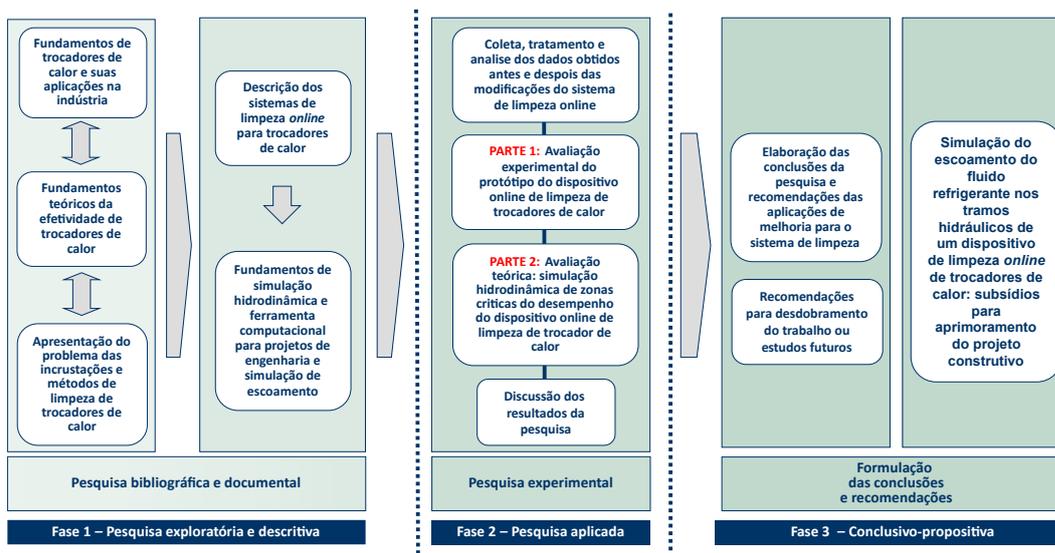


Figura 1 - Desenho da pesquisa.

A Figura 2 apresenta o mapa conceitual da pesquisa, destacando as referências bibliográficas impactantes em suporte ao seu desenvolvimento, O trabalho também apresenta a extensa bibliografia estudada, incluindo trabalhos

correlatos à simulação, por exemplo, sistemas de limpeza de trocadores de calor, projetos de trocadores de calor, o complexo fenômeno associado à formação de fouling, e alternativas de monitoramento da efetividade de trocadores de calor.

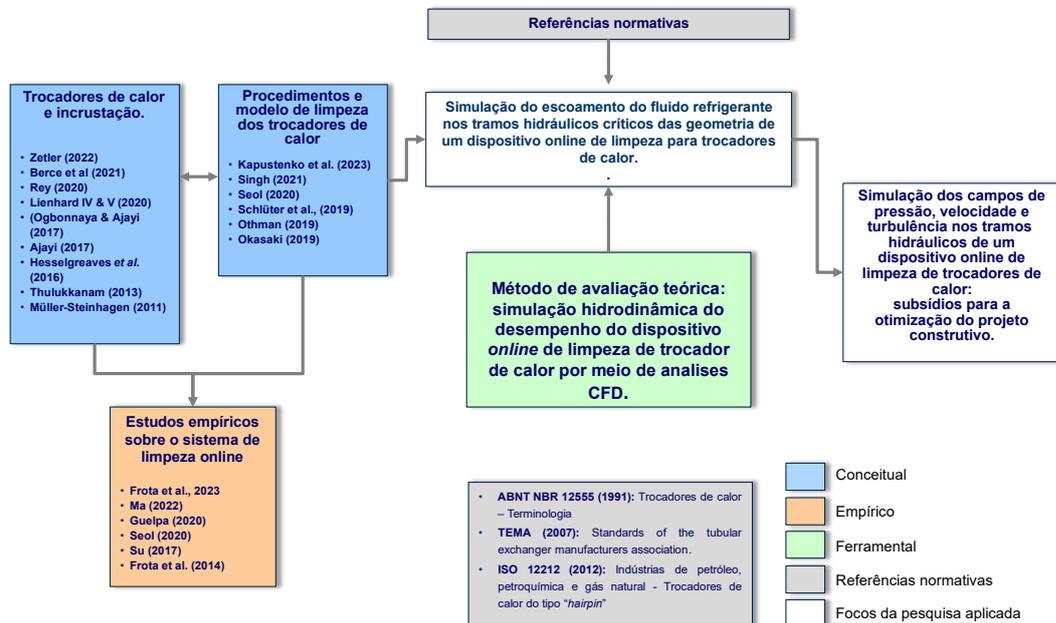


Figura 2 - Mapa conceitual da pesquisa

Os resultados da simulação CFD nos circuitos hidráulicos críticos do protótipo de limpeza *online* de trocadores de calor permitiu gerar uma massa de dados que complementa o acervo de informações experimentais gerados em ensaios de validação, assim orientando a introdução de inovações incrementais no protótipo do equipamento concebido.

1.4. Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos, incluindo esta introdução.

O Capítulo 2 apresenta uma pesquisa abrangente da literatura especializada, descrevendo o estado da arte relacionado ao desempenho de trocadores de calor, enfatizando suas diferentes aplicações industriais e as técnicas off-line e *online* de limpeza.

O Capítulo 3 resume as etapas de desenvolvimento do dispositivo de limpeza online de trocadores de calor, concebido por pesquisadores do Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio. Descreve resultados de projetos de

P&D que viabilizaram protótipos do dispositivo, culminando numa versão comercializável. Também discute resultados de ensaios em laboratório e campo, validando o equipamento como alternativa eficaz de limpeza *online*.

O Capítulo 4 apresenta (i) as versões original e modificada dos respectivos projetos construtivos das câmaras de injeção e de recuperação dos artefatos de limpeza. (ii) Detalha os aprimoramentos incorporados no projeto construtivo dessas câmaras, apresenta a ferramenta computacional utilizada para desenvolver o projeto mecânico (*SolidWorks*), e o software de simulação numérica por CFD (*Ansys Fluent*) utilizado. (iv) Apresenta as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento linear que governam o complexo escoamento estudado, segundo a abordagem RANS, que trabalha a média das equações de *Navier-Stokes*, utilizando o modelo $k-\omega$ SST de turbulência ao longo do tempo. Apresenta, também, (v) a montagem experimental utilizada nos ensaios de validação do dispositivo inovador de limpeza online proposto, e utilizados como dados de entrada da simulação CFD realizada.

O Capítulo 5 apresenta uma análise detalhada dos resultados da simulação CFD dos campos de velocidade, pressão e intensidade de turbulência do escoamento do fluido de trabalho em três circuitos hidráulicos críticos do trocador de calor: (i) escoamentos independentes nas versões original e modificada das câmaras de injeção e recuperação de artefatos de limpeza e (ii) circuito hidráulico que integra ambas as câmaras. Esses resultados contribuíram para incorporar melhorias incrementais ao projeto do equipamento de limpeza online. A influência das peneiras de retenção dos artefatos de limpeza também é discutida. O capítulo explora as implicações dos resultados, identifica variáveis principais, correlações e discrepâncias entre resultados teóricos e experimentais. Uma abordagem analítica é adotada para discutir melhorias no desempenho do dispositivo e desafios de implementação no campo industrial, visando aprimorar o uso e manutenção de trocadores de calor. Em suma, o capítulo combina teoria e prática para avaliar o impacto real e perspectivas futuras do dispositivo.

Concluindo, o Capítulo 6 apresenta as conclusões, avaliando os pontos fortes, fracos e possibilidades de novos aprimoramentos do dispositivo de limpeza *online*. Com base no aprendizado obtido, propõe recomendações para pesquisas futuras, visando agregar inovações ao dispositivo.

2. Trocadores de calor: retrospectiva histórica e aplicações industriais

Sem pretender precisar a data de sua origem, concepção e suas diferentes aplicações industriais, trocadores de calor ganharam notoriedade no início da segunda revolução industrial, período consagrado de expressivo progresso tecnológico e de um crescimento industrial sem precedentes. Durante essa época, as usinas de energia encontravam-se em plena expansão tendo despertado crescente demanda operacional por tecnologias alternativas de transferência de calor. Surgiram, assim, os primeiros projetos de trocadores de calor, fundamentados em preceitos teóricos de termodinâmica e transferência de calor entre fluidos em movimento. Foi nesse contexto que esses dispositivos começaram a ser utilizados em sistemas de arrefecimento de equipamentos utilizados em processos industriais e de usinas geradoras de energia, aplicações essencialmente práticas comumente utilizadas de forma crescente desde então (MOKYR; STROTZ, 2000; WANG *et al.*, 2007; ZOGG, 2008).

O final da década de 1880, até 1920, foi marcado por avanços significativos no desenvolvimento e aplicação de trocadores de calor. Pioneiros na sua concepção, trocadores de calor do tipo placas planas (*Plate Heat Exchangers*, PHEs), ganharam destaque desencadeando uma onda de depósitos de patentes com diferentes aplicações industriais (*e.g.*, arrefecimento de equipamentos de processos industriais, equipamentos da indústria de laticínios para pasteurização de leite e em processos de fermentação da indústria cervejeira, apenas para citar alguns exemplos). O ano de 1923 registrou um marco na história do uso de trocadores de calor com a inédita invenção de Richard Seligman do primeiro dispositivo comercialmente viável de seu tipo que revolucionou os métodos de aquecimento e resfriamento de fluidos (ZOGG, 2008; SINGH DHAKAR *et al.*, 2020). O projeto de Seligman, utilizando placas finas de metal (alta condutividade térmica), lançou as bases para o conceito de trocadores de calor ainda hoje utilizados. Seu *design* representou um avanço tecnológico não apenas em praticidade, mas, também, em termos de ganhos de eficiência de processo, assim estabelecendo um padrão para

trocadores de calor projetados por ferramentas computacionais de auxílio a projetos hoje utilizadas em todo o mundo.

Simultaneamente, a década de 1920 trouxe consigo os primeiros projetos de trocadores de calor do tipo casco-tubos (*Shell Tubes Heat Exchangers*, STHE).

Com o surgimento da indústria do petróleo, esses dispositivos foram concebidos e aperfeiçoados para aquecer ou resfriar o óleo em caldeiras e condensadores utilizados em plantas de petróleo bruto. Eles também encontraram seu lugar em aplicações industriais que operam em ambientes agressivos ou de alta pressão. No entanto, durante esse período, projetos de trocadores de calor tubulares eram limitados, baseados na intuição e em informações técnicas provenientes de bancos de dados de tubulações ideais. Os projetos construtivos eram essencialmente fundamentados na resistência dos materiais empregados sem, entretanto, se preocupar em otimizar os mecanismos de transferência de calor envolvidos e, tampouco, sem fundamentar o projeto em avaliações experimentais referenciadas a medições confiáveis das características térmicas dos processos térmicos envolvidos (KAKAÇ *et al.*, 2002).

Na década de 1930, após a Primeira Guerra Mundial, a Suécia tornou-se protagonista no campo dos trocadores de calor. Naqueles anos, produziu o primeiro trocador de calor de placas corrugadas espirais, um marco que contribuiu significativamente para o desenvolvimento dessa tecnologia de arrefecimento de equipamentos de processos industriais. Ao longo da década, a Suécia continuou sua incursão nesse campo e criou o primeiro trocador de calor a placas para uso em fábricas de celulose, uma inovação que impactou a indústria e mostrou a versatilidade e simplicidade desses dispositivos (ZOGG, 2008). Por outro lado, o Reino Unido também contribuiu para os progressos tecnológicos de dispositivos similares. Nesta mesma década, o método de *brazing*¹¹ começou a ser utilizado para fabricar um trocador de calor de placas e tubos aletados. Este novo tipo de trocador, construído de cobre e materiais de liga de cobre, destinava-se principalmente a aplicações em motores de aeronaves, expandindo o mercado de trocadores de calor

¹¹ Brasagem ou solda brasagem, processo de soldagem em altas temperaturas (superior a 450 °C) sem, entretanto, comprometer a temperatura de fusão do material submetido à solda.

para outras indústrias e aplicações mais sofisticadas (KELVION *et al.*, 2023; LEGORRETA *et al.*, 1999).

Com o advento da Segunda Grande Guerra, na década de 1940, e motivados pela necessidade de ganhos de eficácia, os projetistas de trocadores de calor do tipo casco-tubos aprimoraram seus projetos para levar em consideração a perda de efetividade operacional do trocador causada pela queda de pressão nos circuitos hidráulicos internos do trocador. Esses problemas, agravados pelo inevitável acúmulo de incrustações nas superfícies internas de troca de calor do trocador, passaram a merecer maior atenção dos projetistas, que sofisticaram seus projetos. A presença da incrustação (*fouling*) forçosamente aumenta a resistência térmica ao mecanismo de transferência de calor, reduzindo a sua efetividade e drasticamente impactando nos custos de bombeamento dos fluidos de trabalho do trocador, podendo, em casos extremos, causar a falha e ou interrupção total do equipamento. Na sequência dos avanços tecnológicos, em 1941, a *Tubular Exchanger Manufacturers Association* (TEMA) estabeleceu padrões de projeto mais rígidos e uniformes. A TEMA é uma norma de padronização de construção mecânica dos trocadores de calor tubulares, que leva em consideração três classes de trocador de calor de casco tubo. Esse movimento em direção a padrões mais padronizados representou um avanço significativo na qualidade e eficácia dos trocadores de calor (LODES E CAMPO, 2010).

Durante a década de 1950, a engenharia térmica vivenciou avanços notáveis, especialmente na indústria de trocadores de calor. Em 1955, pesquisadores da Stanford University, na Califórnia, EUA, (KAYS; LONDON, 1964), colaborando com o desenvolvimento de projetos de pesquisa da General Motors, lançaram a primeira edição do livro *Compact Heat Exchangers* (McGraw-Hill Serie in Mechanical Engineering), inovando ao oferecer referências valiosas e informações técnicas suplementares demandadas por projetistas de superfícies de transferência de calor mais compactas e mais eficazes para aplicação em trocadores de calor de turbinas a gás. Desde então, a indústria tem se esforçado para desenvolver trocadores de calor compactos de alto desempenho, operando em temperaturas elevadas, a exemplo dos processos que ocorrem na operação de turbinas a gás. No entanto, além do campo de trocadores de turbinas a gás, a recente aceleração da

tecnologia de veículos espaciais abriu um campo inteiramente novo de aplicações de superfícies compactas de transferência de calor.

Em 1950, a empresa americana Babcock & Wilcox (B&W), desde 1867 já comprometida com a geração segura de energia, em colaboração com o inventor Johannes H. Ammon, formalizou um pedido de patente do trocador de calor do tipo casco-tubos, só concedida em 1965, reflexo dos rigorosos processos de validação (BABCOCK & WILCOX, 2023). A patente concedida teve grande impacto na indústria de trocadores de calor até cair em domínio público em 1982. Paralelamente, a década de 1950 também foi marcada por progressos na computação gráfica, que revolucionou a concepção associada ao desenvolvimento de projetos mecânicos de equipamentos. Em 1957, o *Computer Aided Design* (CAD) foi introduzido por Dr. Patrick J. Hanratty, com seu programa PRONTO. Contudo, o verdadeiro marco ocorreu na década de 1960, quando Ivan Sutherland, na Universidade de Massachusetts (MIT), desenvolveu o primeiro software CAD oficial, consolidando ferramentas CAD na elaboração de projetos para trocadores de calor (TORNINCASA *et al.*, 2010).

Nesse contexto, em 1962 foi fundada a Heat Transfer Research, Inc. (HTRI), com sede nos Estados Unidos e representações em outros países, entendida como a primeira organização internacional dedicada à pesquisa e projetos de trocadores de calor. Ao longo dos anos, a HTRI estabeleceu-se como uma das instituições de pesquisa sobre trocadores de calor globalmente reconhecida. Organizadora e patrocinadora de um fórum mundial de trocadores de calor dedicado ao estudo e pesquisa do complexo fenômeno de formação de *fouling* em trocadores de calor, a HTRI reúne, a cada dois anos, pesquisadores e fabricantes de trocadores de calor, fórum esse já em sua XV edição²². Seu software tem sido fundamental na concepção e projeto de diversos tipos de trocadores de calor.

Apesar desses rápidos avanços no projeto assistido por ferramentas computacionais, a adaptação de modelos térmicos computacionais teve um início mais gradual, consolidando-se comercialmente na década de 1970. A partir de então, a incorporação da ferramenta computacional de dinâmica de fluidos (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) na análise e projeto de trocadores marcou

²² <https://www.heatexchanger-fouling.com>

um ponto de inflexão significativo nos avanços tecnológicos. O CFD, com sua capacidade de simular fluxos complexos de fluidos e padrões de transferência de calor, transformou a abordagem dos engenheiros para os desafios presentes nos trocadores de calor. Esta ferramenta computacional é promissora já que permite aperfeiçoar projetos ao antecipar problemas antes mesmo de os equipamentos serem fabricados.

A adoção de ferramentas computacionais para projeto, modelagem e simulação tornou-se uma prática padrão internacionalmente aceita. Ao longo das duas últimas décadas, a comunidade de engenharia testemunhou melhorias e sofisticções substanciais no desenvolvimento especializado de software para projetos de trocadores de calor, a exemplo do HTRI *Exchange Suite*, que opera sob os padrões TEMA, ainda considerados essenciais no projeto de trocadores do tipo casco-tubos. Tais padrões são categorizados em três classes: Classe R, para refinarias e petróleo; Classe C, para aplicações comerciais e Classe B, para processos químicos. Do início da década de 1980 até o presente houve avanços significativos no projeto e operação de trocadores de calor. É importante notar que a pesquisa continua sendo considerada como prioridade na indústria de trocadores de calor. Já na década de 1990, o uso de ferramentas computacionais de projetos contribuiu de forma expressiva para o progresso da indústria de trocadores de calor, notadamente com o desenvolvimento de microprocessadores. Resultado desses avanços, que permitiram maior capacidade computacional, passou a ser possível integrar as equações que governam os complexos escoamentos dos fluidos de trabalho do trocador de calor com sofisticados modelos de turbulência, assim viabilizando a simulação do comportamento hidrodinâmico e térmico dos processos de transferência de calor (VALDÉS ORTIZ *et al.*, 2017a). Quanto à geometria dos trocadores de calor, estudos têm sido realizados para melhorar seu desempenho e torná-los mais compactos. Por exemplo, no caso de radiadores de veículos automotivos, diferentes geometrias de superfícies de transferência de calor foram analisadas para melhorar a transferência de calor e o desempenho de resfriamento. Com o advento das nanotecnologias, as propriedades termofísicas de nano fluidos (*i.e.*, fluidos contendo partículas nanométricas em suspensão), têm sido investigadas para melhorar a eficiência e a eficácia de trocadores de calor convencionais (SILVA-YUMI *et al.*, 2021).

Em paralelo, o estudo da nano fluídica abriu portas para potenciais melhorias no desempenho dos trocadores de calor. Esta é uma área nova da ciência em que nano fluidos são obtidos a partir da suspensão de partículas de tamanho nanométrico (entre 1 nm e 100 nm) em fluidos convencionais utilizados para melhorar o processo de transferência de calor. Além disso, inovações em técnicas de projeto e otimização têm se estabelecido como fatores determinantes na melhoria do desempenho desses dispositivos em diversas aplicações industriais (AL-WAELI *et al.*, 2019; XU *et al.*, 2019).

Métodos de otimização baseados em análises e critérios energéticos e ambiental passaram a constituir preocupação dos projetistas de trocadores de calor, a exemplo de desenvolvimentos de geradores de vapor de recuperação de calor em plantas de ciclo combinado (FESANGHARY *et al.*, 2009; FETTAKA; *et al.*, 2013)

Em sintonia com os avanços e progressos em tecnologias de trocadores de calor, esta pesquisa de mestrado fez uso de uma ferramenta computacional de CFD para realizar a simulação de tramos hidráulicos críticos de um equipamento inovador de limpeza *online* (FROTA *et al.*, 2023) de trocadores de calor que faz uso de duas câmaras para injeção e recuperação de artefatos de limpeza introduzidos no interior dos tubos do trocador para impedir que incrustações se acumulem nas superfícies internas dos tubos do trocador. Para viabilizar a limpeza dos tubos do trocador, o dispositivo de limpeza *online* é acoplado por meio de engates rápidos aos dutos de alimentação e retorno dos fluidos de refrigeração do trocador. Este dispositivo de limpeza *online* tem por objetivo mitigar o *fouling* que indesejavelmente se acumula nas tubulações e que drasticamente compromete a efetividade do trocador.

Uma ferramenta computacional de CFD foi utilizada para agregar inovação ao projeto mecânico de componentes críticos do sistema de limpeza *online* concebido, visando aprimorar a hidrodinâmica dos escoamentos dos fluidos de trabalho e reduzir custos associados ao seu bombeamento, que é o meio de transporte dos artefatos de limpeza introduzidos em tempo real no interior dos tubos do trocador. No presente estudo, e visando gerar dados experimentais para comparação com os resultados da simulação, o dispositivo inovador de limpeza *online*-dos tubos do trocador de calor foi acoplado a trocadores de calor do tipo tubular utilizados no sistema de refrigeração de um hidrogerador (44 MW de

potência) em operação no complexo hidrelétrico da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, no Estado do Rio de Janeiro.

2.1.

Classificação e aplicações de trocadores de calor

Na grande maioria das indústrias, os trocadores de calor são equipamentos essenciais do sistema de refrigeração de equipamentos de processos industriais a ele acoplado. São equipamentos auxiliares que viabilizam a troca de calor entre os fluidos de trabalho do trocador; ou seja, o “fluido frio” troca calor com o “fluido quente”, conseguindo, assim, refrigerar componentes fixos e móveis (*e.g.*, mancais, cabeamento, estator bobinas) do equipamento de processo. Dentre alguns exemplos de processos, consegue-se (i) e elevar a temperatura de um fluido, a exemplo do que ocorre na geração de energia, em que o vapor quente pode aquecer água fria quando em escoamento em tubulações de equipamentos de processos industriais ou sistemas de aquecimento de edifícios; (ii) refrigerar e manter temperaturas de fluidos e produtos, visando preservar a sua integridade e qualidade, a exemplo de processos que ocorrem na indústria alimentícia e farmacêutica; (iii) realizar a condensação de gases, tal qual ocorre nos setores petroquímico e de refino, em que a temperatura de gases de condensação precisa ser ajustada para condições específicas associadas ao armazenamento e transporte dos produtos envolvidos e (iv) realizar a evaporação de determinados líquidos, assim viabilizando processos de mudança de fase de líquidos em gases ou vapores, a exemplo do que ocorre em processos de turbinas a vapor em usinas térmicas.

Esses são apenas alguns exemplos das muitas aplicações associadas ao condicionamento de ambientes, purificação de efluentes, destilação e sistemas de resfriamento que fazem uso de trocadores de calor. Dentre outras classificações propostas na literatura especializada, trocadores de calor podem ser classificados segundo suas diferentes aplicações industriais, conforme ilustrado na Figura 3.

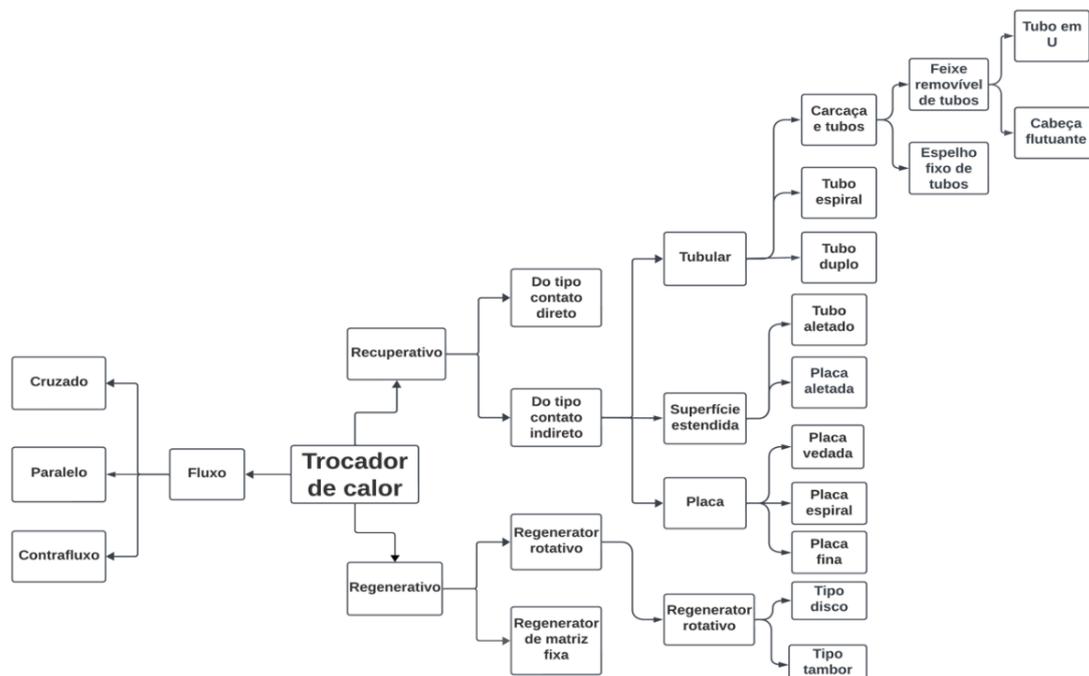


Figura 3 - Alternativa de taxonomia de trocadores de calor.
Fonte: Adaptado de (ZOHURI, 2017)

2.1.1.

Trocadores segundo o processo de transferência de calor

Dentre outras classificações, trocadores de calor podem ser agrupados de acordo com o escoamento de seus fluidos de trabalho, a seguir caracterizado:

- Trocadores de calor de contacto indireto** – Os fluidos de trabalho são mantidos separados, assegurando-se de que não haja mistura ou contato entre eles. A transferência de calor é constante e eficiente através de uma parede divisória impermeável que separa os fluidos de trabalho do trocador (condição comumente denominada de *unmixed fluids*). Essa característica garante que haja apenas a interação térmica, sem a possibilidade de troca de massa entre as substâncias dos fluidos de trabalho. Exemplos dessa classificação são trocadores de calor do tipo tubular (os dutos do trocador são de seção circular); trocadores de calor do tipo placas planas horizontais ou verticais; trocadores de calor do tipo casco-tubos, frequentemente utilizados na indústria nuclear e em sistemas de refrigeração. Usualmente, no campo industrial, esses dispositivos são conhecidos como recuperadores de calor que, por sua vez, podem ser reclassificados segundo a sua tipologia; *i.e.*, trocadores por transferência direta, monofásico ou multifásico, tipo estacionário e leito fluidizado (Reddy, 2003; Bonilla et al., 2017; Pérez; Sahoo et al., 2017; Sánchez et al., 2019).
- Trocadores de calor de contacto direto** – Segundo esta classificação, os fluidos de trabalho estão em contato direto entre si, permitindo que o

mecanismo de troca de calor também se realize pela troca de massa entre esses fluidos (*mixed fluids*), resultando em uma interação mais eficaz em termos de transferência de calor. Alguns exemplos proeminentes desses tipos de trocadores incluem os resfriadores evaporativos, umidificadores, torres de resfriamento e os trocadores de calor de bobina de contato direto. Dependendo da natureza dos fluidos de trabalho, esses trocadores podem ser também classificados fazendo-se alusão aos seus fluidos de trabalho (e.g., fluido - fluido imersível; gás-líquido (MENESES-PRADO *et al.*, 2018; PÉREZ SÁNCHEZ *et al.*, 2022); líquido-vapor (LASZCZYK, 2017).

2.1.2.

Trocadores segundo os fluidos de trabalho

Esta classificação requer conhecimento das propriedades físico-químicas dos fluidos. Embora apenas utilizado em situações especiais, existem trocadores de calor projetados para fazer uso de múltiplos fluidos de trabalho, destinados a aplicações especializadas. Esses trocadores são utilizados em setores da indústria petroquímica e em plantas de processamento altamente especializadas (EL MAAKOUL *et al.*, 2017; PICÓN-NÚÑEZ *et al.*, 2002).

2.1.3.

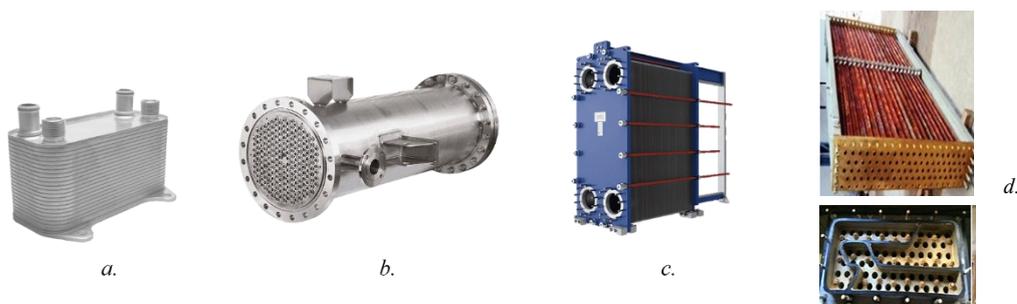
Classificação de acordo com a superfície compacta

Os trocadores de superfícies compactas de transferência de calor são dispositivos projetados para maximizar a eficiência dos mecanismos associados de transferência de calor em componentes aletados. Combinam uma expressiva área de superfície de transferência por unidade de volume, obtida pela incorporação de aletas nos tubos do trocador, assim expressivamente aumentando a área da superfície de troca de calor. Aletas são extensões (tubos aletados ou chapas corrugadas) acrescentadas à uma superfície para incrementar a área de transmissão de calor, aumentando a quantidade total de calor transmitida entre os fluidos de trabalho do trocador. Esses recursos são especialmente utilizados em trocadores de calor ditos compactos, em que os espaços para circulação dos fluidos de trabalho são limitados. São frequentemente empregados em trocadores de calor das indústrias aeroespacial, automotiva e em aplicações de refrigeração que requerem espaços confinados. Trocadores de calor compactos é uma classificação própria desses tipos de trocadores, que, de um modo geral, fazem uso de líquido-gás ou líquido-líquido com mudança de fase como fluidos de trabalho (KAYS E

LONDON, 1964). Para qualquer uma das subclassificações, os fluidos escoam em canais separados, mas em contato direto através de uma superfície do trocador de calor. Isso permite uma transferência de calor eficiente entre os dois fluidos. O *design* compacto destes equipamentos permite uma alta taxa de transferência de calor em um pequeno espaço, a exemplo de trocadores de calor especializados para uso em turbinas a gás da indústria de aviação e em equipamentos de processos de espaçonaves. Um dos métodos usados para aumentar a transferência de calor em trocadores de calor de superfície compactos líquido-gás é a flexão de tubos. O trocador de calor helicoidal é comumente usados devido ao seu tamanho compacto e alto coeficiente de transferência de calor (VALDÉS ORTIZ *et al.*, 2017).

2.1.4. Classificação de acordo com sua construção

Os trocadores de calor podem ser classificados de acordo com o seu projeto construtivo, sendo está uma das formas mais comuns e práticas de entender suas aplicações e funcionamento. Dessa classificação principal surgem distintas subcategorias, cada uma com diferentes tipos de trocadores, conforme ilustrado na Figura 4.



(a) trocador de calor do tipo placas planas; (b) trocador do tipo casco-tubo; (c) trocador de calor do tipo superfícies estendidas; (d) trocador de fluxo transverso.

www.thomasnet.com

Figura 4 - Exemplos de tipos de trocadores de calor

- **Os trocadores de calor tubulares** – consistem essencialmente de trocadores de calor que fazem uso de tubos dentro dos quais escoam um dos fluidos de trabalho (usualmente o fluido frio), montados segundo distintas configurações. Graças ao seu design robusto e versátil, eles são amplamente utilizados em distintas aplicações industriais (*e.g.*, indústrias petroquímica e alimentícia).

- **Trocadores de calor do tipo placas planas** – Faz uso de placas planas, empilhadas entre as quais escoam os fluidos de trabalho do trocador. Devido à sua capacidade de oferecer uma grande superfície (placas corrugadas) de transferência de calor em um espaço reduzido, com aplicação na indústrias farmacêutica, alimentícia e de climatização ambiental. (RODRÍGUEZ *et al.*, 2015).
- **Trocadores de calor de superfície estendida** – São projetados para maximizar a superfície de transferência de calor em relação ao volume do dispositivo. Fazem uso de aletas para aumentar a superfície de transferência de calor, notadamente quando o espaço disponível é crítico e os fluidos possuem baixo coeficiente de transferência de calor. Enquadram-se nesta categoria dois subtipos: aletas de placa usadas em sistemas criogênicos e em processos que exigem rápida mudança de temperatura e, aleta de tubo. Essas alternativas são utilizadas na indústria automotiva para resfriar óleo ou ar e em sistemas de refrigeração (ZUÑIGA-CERROBLANCO *et al.*, 2020).
- **Trocadores de calor regenerativos** – Utilizam matriz de material para armazenamento temporário de calor e depois liberá-lo, permitindo a transferência de calor entre dois fluidos que não se misturam. São especialmente úteis em aplicações em que os fluidos de trabalho não podem ser misturados ou em situações em que a troca de calor não é eficiente. Dentre as alternativas, existem: (i) o trocador rotativo, que faz uso de materiais capazes de armazenar energia térmica (aumento de temperatura) em que uma roda ou disco gira lentamente permitindo a troca de calor; (ii) o trocador de matriz fixa, construído em metal ou cerâmica com capacidade de armazenar energia térmica para, em seguida realizar a transferência de calor entre os fluidos de trabalho do trocador. Esse tipo de trocador é utilizado em sistemas de exaustão de gases de combustão, pois possui vida útil elevada e não possui partes móveis (BOCHAROV *et al.*, 2020; EZGI, 2017).
- **Trocadores de calor de múltiplos passes de escoamento cruzado** – A imagem (d) da figura acima ilustra um desses trocadores, que fazem uso de chicanas para operar em múltiplos passes, assim aumentando o tempo de troca de calor entre os fluidos frio (água, que circula pelo interior dos tubos) e o fluido quente (ar, que circula externamente aos tubos). Este foi o tipo de trocador utilizado para validar experimentalmente o dispositivo de limpeza *online* discutido nesta pesquisa de mestrado.

2.1.5.

Classificação de acordo com a direção do fluido

Trocadores de calor podem, também, ser classificados pela direção relativa de seus fluidos de trabalho. Dentre as opções, destacam-se três alternativas:

- **Trocador de fluxo paralelo** – Comumente utilizados em aplicações industriais que buscam rápida homogeneização térmica entre os fluidos de trabalho, os dois fluidos se movem na mesma direção. Nem sempre é o mais eficiente em termos de transferência total de calor (ÇENGEL, 2009; PEKAŘ, 2020).

- **Trocador de fluxo em contracorrente** – Os fluidos circulam em direções paralelas, porém em sentidos opostos. Utilizado em indústrias em que o processo de transferência de calor ocorre na presença de diferenças mínimas de temperatura entre os fluidos de trabalho (ÇENGEL, 2009; PEKAŘ, 2020).
- **Trocador de fluxo cruzado** – Os fluidos de trabalho do trocador escoam perpendicularmente entre si. Usualmente o fluido frio (*e.g.*, água) escoam pelo interior dos tubos enquanto o fluido quente (*e.g.*, ar) escoam externamente e perpendicularmente aos tubos. Típico de trocadores de calor compactos cujos fluidos de trabalho possuem propriedades térmicas notadamente distintas e, em situações que requerem espaço disponível restrito (INCROPERA *et al.*, 2007; ÇENGEL, 2009).

2.2.

Alternativas off-line e online de limpeza de trocadores de calor

A manutenção da operação contínua dos trocadores de calor em qualquer indústria é de vital importância já que a eficácia operacional do equipamento depende do seu estado de preservação e de características de seu funcionamento. No entanto, a eficiência de operação e a efetividade do trocador de calor ficam fortemente comprometidas com o recorrente problema que resulta da inevitável acumulação de incrustação (*fouling*) nas superfícies internas de transferência de calor entre os fluidos de trabalho do trocador. O fenômeno da incrustação é complexo e decorre do depósito de impurezas de natureza orgânica (*e.g.*, materiais biológicos, larvas de matéria viva) ou inorgânica (*e.g.*, óxidos, sedimentos, sais minerais, resíduos e impurezas de óleos, gorduras ou produtos químicos) nas superfícies internas do trocador. A formação dessas camadas isolantes não só se impõe como uma resistência térmica adicional à transferência de calor, como, também, impõe perda de carga aumentando custos de bombeamento dos fluidos de trabalho do trocador. Além disso, pode acarretar a corrosão de partes internas do trocador, que, por sua vez, impacta nos custos operacionais e aumenta os riscos de interrupções de operação para manutenção corretiva (BERCE *et al.*, 2021).

Outro aspecto decisivo é a natureza dos fluidos que circulam pelo trocador de calor, sua composição química e características físicas podem favorecer a adesão e o acúmulo de incrustação nas superfícies do equipamento. Dentre as condições operacionais, altas temperaturas, baixa velocidade de fluxo ou regimes turbulentos podem desempenhar um papel crítico no processo de formação da incrustação (MÜLLER-STEINHAGEN; *et al.*, 2011). Além disso, a geometria do trocador de

calor, especificamente a disposição, forma e tamanho dos canais ou tubos, também influenciam na formação de depósitos (BOURIS *et al.*, 2005). Entender e gerenciar esses fatores é essencial no combate à incrustação visando a manutenção da eficácia do funcionamento de trocadores de calor.

A incrustação, não sendo um processo instantâneo ou uniforme, evolui em diferentes etapas. Cada tipo de incrustação uma possui características próprias e impõe desafios específicos para ser mitigado.

Conforme será discutido no próximo capítulo, à luz de estudos recentes e resultados de pesquisa, distintas fases caracterizam o processo de incrustação:

- **Fase de Início da incrustação** (período de incubação), considerada crítica ainda que imperceptível já que caracteriza o *startup* de um processo de indução da incrustação;
- **Fase de Transporte**, quando as partículas de incrustação aderem à superfície do trocador de calor por sedimentação, difusão e termoforese (AWAIS; BHUIYAN, 2019).
- **Fase de Deposição**, quando distintos mecanismos de ancoragem do *fouling* podem ocorrer (*e.g.*, interação eletrostática, em que partículas e superfícies de cargas opostas se atraem facilitando a ligação; interação capilar, resultante da tensão superficial entre o líquido e o sólido, gerando pontes líquidas que ajudam a ancorar as partículas e, ainda, por adesão química em que ligações covalentes mantêm partículas de resíduos firmemente aderidas à superfície de transferência de calor). Desses mecanismos, as ligações químicas tendem a ser especialmente fortes e duráveis (BOTT, 1995a).
- **Fase de crescimento dos depósitos**, período em que crescem as taxas de precipitação de sais, dando origem a acúmulos de resíduos e organismos biológicos, a exemplo de bactérias e fungos, que podem formar camadas de difícil remoção (BOTT, 1995b).
- **Fase de formação contínua de camadas de depósito progressivo** de incrustação na superfície do trocador de calor, impondo-se como barreira à transferência de calor e podendo intensificar a cristalização da incrustação com o aumento da temperatura dos fluidos de trabalho do trocador (TENG *et al.*, 2017).
- **Fase de corrosão e deterioração do trocador de calor**, resultantes de danos mecânicos, ataques químicos da incrustação e exposição à água de resfriamento, ocasionando degradação do metal do trocador, podendo levar à falha total do equipamento (SU *et al.*, 2015; TENG *et al.*, 2017).

Dentre as principais estratégias para se mitigar a incrustação destacam-se:

- **Otimização do projeto do trocador**, minimizando as áreas propensas ao acúmulo de depósitos. Equipamentos com superfícies lisas de transferência de calor (de baixa rugosidade) apresentam menor tendência à incrustação.

- **Melhoria das condições de operação**, o que pode ser obtido pelo adequado tratamento dos fluidos de trabalho antes de sua circulação pelo trocador.
- **Uso de materiais anti-incrustantes**, permitindo incorporar revestimentos e materiais que impeçam a adesão de partículas de incrustação nas superfícies de transferência de calor do trocador.
- **Implementação de práticas de limpeza**, tendo em vista que a limpeza regular dos trocadores de calor não apenas remove a incrustação como, também, evita o seu acúmulo excessivo. As técnicas de limpeza são classificadas principalmente em duas categorias:
 - **Limpeza off-line** – Envolve a interrupção do equipamento de processo ao qual o trocador encontra-se acoplado para permitir que o trocador seja desmontado e a sua limpeza realizada.
 - **Limpeza online** – Esta abordagem permite a limpeza do trocador de calor sem a necessidade de interrupção do equipamento de processo ao qual o trocador encontra-se acoplado, assim evitando prejuízos resultantes da parada técnica do equipamento.

Conforme ilustrado na Figura 5, a limpeza de trocadores de calor pode ser realizada por procedimentos *off-line* ou *online*, ambos considerados essenciais para se assegurar a eficácia de seu funcionamento.

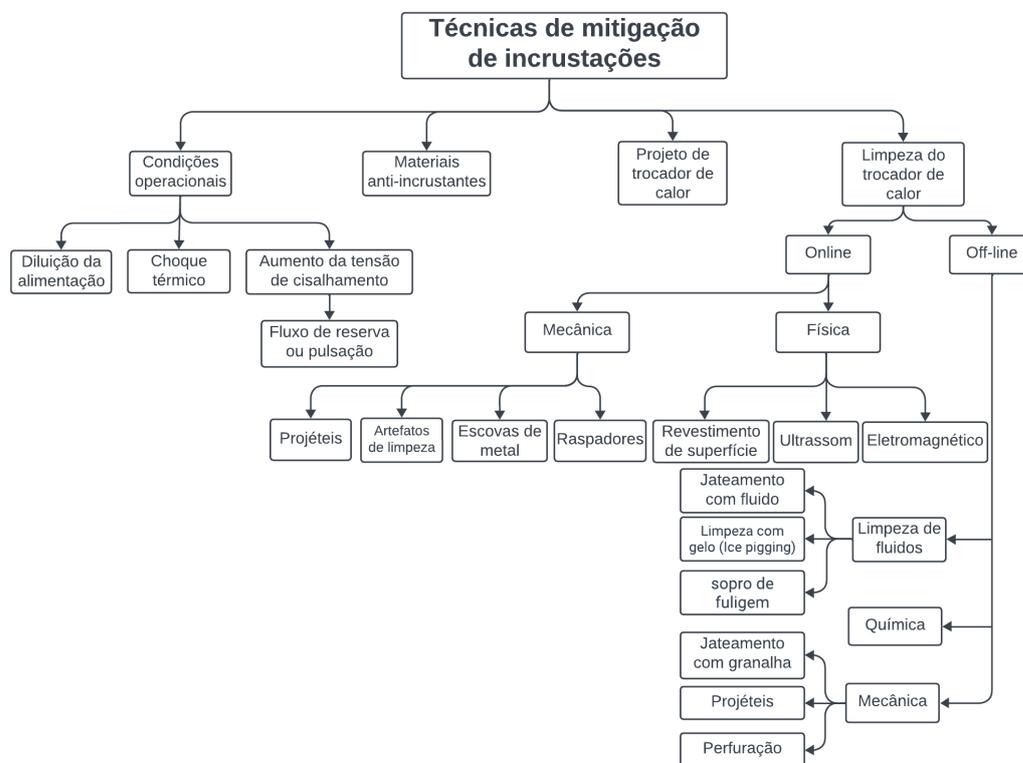


Figura 5 - Técnicas de mitigação de incrustação.
Fonte: Adaptado de (MÜLLER-STEINHAGEN *et al.*, 2011)

2.2.1.

Alternativas de limpeza *off-line*

Neste caso, o processo de limpeza *off-line*, comumente utilizado, requer a completa parada técnica do equipamento, portanto resultando em custos de manutenção e perdas econômicas decorrentes da interrupção do equipamento de processo ao qual o trocador de calor encontra-se acoplado. Esses procedimentos podem envolver técnicas mecânicas e químicas, programadas para ocorrer em períodos específicos, geralmente durante intervalos exaustivos de manutenção. Embora a limpeza *off-line* seja eficaz na eliminação de acúmulos indesejáveis de incrustação, quer por um procedimento puramente mecânico (escovamento das partes incrustadas) ou por processo químico (fazendo uso agentes químicos), implica na interrupção do processo industrial, gerando perdas de produção (KAPUSTENKO *et al.*, 2023; MÜLLER-STEINHAGEN *et al.*, 2011). Alternativamente, a limpeza *off-line* pode ser de natureza química, *i.e.*, envolver o uso de soluções químicas específicas (ácidas, alcalinas ou solventes específicos), com a finalidade de dissolver e erradicar a incrustação (POGIATZIS *et al.*, 2012). Não obstante a eficácia de sua aplicação, o manuseio e o descarte desses agentes químicos requerem manejo ambientalmente responsável, que requer rigoroso controle do uso de agentes tóxicos e altamente corrosivos (KIESER *et al.*, 2011; MÜLLER-STEINHAGEN *et al.*, 2011)

2.2.2.

Alternativas de limpeza *online*

Sem requerer a interrupção da operação do processo ao qual o trocador de calor encontra-se acoplado, a limpeza *online* surge como uma solução eficiente, que oferece benefícios econômicos resultantes da operação contínua do trocador. Essa modalidade, além de oferecer uma solução em tempo real para evitar que a incrustação se acumule nas superfícies de transferência de calor, contribui para o prolongamento da vida útil dos equipamentos, reduzindo os custos associados a paradas operacionais de manutenção corretiva não programadas e manutenções preventivas. Técnicas alternativas foram desenvolvidas e adaptadas para esta modalidade, desde métodos mecânicos até físicos, cada um com suas particularidades e aplicações específicas.

A técnica de limpeza *online* utiliza o próprio fluido de trabalho do trocador como meio de introduzir e transportar os artefatos de limpeza nos tubos do trocador. Esses artefatos podem ser de diferentes tipos, esferas esponjosas com depósito de material abrasivo; lã de aço, cerâmicos abrasivos, pastilhas ou escovas de arame e mesmo raspadores lançados no fluxo do escoamento. Embora requerendo cuidados especiais, é uma técnica versátil e eficaz que garante a operação contínua do equipamento. Ao serem impulsionados pelo interior dos tubos do trocador, removem a incrustação, assim evitando a sua acumulação que compromete a eficácia dos mecanismos de transferência de calor. Apresentam bons resultados para alguns tipos de incrustação, a exemplo de depósitos rígidos, certos sais ou biofilmes. A propulsão desses projéteis aproveita o fluido circulante (FROTA M. N. *et al.*, 2014; SEOL *et al.*, 2020). A eficácia do processo depende de *know how*, em particular de uma escolha correta do tipo de artefato de limpeza a ser utilizado. Deformações na tubulação que se deseja limpar ou a seleção errônea do artefato de limpeza pode resultar em obstrução da tubulação e ocasionar problemas sérios que comprometem a operação dos trocadores.

Adicionalmente aos métodos convencionais de limpeza *off-line* e *online*, é comum expor os dutos incrustados do trocador ao efeito de ondas sonoras de alta frequência para criar bolhas que, ao colapsarem por cavitação, geram micro jatos capazes de desincrustar depósitos aderentes (FARMER *et al.*, 2000). Alternativamente, fluidos criogênicos (*e.g.*, nitrogênio líquido) são utilizados para congelar, fragmentar e remover depósitos de incrustação como, também, a técnica de *pigging* introduz dispositivos deslizantes que realizam o arraste da incrustação depositada nas paredes internas do trocador. Dentre essas muitas alternativas tecnológicas, duas outras técnicas têm sido exploradas: (i) o revestimento das paredes internas do trocador com um filme fino de material antiderrapante visando reduzir o coeficiente de atrito das superfícies de transferência de calor, assim contribuindo para reduzir as taxas de depósito da incrustação (KUKULKA; LEISING, 2010) e (ii) a imersão a vapor das superfícies do trocador, visando dissolver placas acumuladas de incrustação. Cada uma dessas técnicas apresenta vantagens e desvantagens, podendo requerer investimentos expressivos (FARMER; *et al.*, 2000; HELALIZADEH *et al.*, 2000; KUKULKA; LEISING, 2010; MÜLLER-STEINHAGEN *et al.*, 2009, 2011; SAHA *et al.*, 2020)

Um desafio recente para a técnica *online* de limpeza é avaliar a sua eficácia para evitar a proliferação de um novo tipo de incrustação que resulta do crescimento acelerado e sem controle de um tipo de molusco denominado “mexilhão-dourado”, que é um molusco bivalve originário da Ásia. Acredita-se que a espécie chegou à América do Sul provavelmente de modo acidental na água de lastro de navios cargueiros, tendo sido a Argentina o ponto de entrada. Do país vizinho chegou ao Brasil. Hoje a espécie já foi detectada em quase toda a região Sul e em vários pontos do Sudeste e Centro-Oeste. A larva do mexilhão dourado tem causado não apenas prejuízos à navegação como ocasionado enormes prejuízos econômicos e ambientais. Comprometem boias, trapiches, motores e de estruturas das embarcações, atualmente consideradas uma ameaça ao funcionamento de trocadores de calor já que causam o entupimento de sistemas de tomada de água para geração de energia elétrica, causando interrupções frequentes para limpeza da tubulação e encarecendo a produção (MANSUR *et al.*, 2003).

2.2.3. Trocadores de calor: fundamentos teóricos

A efetividade ε de um trocador de calor é definida pela Equação (3.1) (KAYS & LONDON, 1964):

$$\varepsilon = \frac{|\dot{Q}_{real}|}{|\dot{Q}_{max}|} \quad (3.1)$$

\dot{Q}_{real} denota a quantidade de calor trocada entre os fluidos de trabalho do trocador de calor (*i.e.*, fluido quente e fluido frio) durante um período pré-selecionado de sua operação, enquanto \dot{Q}_{max} denota a quantidade máxima de calor que poderia ser trocada em condições ideais (áreas infinitas de troca de calor).

\dot{Q}_{real} pode, alternativamente, ser calculado pelo lado do fluido quente ou pelo lado do fluido frio, o que equivale a dizer:

$$|\dot{Q}_{real}| = |\dot{Q}_{fluido\ quente}| = |\dot{Q}_{fluido\ frio}| \quad (3.2)$$

Para o trocador de calor objeto do estudo, **ar** é o fluido quente e **água** o fluido frio, permitindo escrever a equação do balanço térmico:

$$\dot{Q}_{real} = \dot{m}_a c_{p,a} (T_{a,in} - T_{a,out}) = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (3.3)$$

Nessa equação, o símbolo \dot{m} denota a vazão mássica do fluido de trabalho; c_p o seu calor específico à pressão constante e T a sua temperatura, enquanto os índices “in” e “out” aplicados à essas variáveis indicam que seus valores foram avaliados (medidos) nas seções de entrada e de saída do trocador, respectivamente. O índice w (*water*) denota o fluido frio (no presente caso a água), enquanto o fluido quente (ar) é representado pela letra “a”. Ainda sobre a notação utilizada, \dot{m}_w , \dot{m}_a , denotam, respectivamente, as vazões mássicas da água e do ar, enquanto T_w and T_a , denotam as temperaturas desses fluidos de trabalho e $c_{p,w}$, $c_{p,a}$, os respectivos calores específicos à pressão constante dos fluidos considerados.

A Equação (3.3) expressa a quantidade de calor trocada entre os fluidos de trabalho, lembrando que $\dot{Q}_{max} = C_{min} \Delta T$ e C_{min} denota o menor valor entre C_w e C_a , e $\Delta T = (T_{a,in} - T_{w,in})$. A capacidade térmica do fluido de trabalho é expressa pelo produto $\dot{m}c_p$ ($C = \dot{m}c_p$). Assim, a quantidade máxima de calor teoricamente possível de ser trocada entre os fluidos de trabalho é expressa pela Equação (3.4):

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} (T_{a,in} - T_{w,in}) \quad (3.4)$$

Combinando a Equação (3.1) de definição da efetividade ε com as Equações (3.3) e (3.4) obtém-se:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{C_h (T_{h,in} - T_{h,out})}{C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})} = \frac{C_c (T_{c,out} - T_{c,in})}{C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})} \quad 0 \leq \varepsilon < 1 \quad (3.5)$$

expressa em termos da capacidade térmica do fluido frio ou do fluido quente, conforme expresso a seguir:

$$C = \dot{m}c_p; C_{hot} = \dot{m}_a c_{p,a}; C_{cold} = \dot{m}_w c_{p,w} \quad (3.6)$$

Assim, ao aplicar um balanço de energia entre os fluidos do trocador de calor, a sua efetividade ε , pode convenientemente ser expressa em termos de três temperaturas de fluidos:

$$\varepsilon = \frac{(T_{a,in} - T_{a,out})}{(T_{a,in} - T_{w,in})} \quad (3.7)$$

ou seja, das temperaturas de entrada ($T_{a,in}$) e de descarga ($T_{a,out}$) do fluido quente (ar) e da temperatura de entrada ($T_{w,in}$) do fluido frio (água). Embora atrativa para o cálculo da efetividade, a equação acima não mostra a dependência da taxa de calor \dot{Q} trocado em função das resistências térmicas impostas ao escoamento dos fluidos de trabalho do trocador, o que pode ser explicitado pela Equação (3.8) (INCROPERA *et al.*, 2007), expressa em termos do Coeficiente Global de Transferência de Calor U , da área total de transferência de calor A e da diferença média de temperatura entre os fluidos de trabalho:

$$\dot{Q} = UA \frac{[(T_{a,in} - T_{w,out}) - (T_{a,out} - T_{w,in})]}{\ln \left(\frac{T_{a,in} - T_{w,out}}{T_{a,out} - T_{w,in}} \right)} \quad (3.8)$$

Na equação (3.8),

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{h_a \cdot A} + \frac{1}{h_w \cdot A} + R_{wall} + R_{fouling} \quad (3.9)$$

em que R_{wall} , calculado pela Equação (3.10), denota a resistência térmica imposta pela presença das paredes metálicas (aço) que separam os fluidos de trabalho trocador:

$$R_{wall} = \frac{\ln \ln (D_o/D_i)}{2\pi\kappa L} \quad (3.10)$$

na equação acima, L é o comprimento do tubo; D_i, D_o os diâmetros interno e externo dos tubos; κ a condutividade térmica. Já $R_{fouling}$ denota a indesejável resistência térmica imposta pela inevitável incrustação que se deposita nas paredes de transferência de calor do trocador, cujo cálculo não é trivial já que depende de vários fatores, inclusive da natureza físico-química da incrustação.

2.2.4.

O fenômeno de formação da incrustação

A incrustação resulta da indesejável (mas inevitável) acumulação de depósitos de materiais orgânicos ou inorgânicos nas superfícies de transferência de calor do trocador, fenômeno que ocorre durante o processo de transferência de calor entre os seus fluidos de trabalho. A presença da incrustação não apenas impõe uma resistência térmica adicional à transferência de calor como, também, aumenta a perda de carga a ser vencida pelo fluido refrigerante, requerendo maior potência de bombeamento.

Para se projetar dispositivos e técnicas de mitigação da incrustação em superfícies de transferência de calor, faz-se necessário entender o complexo mecanismo de sua formação, ainda hoje objeto de pesquisa e investigação.

Conforme amplamente discutido em um fórum internacional que reúne estudiosos, pesquisadores e fabricantes de trocadores de calor —*Heat Exchanger Fouling and Cleaning Conference* (ZETTLER, 2022) realizada a cada dois anos e já em sua XIII edição, estudos mostram que a indesejável incrustação acumulada em trocadores de calor utilizados no sistema de arrefecimento de processos industriais pode ser responsabilizada por 1 a 2,5 % das emissões globais de CO₂ no meio ambiente. Penalidades de custo associados à incrustação do trocador de calor são estimadas em cerca de 0,25 % do produto interno bruto (PIB) dos países industrializados. Os altos custos associados à incrustação têm motivado urgência na resolução deste complexo problema. (FROTA *et al.*, 2014, 2019; FROTA; VALENTE, 2016; LUBICZ *et al.*, 2017; NUNES *et al.*, 2017; RIOS *et al.*, 2017, 2022) descrevem uma alternativa tecnológica de limpeza de trocadores de calor, que reduz riscos ambientais associados a outras técnicas convencionais, como, também, gera expressivo impactos econômicos já que a técnica de limpeza proposta dispensa a interrupção do processo industrial durante ciclos de limpeza.

Conforme documentado nos Anais da edição 2019 da Conferência internacional *Heat Exchanger Fouling and Cleaning Conference* (ZETTLER, 2022) acima mencionada, a Figura 6 caracteriza o modelo conceitual das três fases consecutivas de formação da incrustação: a fase de iniciação (*initiation phase*), seguida pela fase de rugosidade controlada (*roughness controlled phase*) e da fase de crescimento da camada (*layer grows phase*). As duas primeiras compõem o que se denomina fase de indução (*induction phase*). Os resultados mostrados refletem medições recentes da resistência térmica imposta à troca de calor entre os fluidos de trabalho do trocador e a queda de pressão (perda de carga) imposta pela presença da incrustação, cujos comportamentos serão discutidos nesta seção (HARCHE *et al.*, 2014; SCHLÜTER *et al.*, 2019).

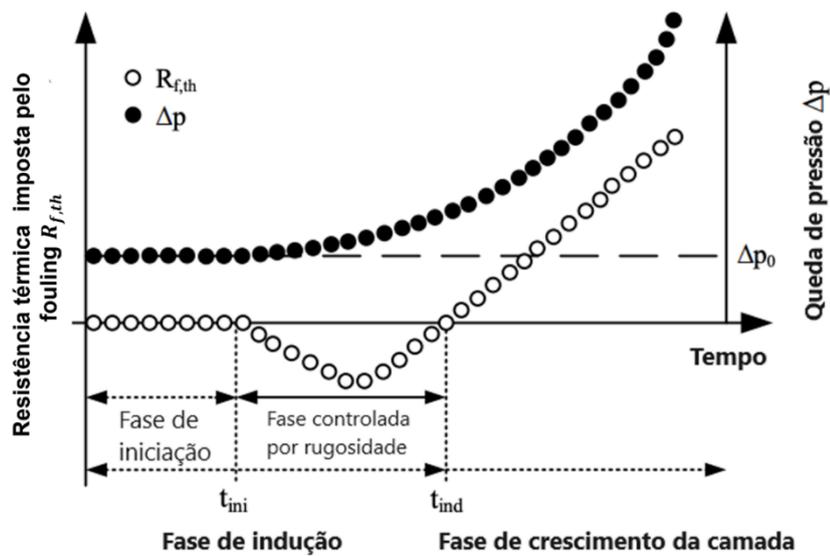


Figura 6 - Fases de indução e consolidação do fenômeno de incrustação
 Fonte: Adaptado de (SCHLÜTER *et al.*, 2019).

Já a Figura 7 detalha, de forma esquemática, o processo de evolução da cristalização da incrustação (fases consecutivas de cristalização) ao longo de uma superfície de transferência de calor (no presente caso, as superfícies internas dos tubos do trocador de calor).

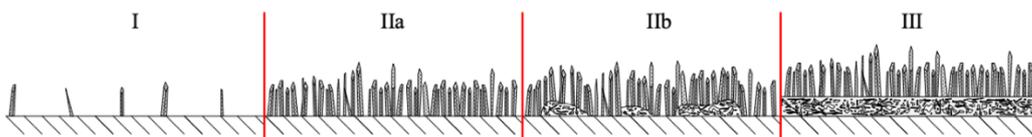


Figura 7 - Fases de cristalização da incrustação no trocador de calor
 Fonte: Adaptado de (SCHLÜTER *et al.*, 2019).

Conforme ilustrado, os primeiros cristais são formados na superfície durante a fase de iniciação (*initiation phase*), porém ainda sem influência perceptível no processo de transferência de calor já que os cristais de incrustação ainda são escassos (fase I). No início da fase subsequente (fase IIa) de rugosidade controlada (*roughness controlled phase*), o processo de cristalização evolui para uma incrustação de cristal e cobertura da superfície de tamanho maior e mais densamente distribuído, criando rugosidade na superfície. Depósito esse capaz, inclusive, de estimular o processo de transferência de calor, o que pode ser interpretado fisicamente como sendo uma resistência térmica negativa (*thermal fouling resistance*) à transferência de calor, atingindo finalmente um máximo de rugosidade

a partir desta condição. Na sequência de evolução da incrustação, monocristais interligados dão início à formação das primeiras camadas de incrustação, que se acumulam em grupos em contato direto com a superfície de transferência de calor. A fase IIb caracteriza uma zona de transição da fase de rugosidade controlada, em que o acúmulo de incrustação inibe o estímulo à transferência de calor gerado pela rugosidade inicial e passa a atuar como resistência térmica que limita o processo de troca de calor, resultando na formação de uma camada densa de incrustação que cobre toda a superfície de troca de calor, o que se completa no início da fase III, de crescimento da camada real. A partir dessa condição, a resistência à incrustação torna-se positiva devido ao aumento da resistência térmica imposta pelo acúmulo progressivo de incrustação. Como consequência, a camada inferior da incrustação cresce com o tempo obstruindo de forma progressiva a seção transversal do fluxo, desta forma comprometendo drasticamente o escoamento e impactando nos custos de bombeamento.

Muitos são os estudos teóricos e pesquisas experimentais desenvolvidos ao longo das últimas décadas relacionados a este complexo fenômeno de crescimento do fouling, dentre os quais destaca-se o trabalho de Müller-Steinhagen (2000) (MÜLLER-STEINHAGEN *et al.*, 2000). Em linhas gerais, todos esses estudos confirmam o modelo conceitual teórico das três fases consecutivas de formação da incrustação acima discutido.

Como comprovação do modelo conceitual das fases subsequentes de formação da incrustação, a Figura 8 documenta resultados de experimentos (SCHLÜTER *et al.* 2019) realizados em dois trocadores de calor de tubo duplo (20 x 2 x 2000 mm) utilizando como fonte da incrustação o composto orgânico sulfato de cálcio (CaSO_4), cuja taxa de depósito já apresenta resultados expressivos em poucos dias de exposição. Na figura, a seguir, são apresentados, no eixo das ordenadas, a resistência térmica imposta pela presença do fouling e, no eixo das abcissas, o tempo de acumulação do fouling, medido em dia (SCHLÜTER *et al.* 2019).

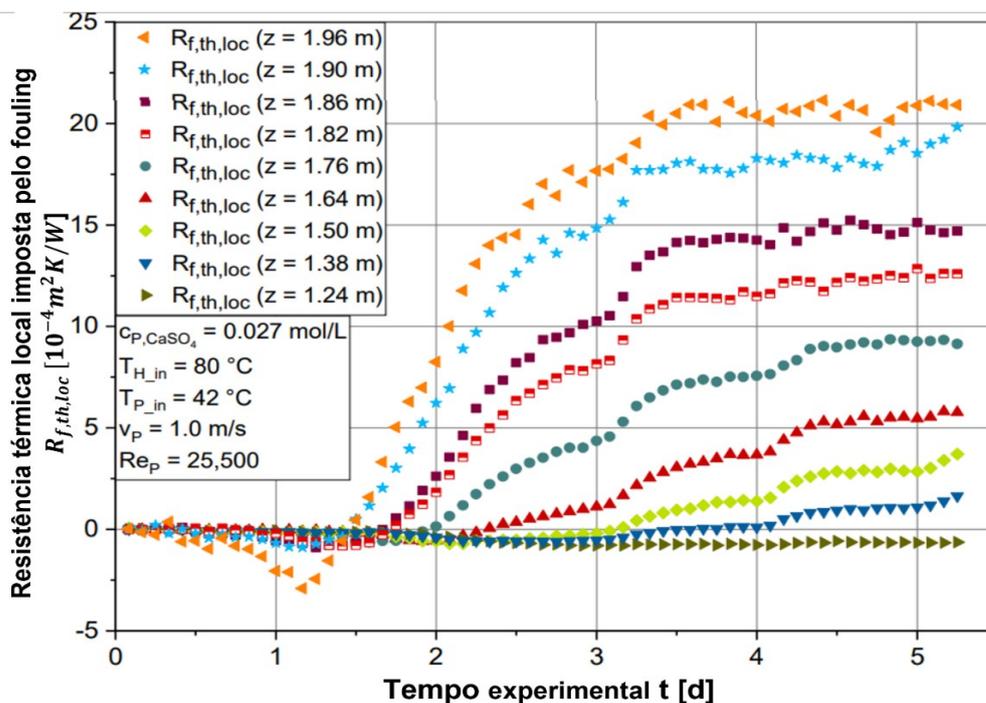


Figura 8 - Resistência térmica local imposta pela incrustação (CaSO₄)
 Fonte: F. Schlüter *et al.*, 2019.

A resistência térmica local imposta pela incrustação foi calculada com base em medições locais de temperatura realizadas ao longo da posição axial z (expressa em metros, m).

A incrustação típica de processos químicos e industriais é um fenômeno indesejável que inibe a transferência de calor entre os fluidos de trabalho de trocadores de calor. Os resultados da Figura 8 refletem as tendências das fases consecutivas de formação da incrustação (*induction phase* e *layer grows phase*), validando o modelo conceitual teórico ilustrado na Figura 6 e confirmando que a resistência térmica aumenta com a posição axial z (crescimento da camada de incrustação).

Outro resultado da mesma pesquisa acima mencionada, entendido como informação de interesse para reflexão pelos usuários de alternativas de limpeza de trocadores, é documentado na Figura 9, que evidencia que o grau da incrustação aumenta com a distância longitudinal do tubo, no sentido do escoamento. Para o caso dos experimentos mostrados, a “luz do tubo”, *i.e.*, a área da seção transversal, reduz drasticamente à medida que o escoamento avança (o diâmetro da seção livre

para escoamento reduz-se de 16 mm para cerca de 10 mm, ao longo de um comprimento de 2000 mm).

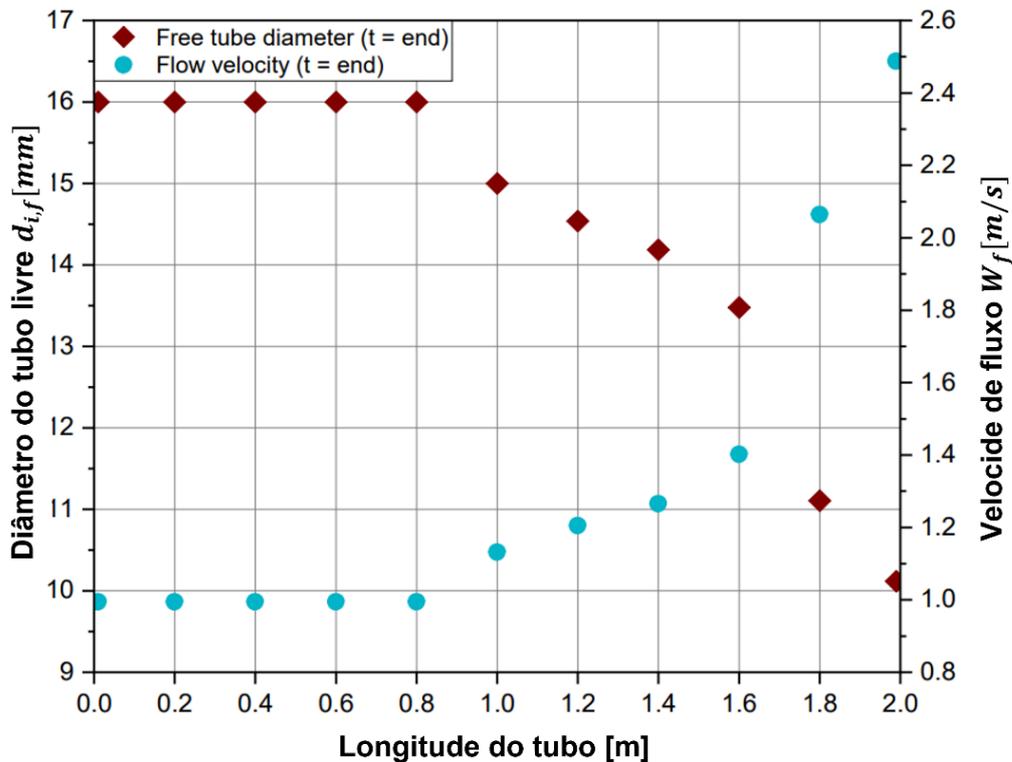


Figura 9 - Redução da seção transversal devido à incrustação
 Fonte: Fonte: Adaptado de (SCHLÜTER *et al.*, 2019)

Se por um lado a redução da seção reta do tubo resulta em um aumento da velocidade média do escoamento do fluido —o que teoricamente estimula os mecanismos de troca de calor—, a resistência térmica imposta pela incrustação também aumenta com a espessura da camada de incrustação depositada na superfície de troca de calor.

A incrustação do trocador de calor é um problema crônico que contribui para a economia do processo, capacidade da planta, causando preocupações ambientais e de segurança em diversas indústrias (*e.g.*, indústrias de tratamento de água e energia, indústria de química, petroquímica e de refino, alimentícia, farmacêutica). Como outra evidência dos impactos gerados pelo fouling, mais recentemente, especialistas do Heat Transfer Research Institute (ZETTLER, 2022) discutem as implicações econômicas e ambientais causadas por inevitáveis incrustações geradas em processamento de petróleo bruto, estimando que o custo

de incrustação em sistemas de pré-aquecimento de petróleo bruto no setor de refino dos EUA é da ordem de 1 a 1,2 bilhões de US\$ por ano (dados de 2019). Em seus estudos indicam que a emissão total de CO₂ adicional devido à presença de incrustações no processamento de petróleo bruto (*crude preheat train*) estima uma redução da ordem de 4,9 MM ton/ano (milhões de toneladas por ano), em 1980 para 2,2 MM ton/ano, em 2019, como resultado de novas tecnologias de mitigação, lembrando que a incrustação na fase de pré-aquecimento desses complexos processos é apenas um dos muitos fatores que impactam na análise de impacto econômico resultante da indesejável presença de incrustações. Dentre outros exemplos, as penalidades de custos associados à incrustação do trocador de calor são estimadas em 0,25 % do produto interno bruto (PIB) dos países industrializados. A incrustação de equipamentos de transferência de calor está custando às indústrias globais centenas de milhões de dólares todos os anos em aumento de custos de equipamentos, custos adicionais desnecessários de bombeamento para sobrepor às perdas de carga impostas pela incrustação, custos de manutenção e perdas de energia e produção

Manter um bom desempenho em uma rede de trocadores de calor constitui pré-requisito de qualquer programa de eficiência energética, que requer criteriosa análise da incrustação e da limpeza dos trocadores de calor visando mitigar os efeitos da incrustação por meio de uma eficaz programação de limpeza, certamente resultando em economia. Para melhorar a eficiência energética dos processos industriais, é fundamental recuperar o máximo de calor possível. No entanto, os trocadores de calor utilizados nesses processos são suscetíveis à incrustação, o que reduz significativamente seu desempenho térmico ao longo do tempo. Um exemplo disso pode ser encontrado nas refinarias de petróleo, onde a incrustação pode representar uma redução anual de até 20% na eficiência do processo industrial associado. Estima-se que, nos Estados Unidos e no Reino Unido, a perda anual atribuível à incrustação nos trocadores de calor integrados aos equipamentos de processos industriais seja da ordem de US\$ 16,5 bilhões, representando um impacto direto na lucratividade das indústrias de processos e um problema ainda não adequadamente solucionado pelas indústrias químicas e de refino. (AL-JANABI *et al.*, 2009).

A tecnologia de limpeza online de trocadores de calor difere da tecnologia offline, que é realizada apenas após meses de operação. O fundamento da tecnologia online é realizar o processo de limpeza no início da operação do trocador de calor, evitando o acúmulo de incrustações nas superfícies internas dos tubos. Dessa forma, o filme de lama fluida fina é eliminado antes que se cristalice em incrustações sólidas de difícil remoção. Essas incrustações, quando depositadas por longos períodos, podem criar riscos e danos capazes de comprometer a integridade das superfícies internas dos tubos, que são responsáveis pela transferência de calor entre os fluidos de trabalho do trocador (no caso do presente estudo, água-ar). A experiência de validação do dispositivo de limpeza online desenvolvido pelo Programa de Metrologia da PUC-Rio (FROTA *et al.*, 2023) revelou que, mesmo após um processo de limpeza manual, a tecnologia online proposta consegue remover uma camada remanescente de lama fina que permanece aderida à superfície dos tubos. Isso indica que a limpeza manual tradicional nem sempre consegue remover a totalidade da incrustação. Esse detalhe é significativo, pois a camada fina de lama age como isolamento térmico, contradizendo o preceito básico de um trocador de calor, que requer a minimização de resistências térmicas entre os fluidos de trabalho para maximizar a troca de calor.

O grupo de pesquisa da PUC-Rio também estudou as características construtivas dos dispositivos de limpeza. Ensaios foram realizados para determinar a força de atrito experimentada pelo fluido para superar a resistência imposta pelo fouling (acúmulo de incrustações), rigidez e abrasividade do material do dispositivo. Esses estudos estão documentados em duas dissertações de mestrado realizadas sobre o tema (DE OLIVEIRA JUNIOR, 2015; RIOS, 2020). A tecnologia online de limpeza proposta baseia-se no preceito teórico de que o complexo fenômeno de formação da incrustação é retardado na presença de superfícies isentas de incrustação, como ocorre no caso de trocadores novos em que os tubos ainda não foram expostos a nenhuma fonte de incrustação transportada pela água de refrigeração.

As modificações introduzidas no dispositivo de limpeza, que são o foco desta pesquisa de mestrado, serão detalhadas nos capítulos subsequentes.

3. O *OnlineCleaner* e contextualização do estudo

A alternativa tecnológica de limpeza *online* de trocadores de calor desenvolveu-se anteriormente a este trabalho e encontra-se discutido em outras publicações (FROTA *et al.*, 2014, 2019, 2021, 2023; FROTA; VALENTE, 2016, 2018). O Capítulo 3 discute resultados de ensaios de validação do protótipo do equipamento inovador concebido.

3.1. Dispositivo de limpeza *online* de trocadores de calor

A Figura 10 ilustra o equipamento portátil de limpeza *online* de trocadores de calor. Fundamentado em uma Prova de Conceito, a versão apresentada acima encontra-se protegida por um pedido de depósito de patente de equipamento de limpeza online de trocadores de calor³ junto ao Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (FROTA & GERMANO, 2023).

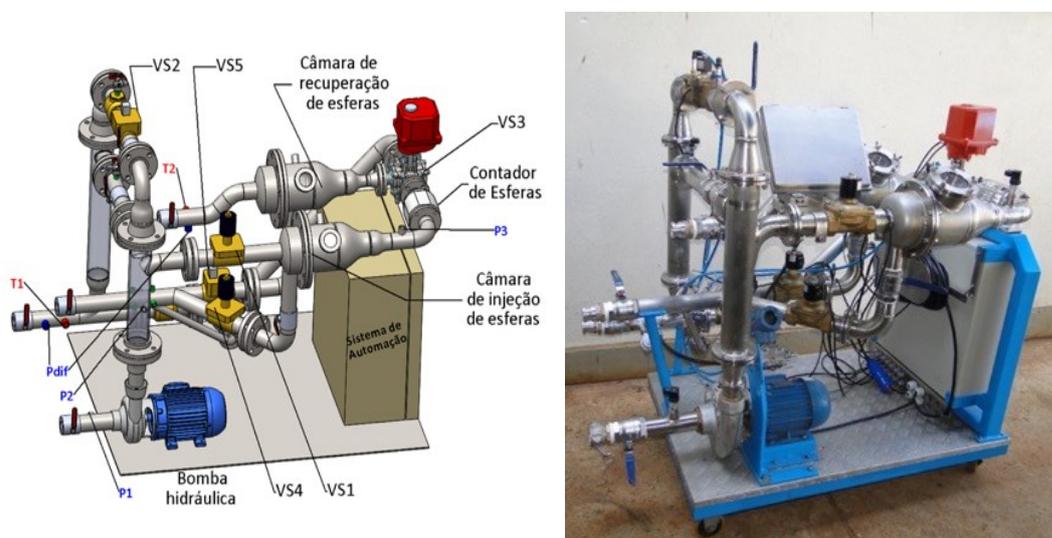


Figura 10 - Projeto construtivo e protótipo do OnlineCleaner

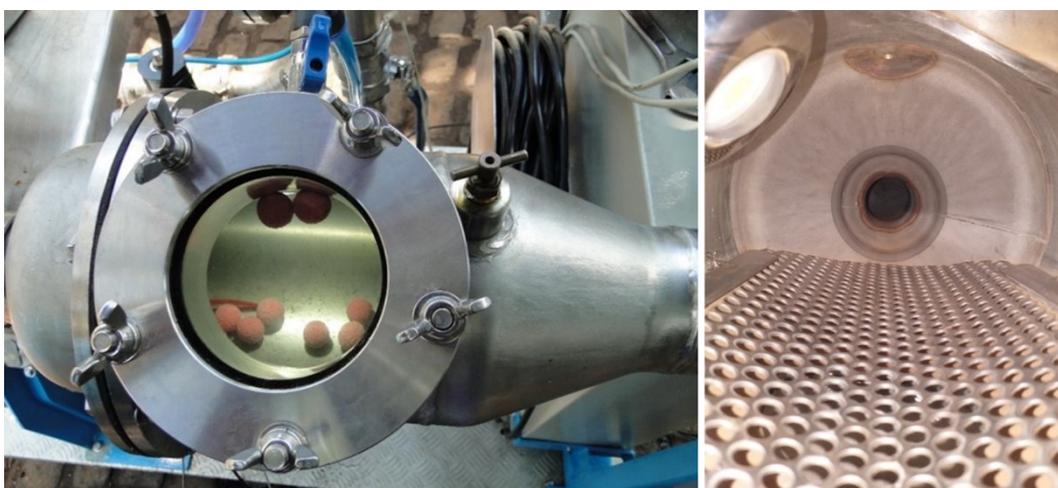
³ O equipamento de limpeza *online* concebido recebeu duas premiações: (i) Prêmio na categoria Melhor Produto da IX Feira CITENEL (Congresso de Inovação Tecnológica e Eficiência Energética do Setor Elétrico), realizada em João Pessoa, Paraíba, de 2 a 4 de agosto/2017 e (ii) Prêmio OSE Primeiro Lugar, na categoria Pesquisa & Desenvolvimento, concedido no evento O Setor Elétrico de Qualidade das Instalações Elétricas, em novembro de 2018.

A Figura 10, à esquerda, mostra o desenho construtivo realizado em *software* especializado de projetos de engenharia (*SolidWorks*) e a Figura 10, à direita, ilustra uma fotografia do equipamento de limpeza *online* já construído e validado com base em experimentos realizados em laboratório e em campo. Este último, pelo acoplamento do protótipo a um trocador de calor do sistema de arrefecimento de um hidrogerador (44 MW) em operação no complexo hidrelétrico da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, em Pirai/RJ.

Conforme esquematicamente mostrado na Figura 10, o dispositivo de limpeza *online* de trocadores de calor possui diversos componentes, entre os quais uma bomba hidráulica (cuja potência pode ser ajustada em função do porte do trocador de calor a ser submetido ao processo de limpeza), que é responsável pela circulação de um dos fluidos de trabalho do trocador. Por sua vez, este mesmo fluido de trabalho (água) transporta para dentro dos tubos do trocador os artefatos de limpeza com o propósito de remover a incrustação que inevitavelmente se acumula no seu interior, drasticamente comprometendo a sua eficácia operacional. Para que o processo de limpeza possa ser realizado de forma *online*, *i.e.*, sem interromper o funcionamento do equipamento de processo (hidrogerador) ao qual o trocador está acoplado, o equipamento de limpeza concebido requer outros atributos, adicionalmente à limpeza *online*: que o equipamento seja capaz de realizar a lavagem dos artefatos entre ciclos de limpeza; a remoção da incrustação após cada ciclo; o monitoramento do processo; o controle da vida útil e contagem dos artefatos de limpeza introduzidos e recuperados, e de um sistema de automação para funcionamento pré-programado e completamente automatizado do sistema como um todo. Detalhes operacionais e funcionais do equipamento encontram-se detalhados nas diversas referências já citadas no texto acima.

Uma vez acoplado (equipamento de limpeza conectado aos tramos do trocador de calor), os artefatos de limpeza são introduzidos no interior câmara de injeção, seguindo uma regra prática consolidada pela experiência de uso do equipamento, que sugere usar (para evitar congestionamento) um total de artefatos de limpeza (esferas de esponja abrasiva) de cerca de 10% do número de tubos do trocador (no caso em estudo, 75 tubos) (MÜLLER-STEINHAGEN *et al.*, 2000).

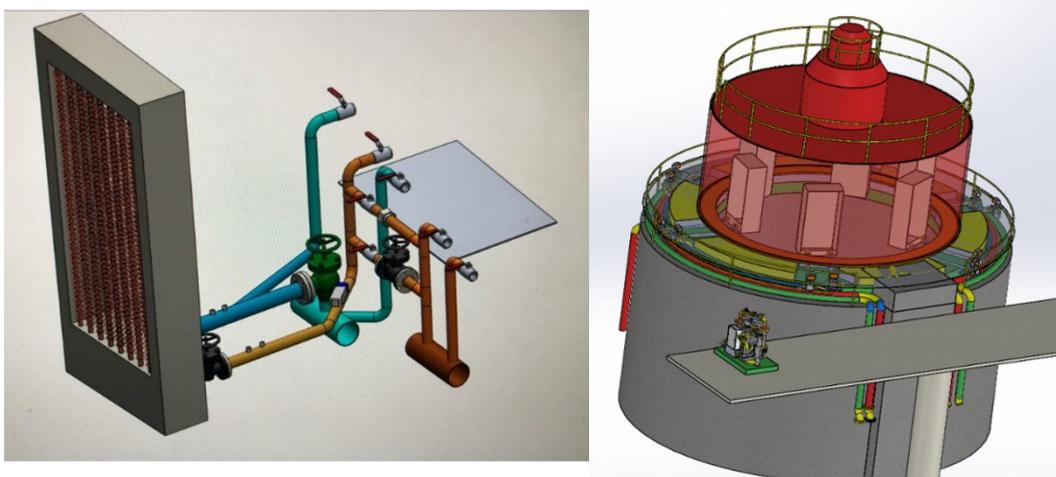
A Figura 11a mostra as esferas já posicionadas no interior da câmara de injeção e a Figura 11b mostra uma vista interna da câmara, em destaque a peneira, sobre a qual são depositados os artefatos de limpeza e sob a qual encontra-se instalado um tramo de descarga da câmara (não mostrado na foto, mas visível nas imagens da Figura 10). Dependendo da programação do sistema de automação, e pela ação da bomba hidráulica, o fluxo pode ser dirigido para os tubos do trocador de calor (transportando os artefatos de limpeza) ou para a conexão de descarte abaixo da peneira, eliminando a incrustação removida no ciclo anterior e retendo os artefatos, que continuam disponíveis para viabilizar um novo ciclo de limpeza.



(a) Artefatos de limpeza inseridos na câmara de injeção (b) Peneira da câmara.

Figura 11 - Câmara de injeção com artefatos de limpeza e vista interior

Acoplamento do dispositivo de limpeza *online* ao trocador a ser submetido à limpeza. Conforme ilustrado na Figura 12, em seu processo normal de operação, o dispositivo de limpeza *online* é acoplado ao trocador de calor a ser submetido ao processo de limpeza por meio do acoplamento realizado com mangueiras flexíveis e engates do tipo rápido. Para que este acoplamento seja possível, os tramos hidráulicos de entrada e de saída do fluido de trabalho no trocador de calor precisam ser adaptados para permitir o seu acoplamento ao equipamento de limpeza *online*, assim permitindo a circulação dos artefatos de limpeza. A Figura 13a ilustra a adequação realizada na tubulação e a plataforma para receber o equipamento de limpeza *online*. A Figura 13b (à direita) ilustra o dispositivo de limpeza *online* posicionado na plataforma e preparado para ser acoplado a qualquer um dos seis trocadores de calor do sistema de arrefecimento do hidrogenador.



(a) Adequação dos tramos hidráulicos e plataforma de acoplamento

(b) Com junto de seis trocadores do sistema de arrefecimento do hidrogerador

Figura 12 - Plataforma de acoplamento do OnlineCleaner ao trocador de calor

A Figura 13 mostra um procedimento de acoplamento realizado por pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio, com o equipamento de limpeza *online* já acoplado a um dos trocadores de calor do equipamento de processo industrial (neste caso, o trocador TC1 do hidrogerador). À esquerda, uma visão do equipamento acoplado a um dos trocadores de calor do hidrogerador (acesso mostrado na abertura lateral da carcaça do hidrogerador) e à direita uma visão expandida das mangueiras flexíveis de acoplamento.



Figura 13 - Acoplamento do *OnlineCleaner* ao trocador de calor

Pela ação de um sistema servo-hidráulico, os artefatos de limpeza inseridos na Câmara de injeção de esferas abrasivas retornam à Câmara de recuperação após serem forçados pelos tubos do trocador. O transporte dos artefatos entre essas

câmaras permite a sua lavagem e a remoção da incrustação removida pelos dutos de drenagem instalados na parte inferior dessas câmaras, equipadas com peneiras que impedem o descarte dos artefatos. Compete ao sistema de automação, por meio de eletroválvulas e outros dispositivos, comandar a operação do sistema de forma contínua, sem a interferência de um operador humano.

Basicamente, o dispositivo inovador de limpeza *online* de trocadores de calor utiliza a própria água que circula pelos tubos do trocador de calor —fluido de trabalho frio do trocador— para transportar para dentro dos tubos do trocador os artefatos de limpeza (esferas de esponja de abrasividade predeterminada), que removem a incrustação por uma ação de escovação mecânica *online*, conforme ilustrado no conjunto de fotos da Figura 14.

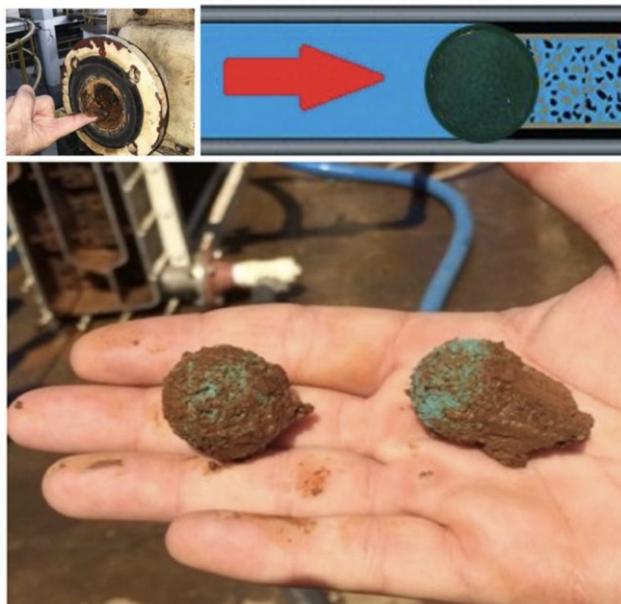


Figura 14 - Remoção de incrustações pela ação do artefato de limpeza

A Figura 14, constitui-se em evidência da eficácia da operação, em que a esfera abrasiva, em uma única operação de limpeza *online*, foi capaz de remover a incrustação depositada na superfície interna em um dos tubos ao longo de alguns meses de operação do trocador de calor. Entretanto, a melhor alternativa de uso é manter o dispositivo de limpeza *online* acoplado e em funcionamento contínuo, assim evitando que as incrustações se acumulem, tornando o processo de limpeza menos intenso, contínuo, localizado, e mais eficaz.

Conforme discutido anteriormente, a eficácia de operação do trocador de calor fica fortemente comprometida pela inevitável acumulação de incrustação (fouling) nas superfícies internas do trocador, onde ocorre a transferência de calor entre os fluidos de trabalho do trocador. O fenômeno da incrustação é complexo e decorre do depósito de impurezas de natureza orgânica (e.g., materiais biológicos, larvas de matéria viva) ou inorgânica (e.g., óxidos, sedimentos, sais minerais, resíduos e impurezas de óleos, gorduras ou produtos químicos) nas superfícies internas do trocador. A formação dessas camadas isolantes não só se impõe como uma resistência térmica adicional à transferência de calor, como, também, impõe perda de carga aumentando custos de bombeamento dos fluidos de trabalho do trocador. Para ilustrar o impacto da incrustação no desempenho do trocador de calor, foram realizados ensaios experimentais de monitoramento.

Conforme comprovado pelos resultados de ensaios experimentais de monitoramento do trocador documentados na Figura 15, após 90 dias de operação contínua do hidrogenador, em função da inevitável incrustação acumulada nos tubos do trocador, a sua efetividade decresceu drasticamente (de $\varepsilon = 0,67$ para $\varepsilon = 0,46$). Igualmente documentado na figura, uma única intervenção de limpeza online, realizada três meses após o início do experimento, conseguiu recuperar a efetividade do trocador ao seu valor original.

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, evita-se que a incrustação ainda incipiente se cristalice e deposite nas paredes internas dos tubos do trocador de calor, preservando, dentro de uma faixa estreita, o valor de efetividade de trocador limpo durante todo o período de funcionamento do mesmo. O valor da efetividade é calculado com base no balanço térmico entre os fluidos de trabalho do trocador, descrito no capítulo anterior.

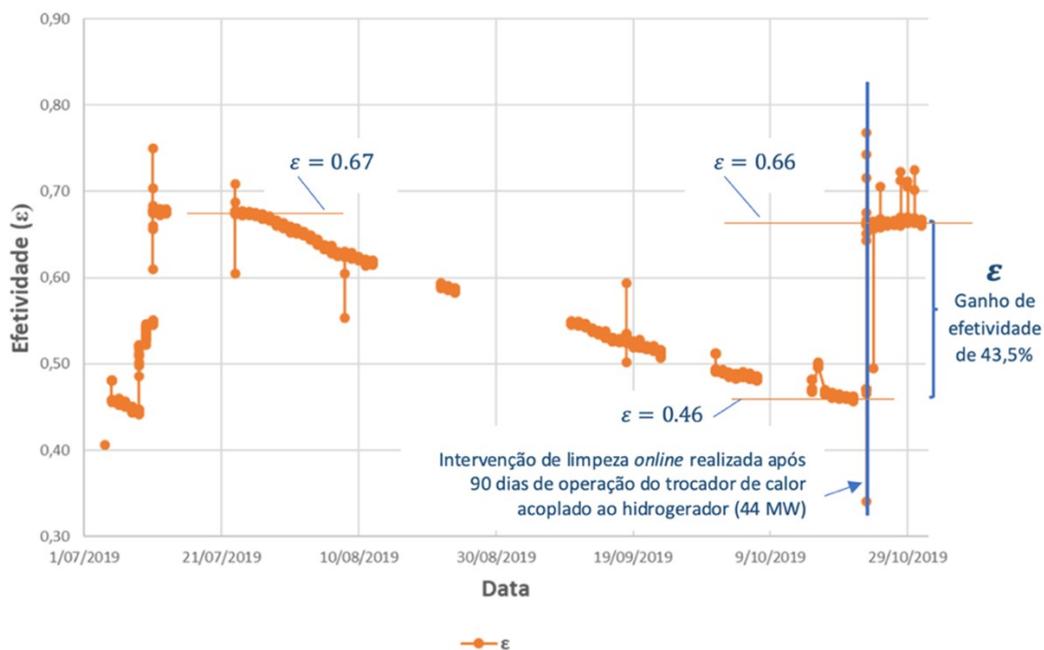


Figura 15 - Comprovação experimental da eficácia da técnica de limpeza
 Fonte: Frota *et al.*, Proceedings of the Heat Exchangers Fouling and Cleaning Conference (HTRI, 2019).

No que concerne esta pesquisa de mestrado, o objeto de estudo concentra-se tão somente no estudo do escoamento nas câmaras de injeção e de recuperação de artefatos de limpeza do dispositivo de limpeza *online*; incluindo a simulação no circuito integrado que envolve ambas as câmaras de injeção e de recuperação de esferas abrasivas.

3.2. Escopo do estudo

A dissertação realizou a simulação computacional de circuitos hidráulicos críticos do protótipo do equipamento, numa primeira fase, no interior da câmara de injeção e, numa fase subsequente, em um circuito que integra ambas as câmaras. A simulação cumpriu a estratégia de aprimorar o projeto construtivo do equipamento de limpeza *online*, notadamente visando reduzir as perdas de carga que tão drasticamente impactam nos custos de bombeamento do fluido de trabalho que transporta os artefatos de limpeza para dentro dos tubos do trocador de calor e, por conseguinte, produzindo ganhos de efetividade do trocador.

No curso dos desenvolvimentos de otimização dos tramos hidráulicos do protótipo do dispositivo 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. 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 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 pela incorporação das modificações, o protótipo foi instrumentado e avaliado em laboratório.

Na sequência do estudo foi realizada a simulação numérica do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza no interior de ambas as câmaras, de injeção e de recuperação dos artefatos de limpeza. O estudo teórico fez uso de uma sofisticada ferramenta computacional 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 permitirá realizar a simulação e visualizar o escoamento no interior das câmaras acessórias do equipamento de limpeza *online*. O *software Ansys Fluent* resolve as complexas equações que governam o escoamento. O *Fluent* oferece uma interface amigável que agiliza o processo de CFD do pré ao pós-processamento em uma única janela de fluxo de trabalho, permitindo acionar o módulo *equation solver*, que resolve as equações de movimento; permite, também, escolher o modelo de turbulência que melhor reproduz a realidade do complexo escoamento no interior dos tramos do trocador e o módulo de transferência de calor quando aplicável, ou seja, sempre que trocas térmicas forem consideradas. Dentre outras vantagens da simulação numérica realizada no protótipo, a ferramenta computacional *Ansys Fluent* permite, também, de forma prática e interativa, a visualização bi e tridimensional do escoamento em diferentes ângulos, contribuindo para um diagnóstico da realidade do escoamento nos níveis micro e macro.

O alcance dessa pesquisa transcende os interesses de curto prazo de reduzir perdas de carga nos tramos do equipamento de limpeza *online* concebido, já que, também, capacita o autor deste trabalho para investigações futuras de escoamentos complexos que poderão orientar desdobramentos futuros desta pesquisa de mestrado, bem como abrir novos caminhos e delinear novas alternativas tecnológicas para mitigar a indesejável incrustação em trocadores de calor, assim aprimorando a eficácia dos sistemas *online* 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.

O próximo capítulo detalha o estudo teórico e experimental objeto desta pesquisa de mestrado.

4. Inovações introduzidas e fundamentos da simulação CFD

Conforme discutido no capítulo anterior, no contexto de uma sequência de desenvolvimentos complementares, dois protótipos foram desenvolvidos de um dispositivo de limpeza *online* de trocadores de calor, o primeiro equipado com câmaras verticais de injeção e recuperação dos artefatos de limpeza (Projeto de P&D Light/Aneel 06-07/2011), posteriormente substituído por outro, mais compacto, operando com câmaras horizontais (P&D 5161-010/2016). Na sequência desses desenvolvimentos, a versão do protótipo de câmaras horizontais (denominada pela sigla *OnlineCleaner*) recebeu apoio de um projeto de inovação do SEBRAE (Projeto Catalisa ICT no. 29083-116/2022), viabilizando o depósito de um pedido de patente de equipamento (N.º do Pedido: BR102023021858-0, data de depósito: 20/10/2023). Todos esses projetos foram desenvolvidos por um grupo de pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio, assim motivando uma linha de pesquisa relacionada a sistemas automatizados de arrefecimento de equipamentos de processo industrial, no âmbito da qual esta pesquisa de mestrado em metrologia se desenvolve. Em particular, a pesquisa de mestrado estuda o escoamento do fluido de trabalho dos artefatos de limpeza em tramos hidráulicos críticos das câmaras de injeção e de recuperação dos artefatos de limpeza.

Com base em provas de conceito realizada em laboratório e fundamentado em resultados de ensaios realizados em campo, ambos os protótipos do equipamento foram validados pelo seu acoplamento a trocadores de calor de um hidrogerador (44 MW) de uma usina hidrelétrica operada pela concessionária Light Energia S.A. (Usina Fontes Nova, Piraí, RJ). Os ensaios realizados com o protótipo acoplado a um dos seis trocadores de calor do sistema de arrefecimento do grupo hidrogerador permitiram comprovar ser possível realizar a limpeza *online* (*i.e.*, sem a necessidade de parada técnica da turbina, assim evitando interromper a geração) como, também, a capacidade de os artefatos de limpeza remover incrustações acumuladas nos tubos do trocador. Os dados experimentais foram utilizados como dados de entrada da simulação dos escoamentos simulados.

4.1. Câmaras de injeção e de recuperação dos artefatos de limpeza

De forma sucinta, esta seção apresenta as câmaras de injeção e de recuperação dos artefatos que integram o equipamento de limpeza *online* de trocadores de calor. 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 detalhado neste capítulo, essas câmaras sofreram modificações visando melhorar a hidrodinâmica do escoamento no seu interior, assim agregando inovações radicais e incrementais no equipamento de limpeza *online*.

A imagem da esquerda da Figura 16 mostra as duas câmaras do equipamento e o computador industrial que comanda o sistema de automação embarcado, cuja tela de programação (ativada durante uma operação de limpeza *online*) é mostrada na imagem da direita da mesma figura. A câmera de injeção é a que aparece mais próxima ao computador mostrado na foto da esquerda, interconectada à câmara de recuperação pela tubulação de entrada no bloco de acrílico (corpo do dispositivo opto eletrônico contador de artefatos de limpeza).

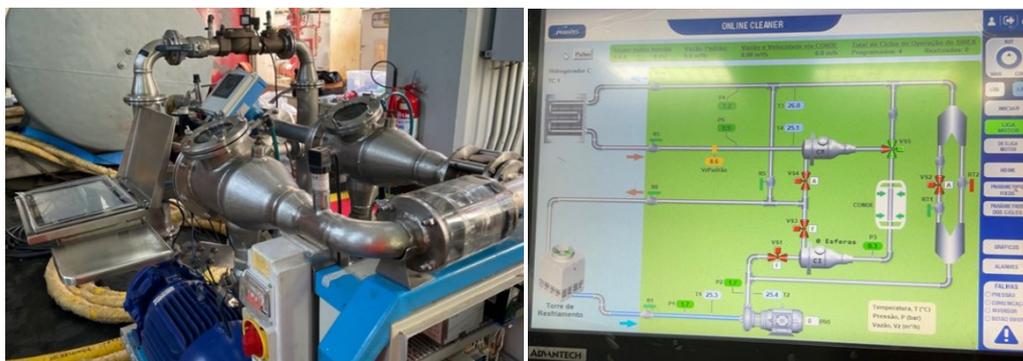


Figura 16 - *OnlineCleaner* e tela do sistema de automação embarcado

Na tela do computador que comanda o sistema de automação estão representados, por seus respectivos ícones, o trocador de calor (cujos tubos são os alvos do processo de limpeza); uma torre de refrigeração, comumente utilizada em sistemas de água de refrigeração; o computador do sistema de automação embarcado; o contador opto eletrônico, que contabiliza o total de artefatos de limpeza introduzidos e retirados do trocador de calor (e que, também, mede o diâmetro e a velocidade de navegação do artefato, permitindo calcular a vazão do

seu fluido de transporte); as eletroválvulas, comandadas pelo sistema de automação; os diferentes sensores de pressão, temperatura e vazão instalados; e os tramos hidráulicos que interconectam as câmaras de injeção e de recuperação, mostrando, ainda, o circuito hidráulico principal de injeção dos artefatos de limpeza e o de bypass, ambos conectados aos tramos de entrada do trocador de calor. 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 de 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 da Figura 17 mostram outras vistas superiores do equipamento, em destaque as duas câmaras de artefatos de limpeza e os circuitos hidráulicos que as interconectam. Na imagem da esquerda, a câmara inferior é a de injeção, cujo tramo de entrada 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. Nesta figura, a câmara superior é a de recuperação, equipada com um medidor (Endress+Hauser) que mede, de forma independente, a vazão do fluido de transporte dos artefatos antes de nela adentrar (*i.e.*, do fluido que já circulou pelos tubos do trocador de calor). Já a imagem da direita, ilustra a conectividade entre ambas as câmaras pelo lado do contador opto eletrônico (identificado pela Sigla CONDE) e do dispositivo comutador de fluxo (equipado internamente com uma válvula seletora). Este permite três opções de fluxo: (i) fluxo principal, que transporta os artefatos de limpeza diretamente para a chicana instalada na entrada do trocador de calor, antes passando pelo contador opto eletrônico e pelo mencionado dispositivo comutador de fluxo; (ii) fluxo de transposição, que permite resgatar os artefatos de limpeza após circularem pelos tubos do trocador, restaurados na câmara de recuperação e transferidos 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*.



Figura 17 - Interconexão das câmaras dos artefatos do *OnlineCleaner*

4.2. Concepção preliminar da câmara de injeção dos artefatos de limpeza

No curso de desenvolvimento da primeira versão da câmara de injeção de artefatos de limpeza (esferas abrasivas), esta foi originalmente concebida com duas peneiras perpendiculares entre si. Esta opção foi, entretanto, descartada em uma fase preliminar de desenvolvimento do projeto por, desnecessariamente, impor perda de carga excessiva à bomba hidráulica (APA, 2023).

4.3. Aprimoramentos no projeto construtivo das câmaras

As Figura 18 e 19 apresentam uma representação artística do projeto construtivo construído com a ferramenta computacional *SolidWorks* da câmara de injeção e da câmara de recuperação dos artefatos de limpeza do *OnlineCleaner*.

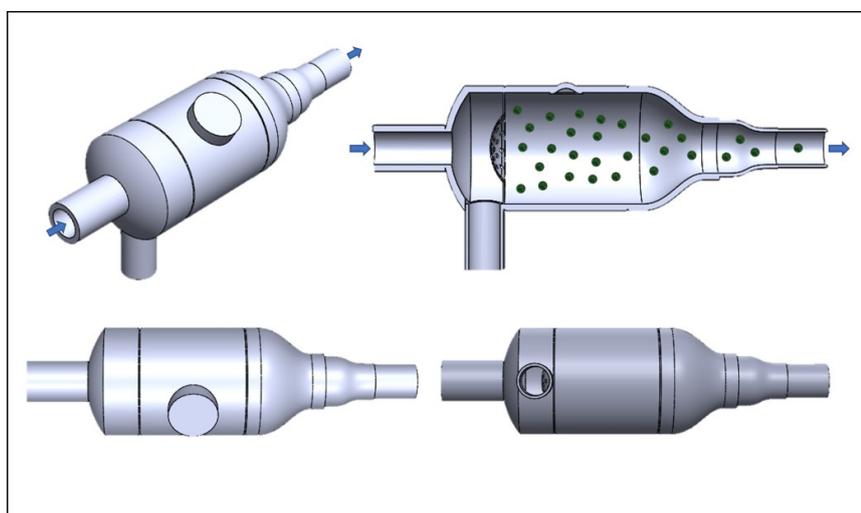


Figura 18 - Projeto original da câmara de injeção dos artefatos

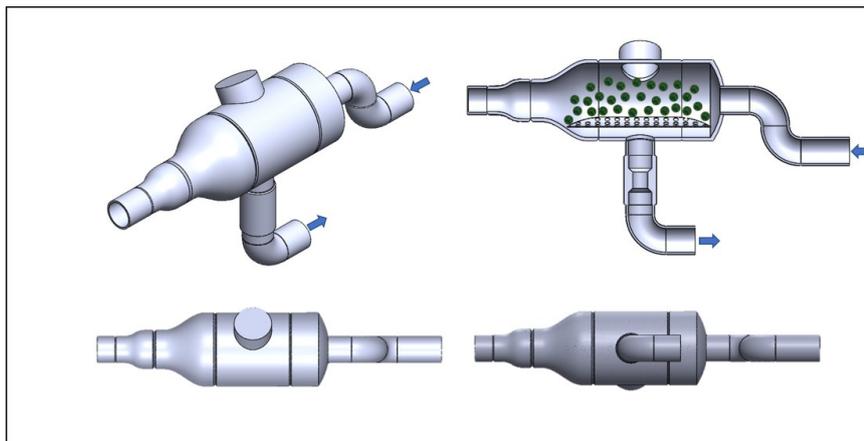


Figura 19 - Projeto original da câmara de recuperação dos artefatos

Já as imagens da Figura 20 e 21 mostram, respectivamente, os respectivos projetos (*SolidWorks*) da versão modificada das câmaras de injeção e de recuperação dos artefatos de limpeza do *OnlineCleaner*.

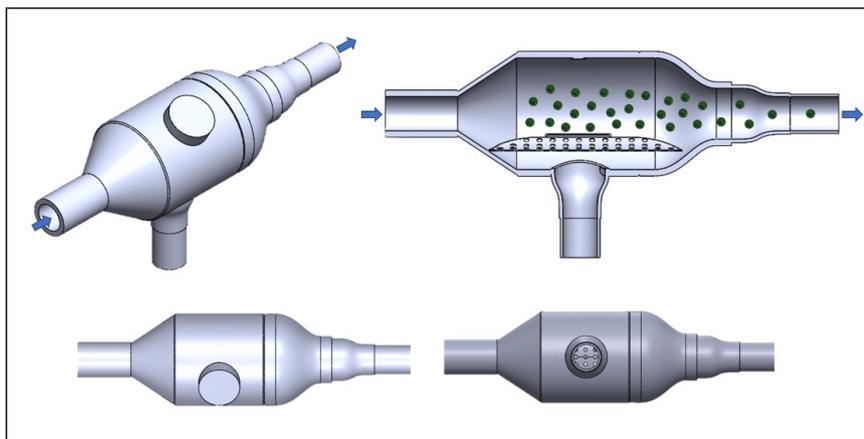


Figura 20 - Projeto modificado da câmara de injeção dos artefatos

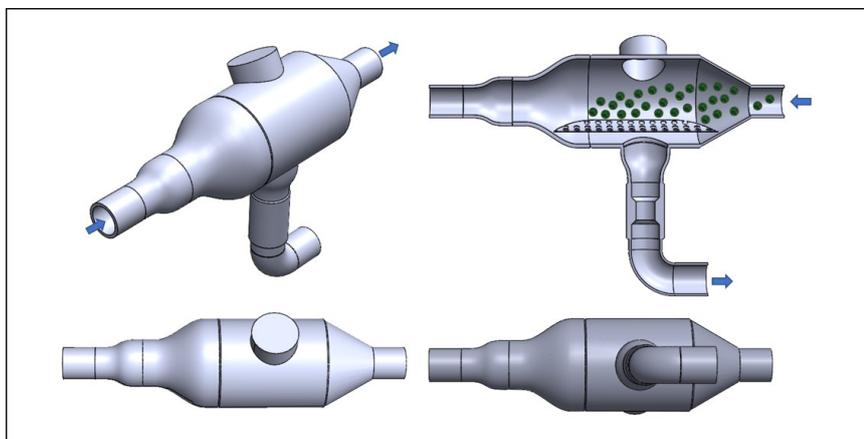


Figura 21 - Projeto modificado da câmara de recuperação dos artefatos

O projeto modificado teve por objetivo adequar a geometria das câmaras de injeção e de recuperação para “suavizar” o escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza no seu interior e, por conseguinte, reduzir perdas de carga localizadas. Este propósito foi conseguido substituindo e reposicionando algumas conexões que criavam zonas de descolamento e de recirculação do escoamento. Conforme evidenciado nas figuras acima, no caso da câmara de injeção, a modificação foi mais drástica, tendo resultado na substituição da peneira vertical de retenção dos artefatos de limpeza por uma peneira horizontal que, por conseguinte, requereu o reposicionamento do tubo de drenagem vertical posicionado abaixo da peneira.

Dentre as modificações introduzidas, destacam-se:

- em ambas as câmaras (de injeção e de recuperação), os tubos de drenagem originais (tubo soldado diretamente na parte inferior do corpo da câmara) foram substituídos por uma conexão soldada a uma conexão sem arestas (especialmente usinada), que suavizou o escoamento no dreno de descarga, na saída inferior das câmaras;
- a conexão de entrada do tipo “cap” (conexão cônica) foi substituída por uma conexão em tronco de cone, também “suavizando” o escoamento de entrada;
- a conexão no duto de entrada da câmara de recuperação foi substituída por um tubo reto de comprimento igual a dez diâmetros, reduzindo perdas de carga e assegurando a condição de escoamento completamente desenvolvido na tubulação de entrada da câmara de recuperação;
- um medidor de vazão foi instalado no tramo hidráulico que conecta o duto de saída do trocador de calor à câmara de recuperação, provendo dados de interesse para a simulação;
- a peneira horizontal foi reposicionada para tangenciar a superfície interna do tubo horizontal de saída da câmara, eliminando um “degrau” existente na configuração anterior, responsável por zonas internas de recirculação.

4.4.

Projeto construtivo da câmara de injeção dos artefatos de limpeza

As Figuras A1 e A2 do Apêndice A definem as dimensões características associadas aos projetos mecânicos construtivos (original e modificado) da câmara de injeção dos artefatos de limpeza. Conforme mostrado, ambas as câmaras são compactas, concebidas para armazenar uma quantidade pré-determinada de artefatos de limpeza e não introduzir distorções significativas no escoamento, por conseguinte, minimizando indesejáveis perdas de carga que tão expressivamente impactam nos custos de bombeamento do fluido de trabalho do trocador de calor.

4.5. Ferramentas computacionais utilizadas.

O projeto mecânico de aprimoramento das câmaras e dos tramos hidráulicos foi desenvolvido fazendo-se uso do aplicativo *SolidWorks* de modelagem sólida, auxiliado por computador, entendido como ferramenta computacional eficaz de projeto de equipamentos. Após o aprimoramento do projeto e implementadas as modificações, o protótipo foi instrumentado e avaliado em laboratório, cujos resultados integram a parte experimental desta pesquisa de mestrado, também discutida neste capítulo.

Adicionalmente ao *SolidWorks*, o software *Ansys Fluent* –ferramenta de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) igualmente de interesse em Engenharia Mecânica e cuja licença de uso igualmente encontra-se disponível para alunos da PUC-Rio– foi utilizado para realizar a simulação do escoamento no interior das câmaras do dispositivo de limpeza de trocadores de calor. O estudo teórico via CFD resolve as equações que governam o escoamento no volume de controle definido pelo fluido que preenche os tramos hidráulicos e as câmaras de injeção e de recuperação do equipamento. Enquanto o software *SolidWorks* gera o desenho associado à geometria do escoamento (via construção do projeto mecânico), o software *Ansys* gera o volume de controle e a malha computacional para, na sequência, realizar a simulação e visualização do escoamento pela solução das complexas equações envolvidas. Esta ferramenta computacional é utilizada para modelar o escoamento do fluido, instrumentada para operar escoamentos expostos à transferência de calor e de massa em escoamentos complexos. O *Ansys/Fluent* oferece uma interface moderna e amigável que agiliza o processo de CFD do pré ao pós-processamento em uma única janela de fluxo de trabalho, permitindo acionar as equações de movimento, escolher o modelo de turbulência que melhor modela a realidade física do complexo escoamento no interior dos tramos do trocador de calor, permitindo acionar a equação de conservação de energia, sempre que trocas térmicas forem consideradas. Essas ferramentas, consideradas essenciais, foram amplamente utilizadas no desenvolvimento desta pesquisa de mestrado, cujo foco é a avaliação e simulação do complexo escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza no interior das câmaras de injeção e de recuperação do equipamento que

realiza a desobstrução dos tubos de trocadores de calor. De forma sucinta, essas ferramentas computacionais são, a seguir, caracterizadas:

- **Software *SolidWorks*** (Edição 2022) – é um aplicativo de projeto e engenharia desenvolvido pela empresa *Dassault Systèmes*. Sua compatibilidade com múltiplos formatos de arquivo e a sua capacidade de se integrar com outras ferramentas CAD, o tornam uma solução versátil e adaptável a diversos ambientes de trabalho.
- **Software *Fluent Ansys 2023 R2 & Ansys Student 2023 R2*** – é um software de simulação por volumes finitos. Dentre os módulos que integram o aplicativo computacional, destaca-se o ANSYS Fluent, especializado em dinâmica computacional de fluidos (CFD), o que possibilita a análise detalhada de fluxos em complexas aplicações de engenharia, permitindo resolver as equações físicas que regem o escoamento (Equação da continuidade, quantidade de movimento e conservação de energia (acionado quando existem trocas de calor), oferecendo alternativas de distintos modelos de turbulência). O software de simulação CFD é amplamente utilizado na indústria aeronáutica, automotiva e projetos de sistemas de energia, adequadamente modelando e interpretando a realidade física associada aos fenômenos de transferência de calor, hidrodinâmica de escoamentos laminares e turbulentos.

4.6.

Ferramentas acessórias do software *Fluent Ansys 2023 R2*

Dois softwares acessórios operam em conexão com o *Fluent Ansys*:

- ***Design Modeler*** – módulo de modelagem paramétrica do Ansys, com interface similar a outros softwares CAD. Simplifica a preparação de modelos para operações de malha, oferecendo ferramentas para criar e editar geometrias 2D e 3D para simulações de CFD. Inclui bibliotecas de formas, ferramentas booleanas e de modelagem avançada, além de recursos gráficos para visualizar e corrigir malhas para cálculos numéricos no Fluent.
- ***Meshing no Workbench ANSYS*** – o processo de *meshing* no Workbench divide a geometria de um modelo em elementos menores para facilitar cálculos numéricos em análises de volumes finitos. Essa subdivisão cria uma malha de tetraedros, hexaedros e prismas, conectados por nós que servem como pontos para simulações. O "*inflation*" aumenta a densidade de células computacionais em áreas críticas, melhorando a resolução das análises de fluidos e transferência de calor, especialmente perto de superfícies sólidas. Isso permite simulações mais precisas, adaptando-se à geometria física e aos fenômenos estudados. O setup configura o ambiente de simulação (CFD), escolhendo modelos físicos e definindo propriedades dos fluidos e condições de contorno. O *Workbench* soluciona as equações que regem o problema físico, usando métodos numéricos.
- ***Etapa Results no ANSYS Fluent*** – esta é a última etapa da parametrização do software. É fundamental para visualizar e analisar os resultados de simulações

CFD, oferecendo opções para apresentação de dados, como gráficos, contornos e animações, facilitando a interpretação do comportamento dos fluidos e a distribuição de temperaturas, pressões e velocidades. Permite análises detalhadas em pontos específicos e comparação entre diferentes cenários. No entanto, optou-se por utilizar o CFD POST, uma ferramenta acessória do Ansys, devido à sua maior flexibilidade e capacidades de análise avançada, sendo mais adequada para as necessidades desta pesquisa de mestrado (LEE, 2018). O CFD-Post é especializado no pós-processamento e análise de dados de simulações CFD, facilitando a interpretação detalhada dos resultados e proporcionando uma compreensão profunda do comportamento dos fluidos e fenômenos relacionados.

4.7.

Equações que governam o escoamento estudado

O software *Fluent/Ansys 2023 R2* resolve, numericamente, as equações que governam o fluxo turbulento associado à abordagem de média de Reynolds (RANS Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Nesta abordagem, cada variável de fluxo ϕ é representada pela decomposição de dois componentes: pela média temporal, adicionada ao componente de flutuação ϕ' (o valor RMS da flutuação do sinal), ou seja, $\phi = \underline{\phi} + \phi'$. Cálculo de grandezas médias no tempo, em vez de resolver todas as escalas e flutuações de turbulência requer significativamente menor capacidade de cálculo. A abordagem RANS cumpre isso calculando a média das equações de Navier-Stokes ao longo do tempo (POPE, 2000), resultando em uma abordagem mais gerenciável computacionalmente para modelar fluxos turbulentos. Esta aproximação é eficaz para uma ampla gama de aplicações de engenharia, fornecendo uma representação adequada do comportamento do fluxo turbulento médio, simplificando o processo de cálculo por não ter que resolver todos os detalhes das flutuações turbulentas. O *Fluent/Ansys* resolve numericamente as equações de conservação de massa e momento linear, descritas abaixo com base nos princípios fundamentais da dinâmica de fluidos.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (5.2)$$

Na equação (5.2), identifica-se o efeito do Tensor Taxa de Deformação, definido pela expressão:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.3)$$

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

$$p = P + \frac{2}{3} \rho \kappa \quad (5.4)$$

P denota a pressão termodinâmica e κ a energia cinética turbulenta. Visando calcular os valores de viscosidade turbulenta, foi utilizado o modelo RANS $\kappa - \omega$ SST ($\kappa - \omega$ Shear Stress Transport) (MENTER, 1994). A simulação com base neste modelo refere-se a uma abordagem avançada na modelagem da turbulência em dinâmica de fluidos computacional (CFD). Este modelo combina as forças do modelo $\kappa - \omega$ em regiões próximas à parede do escoamento com as do modelo $\kappa - \omega$ em regiões dela distantes.

A vantagem do modelo SST é a sua capacidade de alternar entre esses dois modelos de turbulência conforme necessário, o que é alcançado fazendo-se uso de uma função de mistura que adapta os modelos com base na distância da parede. O modelo $\kappa - \omega$ SST melhora a precisão dos cálculos de fluxo, especialmente em casos com fortes gradientes de pressão e fluxos separados. Adicionalmente, o modelo SST modifica a equação de transporte para o termo específico da taxa de dissipação de turbulência (ω), incluindo um termo de difusão cruzada que ajuda a melhorar a resposta do modelo em fluxos com fortes estratificações de cisalhamento. As equações que regem este modelo são baseadas no modelo $k-\omega$ padrão (ANSYS, 2010).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (5.6)$$

Nestas equações, o termo G_k representa a produção de energia cinética e é definido de maneira similar no modelo $\kappa - \omega$ padrão. G_ω representa a geração de ω . Γ_k e Γ_ω representam a difusividade efetiva de k e ω , respectivamente. Y_k e Y_ω representam a dissipação de κ e ω devido à turbulência. D_ω representa o termo de difusão. S_k e S_ω são termos de fonte definidos pelo usuário. Já as difusividades efetivas para o modelo $\kappa - \omega$ SST são dadas pelas expressões:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (5.7)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (5.8)$$

Nessas expressões, μ_t é a viscosidade turbulenta, calculada pela expressão (5.9) enquanto σ_k e σ_ω são os números de Prandtl turbulento para κ e ω , calculados pelas expressões (5.10) e (5.11), respectivamente.

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\left[\frac{1}{\alpha^*} \frac{S F_2}{\alpha_1 \omega} \right]} \quad (5.9)$$

e S é a magnitude da taxa de deformação calculados pela expressão.

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{(1 - F_1)}{\sigma_{k,2}}} \quad (5.10)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{(1 - F_1)}{\sigma_{\omega,2}}} \quad (5.11)$$

As funções de mistura principal, F_1 e F_2 , são definidas pelas equações a seguir:

$$F_1 = \tanh \tanh \phi_1^4 \quad (5.12)$$

$$\phi_1 = \min \left[\left(\frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega + y^2} \right] \quad (5.13)$$

$$D_\omega^+ = \max \left[\frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad (5.14)$$

$$F_2 = \tanh \tanh \phi_2^4 \quad (5.15)$$

$$\phi_2 = \max \left[\frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (5.16)$$

F1 denota a função de mistura principal, que controla o quanto os modelos $\kappa - \omega$ e $\kappa - \varepsilon$ contribuem em cada ponto. Enquanto F1 caracteriza uma zona de transição ($0 < F1 < 1$) em que $F1 = 1$ significa perto da parede e $F1 = 0$ longe dela, F2 é a função de mistura auxiliar que altera a viscosidade turbulenta.

A simulação do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza requer a definição das condições de contorno e dos valores representativos das propriedades do fluido. Na sequência das operações da simulação, para cada um dos casos de interesse, será caracterizada a condição de contorno imposta (*e.g.*, vazão na entrada e pressão na saída). A construção do volume de controle do fluido e da malha computacional, foi realizada fazendo-se uso dos recursos dos aplicativos *Design Modeler* e *Meshing*, cujos procedimentos são descritos a seguir.

Do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza requer a definição das condições de contorno e propriedades do fluido. Para cada um dos casos de interesse serão apresentados posteriormente o tipo de condição de contorno imposta (*e.g.*, vazão na entrada e pressão na saída).

Visando conduzir o desdobramento do volume de controle do fluido e da malha computacional, foi feito uso dos recursos de *Design Modeler* e *Meshing*, respectivamente. Esses procedimentos são descritos a seguir.

4.8.

***OnlineCleaner* acoplado ao trocador de calor de um hidrogerador**

Esta seção descreve resultados de ensaio do *OnlineCleaner* energizado por um grupo motor-bomba de 20 cv, acoplado a um dos seis trocadores de calor de grande porte do tipo água-ar (trocador de 4 passes, com 75 tubos aletados externamente, de 1" de diâmetro interno). Esses são os trocadores de calor que integram o sistema de arrefecimento de um dos três hidrogeradores (44 MW) da usina Fontes Nova, em operação no complexo hidrelétrico da bacia do Paraíba do Sul, em Pirai, RJ, em área de concessão operada pela concessionária de energia elétrica da Light Energia S.A.

A Figura 22 apresenta um desenho esquemático do *OnlineCleaner* acoplado ao trocador da usina hidrelétrica durante uma sequência de ensaios de validação do dispositivo de limpeza online, caracterizando um escoamento típico de injeção dos artefatos de limpeza.

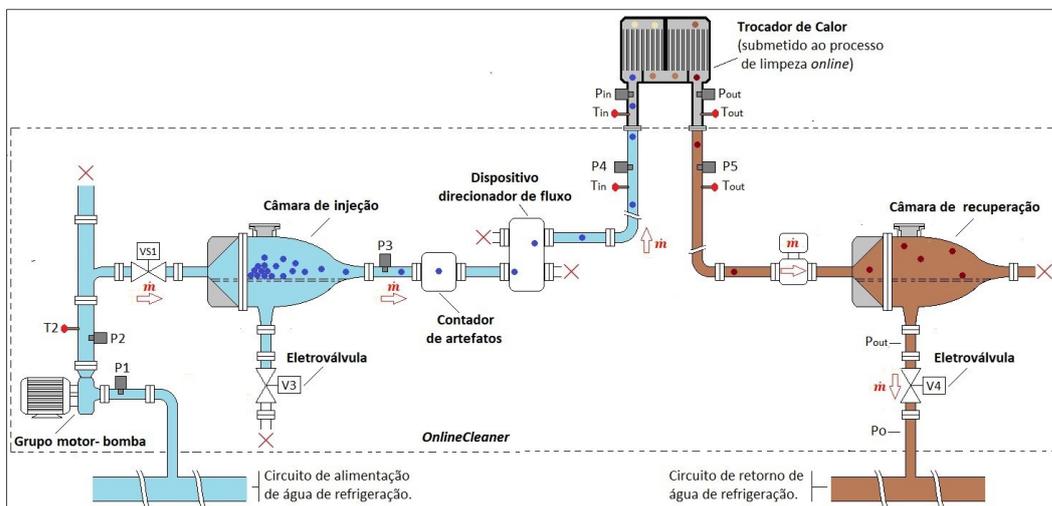


Figura 22 - *OnlineCleaner* acoplado, injetando artefatos

Os dados da Tabela 1 resumem resultados de ensaios realizados durante um ciclo de injeção dos artefatos de limpeza. Nas colunas da esquerda da tabela são indicados os resultados das medições de vazão e pressão medidos por sensores instalados no *OnlineCleaner* e monitorados na tela do computador embarcado do sistema de automação e controle operacional do equipamento de limpeza *online*. Já nas colunas da direita, são apresentados os resultados de medições independentes de vazão, pressão e temperatura do fluido de trabalho água do trocador realizadas por sensores instalados no sistema de monitoramento dos trocadores de calor controlados pela usina hidrelétrica. Os dados explicitados na cor vermelha da Tabela 1, destacam os valores utilizados para orientar a simulação CFD do escoamento, conforme será discutido no Capítulo 5.

Tabela 1 - Ensaios de injeção do *OnlineCleaner* acoplado ao trocador de calor

<i>OnlineCleaner</i> acoplado ao trocador de calor de um hidrogerador (44 MW), operando no seu ciclo de injeção dos artefatos de limpeza															
Freq. (Hz)	Grupo motor bomba hidráulica (20 horsepower)					Câmaras de injeção e de recuperação			Resultados de medição da vazão volumétrica (m ³ /h), pressure (bar) e temperatura (°C) do fluido de trabalho (água) do trocador						
	\dot{m}		P1	P2	ΔP_{bomba}	P3	P4	P5	\dot{m}		P _{in}	P _{out}	ΔP_{TC1}	T _{água, entrada}	T _{água saída}
	(m ³ /h)	(kg/s)	(bar)			(bar)			(m ³ /h)	(kg/s)	(bar)			(°C)	
20	13.20	3.66	1.90	2.90	1.00	1.70	2.40	1.80	13.20	3.65	2.30	2.10	0.20	22.9	30.1
45	18.80	5.21	1.60	6.80	5.20	5.50	5.40	4.20	18.80	5.21	5.10	4.60	0.50	23.0	28.6
50	20.10	5.57	1.70	7.00	5.30	6.30	6.10	4.10	20.10	5.57	6.00	4.50	1.50	23.0	27.9

Embora medições de pressão e temperatura também tenham sido realizadas no outro fluido de trabalho (ar) do trocador de calor água-ar (relevantes para se determinar a efetividade do trocador), estes dados não foram incluídos na Tabela 3 tendo em vista que fogem ao propósito desta análise, que visa orientar a simulação numérica do escoamento do fluido de transporte (água) dos artefatos de limpeza. Os valores indicados na cor vermelha (realizados com a bomba operando em 50 Hz), foram os dados utilizados como condições de contorno e dados de entrada da simulação realizada do escoamento na câmara de injeção de artefatos de limpeza.

Após serem recolhidos na câmara de injeção, os artefatos de limpeza cruzam o tubo interno do dispositivo opto-eletrônico CONDE (contador de esferas), que mede a velocidade de navegação dos artefatos (informação crítica para assegurar eficácia do processo de limpeza) como, também, contabiliza o total de artefatos em circulação. Na sequência deste processo, os artefatos adentram os tubos do trocador realizando a limpeza de seus tubos (remoção da incrustação acumulada), retornando à câmara de recuperação após deixarem o trocador, assim concluindo a primeira etapa de um ciclo de limpeza. Na sequência, inicia-se o processo de transposição dos artefatos de limpeza, que são bombeados de volta à câmara de injeção, antes passando em sentido reverso pelo CONDE, permitindo verificar se todos os artefatos de limpeza introduzidos durante o ciclo de injeção de fato foram recuperados de volta na câmara de injeção, preparando o sistema para realizar um novo ciclo de limpeza. Nesta operação de transposição, o operador do *OnlineCleaner* verifica (i) se nenhum artefato de limpeza ficou aprisionado em um dos tubos do trocador no curso do ciclo de limpeza em pauta e (ii) se a incrustação removida no ciclo de limpeza realizado foi eficazmente descartada pelo dreno, lembrando que a peneira deixa passar a incrustação, mas retém na câmara os artefatos de limpeza.

Da análise dos resultados dos experimentos documentados na Tabela 1 observou-se: (i) que o *OnlineCleaner* performou adequadamente, ou seja realizou um ciclo completo de limpeza de um trocador de grande porte (na seção anterior a versão do equipamento equipado com o *kit* motor-bomba de 4 cv mostrou-se adequado para realizar a limpeza de trocadores de pequeno e médio porte); (ii) o grupo motor bomba em sua versão de 20 cv forneceu a vazão de água requerida para arrefecimento do trocador de calor cujo faixa de operação normal do sistema de arrefecimento dos trocadores de calor fica restrita entre 13 m³/h e 20 m³/h; (iii) o grupo motor-bomba consegue circular os artefatos de limpeza dentro dos tubos do trocador, adequadamente vencendo a perda de carga $\Delta P = (P_{entrada} - P_{saída}) = 1,5 \text{ bar}$, imposta pelos tubos e pela incrustação acumulada nas suas superfícies internas, portanto cumprindo o propósito do equipamento de realizar a limpeza *online* do trocadores de grande porte.

A Figura 23 mostra um esquema do *OnlineCleaner* acoplado ao trocador de calor da usina hidrelétrica durante os ensaios de validação, representando um escoamento típico (reverso) do circuito hidráulico responsável pela recuperação dos dispositivos de limpeza.

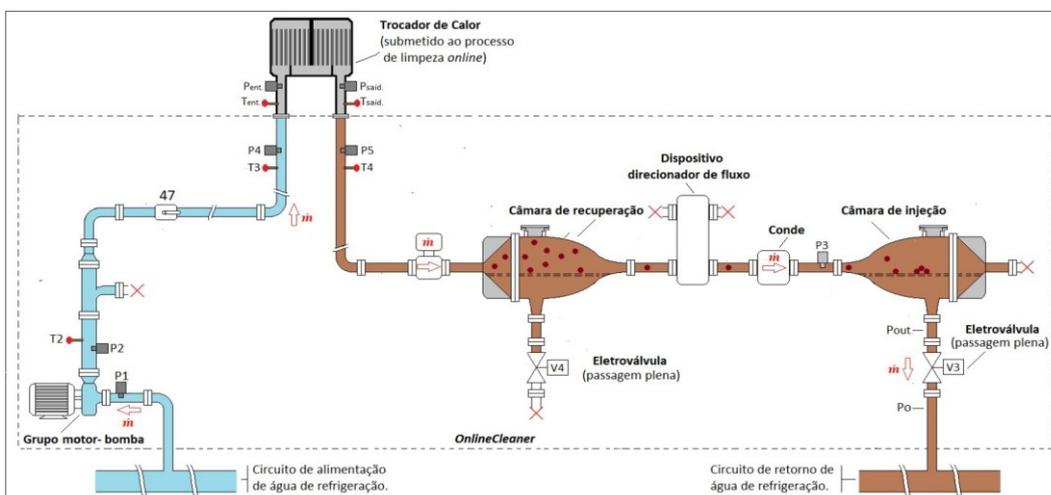


Figura 23 - *OnlineCleaner* acoplado, recuperando artefatos

Na sequência dos ensaios de validação do *OnlineCleaner* acoplado ao trocador de calor da usina hidrelétrica, os dados da Tabela 2 resumem novos resultados de experimentos realizados em condições distintas de vazão, porém associados ao circuito hidráulico de recuperação dos artefatos de limpeza.

Similarmente, os resultados na cor vermelha (realizados com a bomba operando em 55 Hz) foram os dados utilizados como condições de contorno e dados de entrada de uma outra simulação realizada do escoamento no circuito hidráulico que integra ambas as câmaras. Neste caso, o escoamento se inicia na câmara de recuperação e tem por objetivo trazer os artefatos de limpeza de volta à câmara de injeção, assim completando o ciclo de um ciclo de limpeza, enquanto prepara o equipamento para realizar o ciclo subsequente. O fato de este novo experimento ter sido realizado na frequência de 55 Hz, teve como objetivo criar uma nova condição de escoamento (agora na vazão de 33,40 m³/h), assim permitindo uma nova rodada de simulação em condições distintas da anterior.

Tabela 2 - Ensaio de recuperação do *OnlineCleaner* acoplado ao trocador

<i>OnlineCleaner</i> acoplado ao trocador de calor de um hidrogerador (44 MW), operando no seu ciclo de recuperação dos artefatos de limpeza															
Freq. (Hz)	Grupo motor bomba hidráulica (20 horsepower)					Câmaras de injeção e de recuperação			Resultados de medição da vazão volumétrica (m ³ /h), pressure (bar) e temperatura (°C) do fluido de trabalho (água) do trocador						
	\dot{m}		P1	P2	Δp_{bomba}	P3	P4	P5	\dot{m}		P _{in}	P _{out}	Δp_{TC1}	T _{água, entrada}	T _{água saída}
	(m ³ /h)	(kg/s)	(bar)			(bar)			(m ³ /h)	(kg/s)	(bar)			(°C)	
20	18.30	5.07	1.60	2.60	1.00	0.70	2.00	0.90	18.30	5.07	1.90	1.30	0.60	22.9	28.4
40	26.10	7.23	1.20	5.10	3.90	1.10	3.70	1.60	26.10	7.23	3.60	2.00	1.60	22.0	26.6
55	33.40	9.25	0.90	8.00	7.10	1.66	5.70	2.50	33.40	9.25	5.60	2.90	2.70	23.0	26.2

Cabe observar nos esquemáticos das Figuras 22 e 23 que o *OnlineCleaner* (delimitado pelas linhas pontilhadas) se alimenta de água de refrigeração do circuito de abastecimento da usina hidrelétrica, descarregando a água com o fouling removido após cada ciclo de limpeza, no anel de água de retorno. Embora possa parecer redundante, o trocador de calor é instrumentado com medidores de pressão e de temperatura que pertencem a instalação local, enquanto medidores semelhantes, porém calibrados, integram o sistema de medição embarcado no *OnlineCleaner*. Na cor azul da Figura 22 é ilustrado o escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza antes de sua entrada no trocador de calor. Mais especificamente o escoamento desde o início do processo (bombeado pelo grupo motor bomba hidráulica); adentrando a válvula solenoide VS1; pelo interior da câmara de injeção (para coletar os artefatos de limpeza); circulando pelo interior do dispositivo optoeletrônico contador de esferas (Conde); seguindo seu curso seletivo no dispositivo direcionador de fluxo; e pelas seções equipadas com instrumentação embarcada; até o flange de acoplamento do *OnlineCleaner* com a chicana que alimenta os tubos internos do trocador de calor submetido ao processo de limpeza online. Na cor marrom da Figura 23 (água contaminada pela incrustação removida)

é enfatizado o segmento do escoamento, desde a sua saída do trocador, passando pelas respectivas instrumentações da instalação e embarcada, em direção à câmara de recuperação, assim realizando a sua função de conduzir os artefatos de limpeza para a câmara de recuperação, onde serão lavados e armazenados temporariamente para (em processo subsequente) serem transferidos de volta à câmara de injeção

4.9.

Encerramento do capítulo

Cumprindo o propósito do capítulo, foram apresentadas diferentes alternativas consideradas do projeto construtivo das câmaras de injeção de artefatos de limpeza do dispositivo de limpeza *online* concebido e discutidos os resultados de experimentos de acoplamento do *OnlineCleaner* realizados no ambiente laboratorial e nas instalações de uma usina hidrelétrica, que faz uso de trocadores de calor. Fundamentado nos resultados dos experimentos realizados e discutidos neste capítulo, foram definidos os parâmetros de entrada que nortearam a simulação do fluido de transporte dos artefatos de limpeza, cujos resultados contribuem para validar o projeto construtivo das câmaras que integram o equipamento de limpeza *online*, assim validando a incorporação das inovações incrementais visando o aprimoramento operacional do equipamento inovador concebido. O trabalho de simulação do fluido de transporte dos artefatos de limpeza constitui objeto do próximo capítulo.

5. Simulação CFD do escoamento de transporte dos artefatos

Este capítulo concentra-se na simulação numérica do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza em tramos hidráulicos críticos do equipamento concebido (Patente INPI: BR102023021858-0, de 20/10/2023) para realizar a limpeza *online* das superfícies internas de trocadores de calor. O Capítulo detalha as hipóteses formuladas, analisa e discute os resultados da solução computacional das equações que governam o escoamento. Fundamentado no aprendizado do estudo computacional, apresenta as melhorias introduzidas no projeto construtivo do equipamento de limpeza *online* (*OnlineCleaner*). Detalhes construtivos e operacionais do equipamento encontram-se disponíveis em outros trabalhos (Frota e Germano, 2023 e Frota et al., 2019).

Considerando que (i) os artefatos de limpeza são construídos de material esponjoso com densidade próxima à do fluido que os transporta (no caso água); (ii) que a quantidade de artefatos de limpeza introduzidos no escoamento é pequena (cerca de 10% do total de tubos do trocador de calor) e (iii) que a presença dos artefatos de limpeza no escoamento é transitória, já que os ciclos de limpeza e de recuperação ocorrem em questão de segundos, é razoável considerar que a presença dos artefatos no escoamento não compromete a simulação do fluido de transporte, que desconsidera a sua presença. O uso de artefatos com densidade próxima à do seu fluido de trabalho visa facilitar o seu transporte pelos tubos do trocador, assim aumentando a eficácia do processo de limpeza. Já o uso de uma pequena quantidade de artefatos cumpre o propósito de evitar o seu congestionamento na chicana de entrada do trocador. Os artefatos de limpeza são produzidos com base em informação da natureza do fouling, assim prevenindo-os contra qualquer agressão química que possa comprometer a sua integridade (FROTA *et al.*, 2019). Embora o *OnlineCleaner* possa ser utilizado para diferentes tipos e modelos de trocador, o seu uso requer que o trocador seja do tipo tubular já que os artefatos de limpeza são de geometria esférica.

Não obstante se utilizar uma pequena quantidade n de artefatos de limpeza para remover a incrustação nos N tubos do trocador ($n \approx 0,1 N$), é importante considerar que todos os N tubos serão visitados por artefatos se a intervenção de limpeza for realizada por um conjunto p de ciclos individuais de limpeza, lembrando que o valor de N varia em função do tipo e modelo do trocador a ser submetido ao processo de limpeza. A definição prévia do total p de ciclos de limpeza para garantir com confiabilidade estatística que todos os tubos do trocador serão de fato visitados por pelo menos um artefato de limpeza pode ser orientado pelo algoritmo de Monte Carlo proposto por Rangel Rios, (RIOS *et al.*, 2022).

Conforme discutido nas publicações acima referenciadas, dois são os atributos básicos da alternativa de limpeza *online* (i) viabilizar a introdução dos artefatos de limpeza no fluxo do fluido de trabalho que circula pelos tubos dos trocadores de calor, sem interromper o seu funcionamento, assim conseguindo remover a indesejável incrustação acumulada nas superfícies de transferência de calor, que tão drasticamente compromete a efetividade do trocador e (ii) recuperar e limpar os artefatos de limpeza após cada ciclo de limpeza, assim evitando o seu descarte para o meio ambiente para que sejam reutilizados em ciclos subsequentes de limpeza *online*.

Não obstante essas características essenciais, para se assegurar a eficácia e razoabilidade do funcionamento do equipamento de limpeza *online*, o seu projeto construtivo deve minimizar perdas de carga localizadas nos diferentes tramos hidráulicos de injeção e de recuperação dos artefatos de limpeza, já que resistências hidráulicas impostas ao escoamento impactam, de forma severa, os custos de bombeamento do fluido de transporte desses artefatos. Este é o contexto que norteou o desenvolvimento desta pesquisa de mestrado; mais especificamente, realizar a simulação do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza como estratégia de orientar o desenvolvimento e a otimização do projeto construtivo de componentes críticos do equipamento de limpeza *online*.

5.1. Caracterização das simulações realizadas

As Figuras 22 e 23 do capítulo anterior identificam os tramos hidráulicos críticos do equipamento concebido para realizar a limpeza *online* de trocadores de calor. Já as Tabelas 3 e 4 documentam na cor vermelha, os dados (condições de contorno e dados de entrada) utilizados para orientar as diferentes simulações realizadas do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza. No total, três rodadas de simulação foram realizadas: nos respectivos escoamentos associados às versões original e modificada da câmara de injeção dos artefatos de limpeza e no escoamento associado à uma montagem em série das câmaras de recuperação e de injeção. Esta última simulação cumpriu o propósito de avaliar a eficácia do processo de recuperação e de limpeza dos artefatos de limpeza.

A primeira seção compara os resultados da simulação realizada do escoamento no interior das versões original e modificada da câmara de injeção, enquanto seção subsequente estuda o escoamento que resulta da integração em série das câmaras de injeção e recuperação.

Como resultados desses estudos de simulação CFD (*Computer Fluid Dynamics*) realizada no escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza em tramos críticos do equipamento concebido, ajustes no projeto construtivo foram realizados, orientando a incorporação de inovações incrementais e a construção de um protótipo modificado, que priorizou (i) eliminar zonas de recirculação do interior das câmaras de injeção e de recuperação e (ii) reduzir perdas de carga localizada, visando diminuir custos de bombeamento.

5.2. Confiabilidade do método computacional

A confiabilidade dos resultados da simulação numérica resulta, essencialmente, de cinco fatores que se fundamentam:

- na experiência prévia de inúmeros trabalhos de simulação já realizados com o software *Fluent Ansys*, que, definitivamente, comprovam a sua capacidade de resolver as complexas equações de movimento (Navier Stokes acopladas ao modelo de turbulência), adequadamente representando o problema físico objeto dos respectivos estudos realizados.

Dentre os muitos exemplos disponíveis na literatura especializada, destacam-se, para exemplificar, dois trabalhos (KARVINEN and AHLSTEDT, 2005; MULVANY *et al.*, 2004), ambos realizados em escoamentos associados a números de Reynolds elevados.

- na comprovação dos critérios específicos de convergência previamente definidos (em termos da capacidade do método numérico; da capacidade de processamento do computador utilizado e da verificação de critérios específicos previamente definidos, para cada equação de governo do escoamento estudado; no presente caso: 10^{-3} para as equações de conservação de momento e massa e de 10^{-4} para as equações $\kappa - \omega$ SST do modelo de turbulência selecionado;
- no teste de resolução espacial (teste de malha), realizado visando identificar com antecedência a quantidade de unidades de volume de controle necessárias para assegurar que a solução numérica fique independente da malha. O Apêndice B discute este conceito e detalha a condução do teste de malha realizado;
- no escoamento turbulento modelado pela alternativa $\kappa - \omega$ SST, obedecendo ao critério de que o parâmetro y^+ (distância do primeiro elemento de malha à parede) de fato satisfaz à condição $y^+ \leq 5$; o que foi garantido para todas as simulações realizadas;
- na comparação dos resultados gerados da simulação com valores medidos experimentalmente por instrumentos calibrados em locais críticos do escoamento, portanto com rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades (SI). (Nota: a comparação com os dados experimentais permite atribuir confiabilidade metrológica ao método numérico).

No que concerne a discretização espacial das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento linear, e do modelo de turbulência, utilizou-se o esquema de discretização *Upwind* de segunda ordem. Já para o acoplamento entre pressão e velocidade foi utilizado o algoritmo *Coupled* do software *Fluent*.

Conforme será discutido em seções específicas deste capítulo, resultados da simulação serão confrontados com resultados de experimentos de validação do dispositivo de limpeza *online* que possui embarcado um sistema de medição de pressão, vazão e temperatura calibrado contra padrões de referência de laboratórios acreditados.

A seção 5.3, a seguir, apresenta e discute, (i) os resultados de simulações realizadas no escoamento de artefatos de limpeza no interior das versões original e modificada da câmara de injeção e (ii) no circuito integrado do escoamento reverso (recuperação dos artefatos) no interior das câmaras de recuperação e de injeção.

5.3.

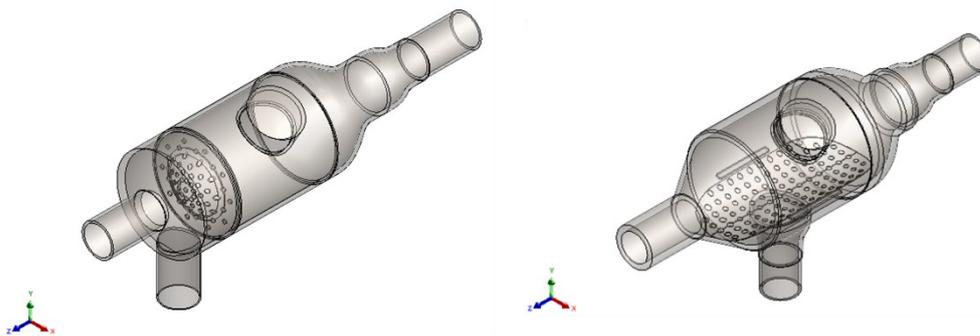
Simulações do escoamento de transporte dos artefatos de limpeza

Dois circuitos hidráulicos críticos do dispositivo de limpeza *online* de trocadores de calor foram selecionados para serem simulados.

5.3.1.

Simulação do escoamento na câmara de injeção

As imagens da Figura 24 ilustram os respectivos projetos construtivos realizados com a ferramenta computacional *SolidWorks* das versões original e modificada da câmara de injeção. A simulação computacional fazendo-se uso da ferramenta *Fluent Ansys* foi realizada nos escoamentos no interior dos projetos original e modificado da câmara de injeção



(a) versão original

(b) versão modificada

Figura 24 - Câmara de injeção: alternativas de projetos construtivos

5.3.1.1.

Dados de entrada e condições de contorno

A peneira horizontal instalada dentro da câmara de injeção mostrada na Figura 24 permite a saída da incrustação retendo, entretanto, os artefatos de limpeza no seu interior. Os resultados de medições realizadas com rastreabilidade metrológica que orientaram a simulação (condições de contorno e dados de entrada) encontram-se documentados na cor vermelha da Tabela 1 do capítulo anterior e resumidos a seguir:

Dados de entrada:

- Fluido do escoamento: água, cujas propriedades foram avaliadas na temperatura de entrada (medida) do fluido de trabalho do trocador de calor; $T_{ent} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$; $\rho = 0,9975 \text{ g/mL}$; $\mu = 0,9321 \text{ mPa s}$ (Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, Ed 64).

Condições de Contorno:

- Vazão (medida): $\dot{m} = 5,57 \text{ kg/s}$;
- Pressão $P_3 = 6,3 \text{ bar} = 630000 \text{ Pa}$ (medida no circuito de descarga da instalação local).
- Intensidade de turbulência na entrada: 5%
- Velocidade zero (eletroválvula V3 fechada) no dreno vertical abaixo da peneira da câmara de injeção.
- Velocidade zero nas paredes sólidas.

Para as inúmeras opções de resultados gerados pela simulação (software *Fluent/Ansys*) nos tramos hidráulicos associados à câmara de injeção de artefatos de limpeza, criteriosamente foram selecionados alguns resultados mais relevantes capazes de (i) identificar especificidades do escoamento simulado e (ii) caracterizar melhorias reais identificadas no comportamento do escoamento estudado. A comparação dos resultados da simulação realizada em ambas as versões (original e modificada) das câmaras, permite avaliar os ganhos hidrodinâmicos que resultaram das modificações introduzidas no projeto construtivo de componentes críticos do equipamento inovador de limpeza *online* concebido.

5.3.1.2.

Volume de controle e malha computacional

A partir do projeto construtivo desenvolvido na plataforma computacional *SolidWorks*, aplicativos do software *Fluent/Ansys* viabilizam a extração do volume de controle da massa fluida a ser simulada. Já o software *Meshing* da interface do *Workbench* permite gerar a malha computacional, subdivida em reduzidos volumes finitos. Na sequência do processamento computacional, a ferramenta de CFD *Fluent/Ansys* permite a resolução das equações de conservação pelo método de volumes finitos. Dentre as diferentes opções de resultados oferecidos, o presente estudo concentrou-se na análise das linhas de corrente e dos campos de velocidade, pressão, intensidade de turbulência e o cálculo do Número de Reynolds turbulento

em cada célula computacional associada ao complexo escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza pelos tramos hidráulicos do *OnlineCleaner*.

As imagens da Figura 25 ilustram os volumes de controle e a malha computacional externa das versões original (2.974.474 células computacionais; *elements*) e modificada (4. 368.862 *elements*) da câmara de injeção.

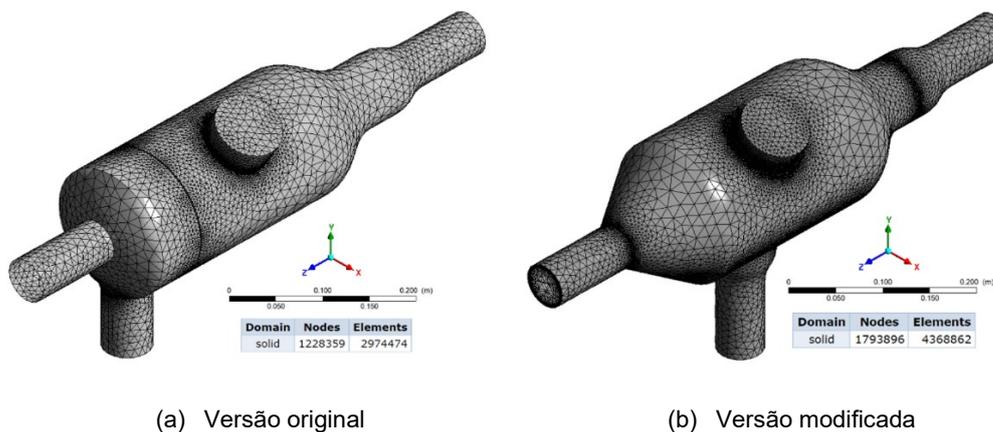
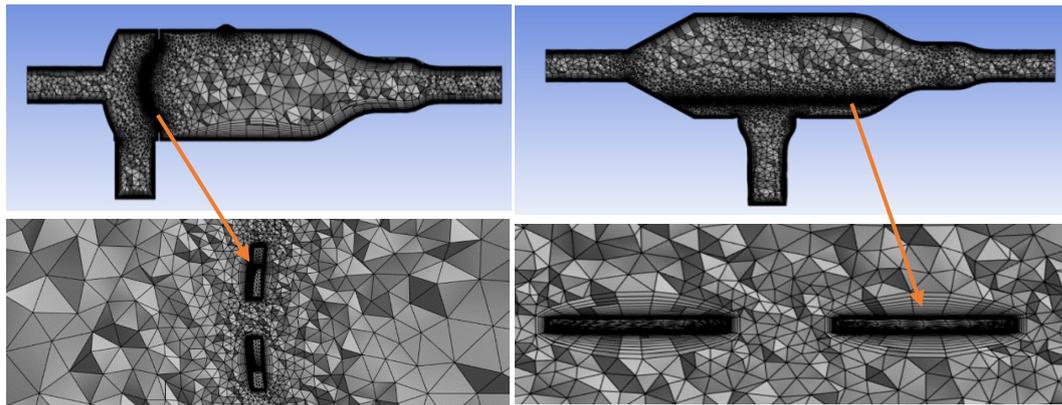


Figura 25 - Volume de controle e malha computacional da câmara de injeção

A Figura 26 apresenta as malhas computacionais utilizadas na simulação do escoamento do fluido de transporte nas duas versões da câmara de injeção. As imagens da esquerda mostram a malha gerada para a versão original da câmara, enquanto as da direita referem-se à malha da versão modificada. Observa-se um grande número de células computacionais (volumes finitos) e uma concentração ainda maior de células nas vizinhanças de elementos críticos, como a peneira e as conexões. Essa concentração de células, denominada "inflation", tem como objetivo atribuir maior resolução no processamento computacional.

O Projeto construtivo de ambas as versões da câmara de injeção encontra-se apresentado no Apêndice A. Já o Apêndice B descreve os procedimentos relacionados aos testes de malha visando identificar a dimensão e características adequadas da malha computacional.



(a) Versão original

(b) Versão modificada

Figura 26 - Malha da simulação do escoamento na câmara de injeção.

5.3.1.3.

Resultados da simulação do escoamento na câmara de injeção

Os resultados selecionados incluem a simulação do módulo do vetor velocidade V^{\rightarrow} e de seus componentes tridimensionais (w , v e u), as linhas de corrente (streamlines) do escoamento, o campo de pressão e estruturas típicas do escoamento turbulento (Número de Reynolds turbulento e intensidade de turbulência), simulados e visualizados em diferentes planos e seções de interesse do escoamento. Em outras palavras, no plano YZ é possível visualizar os componentes w e v da velocidade do escoamento; no plano perpendicular ZX , os componentes w e u . Já no plano XY (transversal ao escoamento), os componentes u e v são facilmente visualizados. A título de ilustração são, também, apresentados alguns resultados do módulo do vetor velocidade, mostrando a câmara em perspectiva, cortando a câmara por um plano central de interesse para a visualização dos resultados da simulação.

5.3.1.3.1.

Campo de velocidade

Compatível com as coordenadas tridimensionais referenciadas, as imagens da Figura 27 ilustram resultados da simulação do campo de velocidades do fluido de transporte dos artefatos de limpeza na câmara de injeção. Dependendo da vista selecionada, será possível observar detalhes do projeto construtivo da câmara, a exemplo da escotilha (na parte superior) para introdução dos artefatos de limpeza; dos tramos horizontais de entrada e de saída e do dreno vertical, todos em tubo de

aço inox (2" de diâmetro interno), incluindo, em destaque, a peneira que permite o descarte da incrustação removida, sem, entretanto, permitir a fuga dos artefatos de limpeza. De acordo com o sistema de coordenadas escolhido, o escoamento principal (da esquerda para a direita na figura) ocorre no sentido contrário ao do eixo Z.

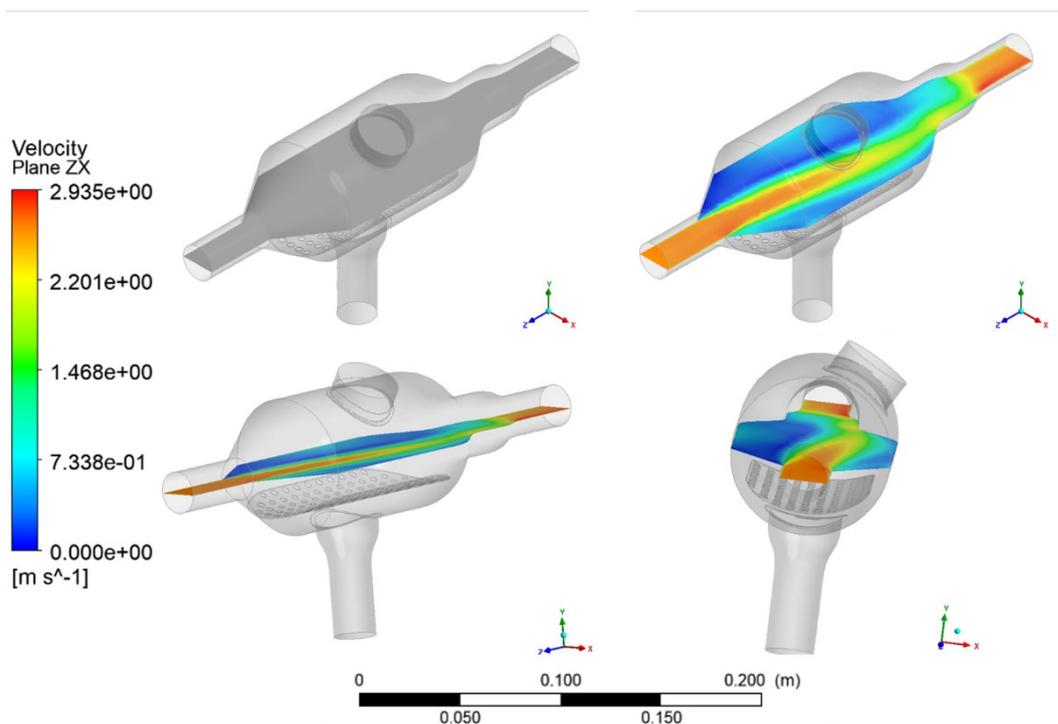


Figura 27 - Imagens 3D da simulação de velocidade na câmara modificada

Complementando esta seção de abertura de ilustração da simulação, a Figura 28 caracteriza a imagem hachurada, no plano YX selecionado, que é um plano perpendicular à direção principal Z do escoamento, passando pelo eixo do tramo de dreno.

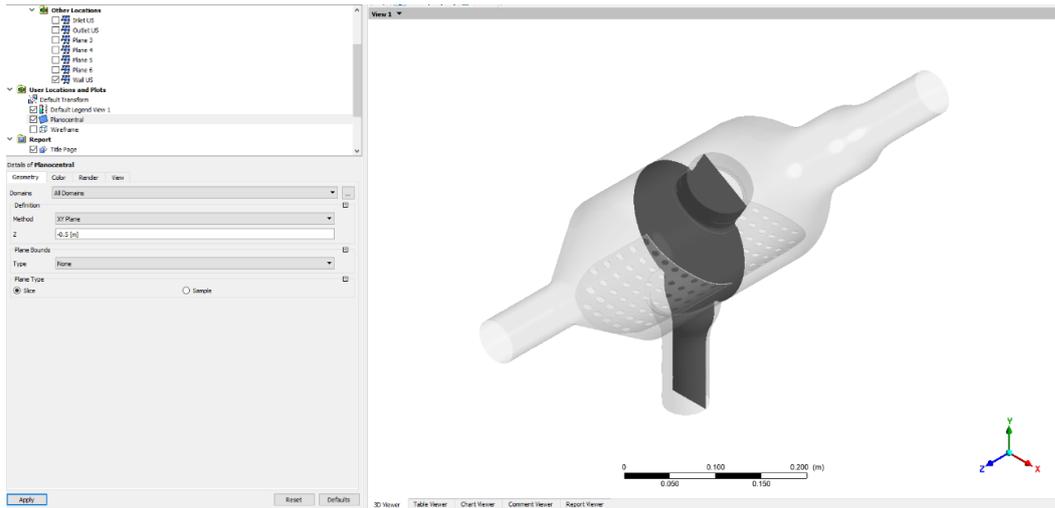
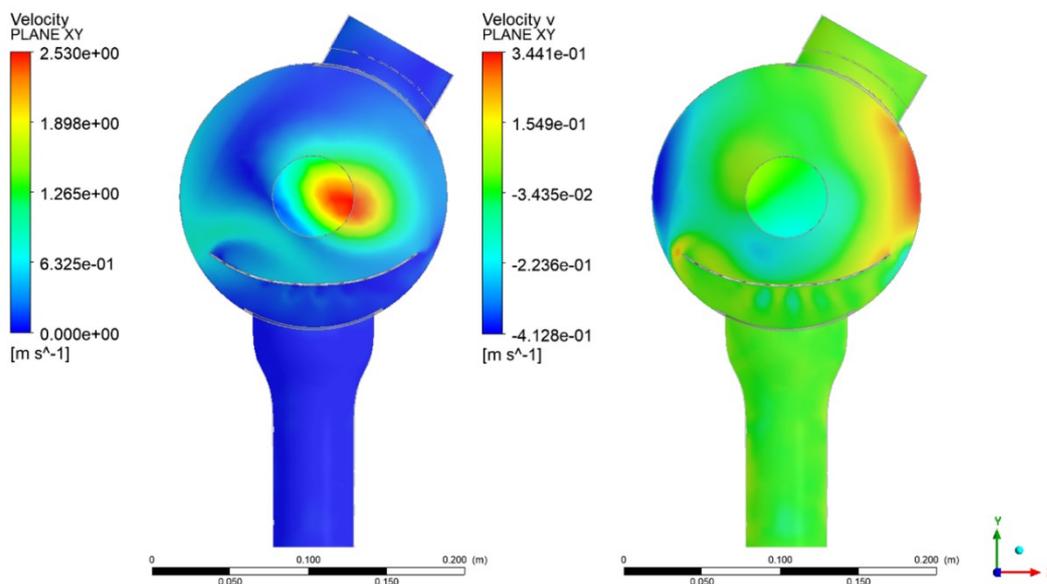


Figura 28 - Plano para orientar a simulação na seção central da câmera

Associado ao plano XY acima caracterizado, a Figura 29 resume os resultados da simulação do módulo do vetor velocidade \vec{V} , e do componente v da velocidade na direção do eixo Y, permitindo uma visão frontal do escoamento, mostrando detalhes do escoamento vertical (na direção Y) do escoamento através dos furos da peneira.



(a) magnitude da velocidade

(b) componente v da velocidade (eixo Y)

Figura 29 - Velocidade no plano XY (versão modificada da câmara de injeção)

A análise desses resultados gráficos das complexas equações que regem o escoamento (definidas no capítulo anterior), permite destacar aspectos relevantes para orientar o projeto construtivo da câmara. Na imagem da esquerda (Fig. 29a), a

simulação da magnitude da velocidade \vec{V} , mostrada em escala ampliada, evidencia que:

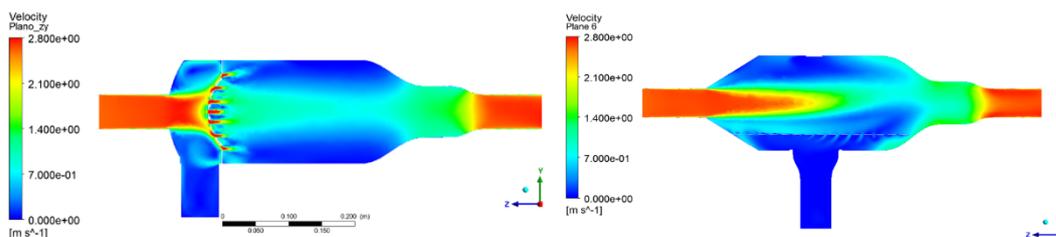
- o escoamento do tipo jato que se forma a partir da entrada do fluxo do fluido de transporte dos artefatos no interior da câmara de injeção, incontestavelmente, sofreu um desvio de seu eixo, conforme já destacado na análise de resultados anteriormente discutidos;
- as assimetrias de geometria introduzidas pelas cavidades impostas pelos espaços internos da escotilha de acesso dos artefatos, do tramo de dreno e pela presença da peneira, não perfeitamente simétricos, podem ser responsabilizadas pelo desvio do eixo do escoamento em jato;
- os gradientes ilustrados em tons de verde e azul são evidências de suaves zonas de recirculação.
- típico da estrutura de escoamentos do tipo jatos, o vetor velocidade possui o seu valor máximo no centro (cor vermelha), decaindo, radialmente, com valor tendendo a zero (cor azul) quando se afasta do eixo do jato;

Contribuindo para a análise, na imagem da direita (Fig. 29b), a simulação do componente v da velocidade (na direção do eixo Y) evidencia:

- que o escoamento é de fato 3D, já que gradientes do componente v da velocidade na direção vertical se fazem presentes, conforme evidenciado pela distribuição de cores que variam do azul escuro (velocidades negativas, na direção contrária ao sentido positivo do eixo Y) ao vermelho (velocidades positivas, na direção positiva no sentido do eixo Y);
- detalhes de permeação de fluido pelos furos da peneira, não obstante o tramo de dreno estar fechado pela condição de contorno imposta e
- recirculação incontestável do escoamento próximo à parede interna da câmara, fluindo no sentido positivo na região à direita da Fig. 32b (na cor vermelha) e no sentido oposto na região oposta (explicitado em tons de azul).

Numa etapa subsequente da simulação realizada, as imagens da Figura 30 apresentam os resultados da simulação do módulo $|\vec{V}|$ do vetor velocidade do fluido de transporte dos artefatos de limpeza, nas versões original (Fig. 30a) e modificada (Fig. 30b) da câmara de injeção. Apesar de o escoamento principal se desenvolver no sentido contrário ao eixo Z , o valor da magnitude mostrada aparece positiva já que este resultado se refere ao módulo do vetor velocidade.

Para todas as situações estudadas do escoamento, o valor da grandeza física é definido pelo código de cores mostrado (velocidade zero na cor azul escuro, aumentando para diferentes matizes de cor).



(a) versão original da câmara de injeção (b) versão modificada da câmara de injeção

Figura 30 - Resultados da simulação do módulo do vetor velocidade

Os resultados da simulação realizada em ambas as versões da câmara de injeção nitidamente revelam que:

- a presença da peneira vertical, originalmente instalada na entrada da câmara, causa perdas de pressão pelo impacto do escoamento na superfície da peneira, criando zonas de pressão de saturação (velocidade zero) e perdas de carga localizadas, que impactam nos custos de bombeamento;
- a presença da peneira vertical também compromete fortemente a formação do jato no interior da câmara, jato esse desejável para captar e impulsionar os artefatos de limpeza introduzidos no interior da câmara, que precisam ser transportados pelo fluido do escoamento para o interior dos tubos do trocador, para que o *OnlineCleaner* consiga realizar o desejado processo de limpeza *online*. Contrastando com a versão original da câmara de injeção equipada com peneira vertical (Fig. 30a), na versão modificada (Fig. 30b), a peneira é horizontal, não obstruindo o escoamento, que se desenvolve na entrada da câmara segundo uma estrutura bem definida na forma de jato livre, assim facilitando a captura dos artefatos de limpeza (não mostrados na Figura 30);
- a posição modificada do duto vertical de dreno também elimina zonas de recirculação na entrada da câmara, tornando o processo de injeção mais eficaz.
- coerentemente com o esperado, para ambas as versões da câmara, a velocidade no tramo vertical de dreno é zero (condição de contorno) já que este foi fechado na simulação, gerando, portanto, uma zona de pressão máxima (pressão de saturação), conforme será confirmado pela simulação do campo de pressão na seção subsequente.

A imagem da Figura 31 apresenta uma imagem ampliada dos resultados da mesma simulação mostrada na imagem da Fig. 31b, porém mostrando, mais nitidamente, nuances da solução gráfica das equações que regem o escoamento; (ii) detalhes da peneira horizontal (que substituiu com vantagens a peneira vertical) e (iii) a escotilha de acesso à câmara de injeção para introdução dos artefatos de limpeza. Esta imagem mostra, também, que a despeito de o tramo vertical de dreno estar fechado, existe sim um pequeno escoamento pelos furos da peneira.

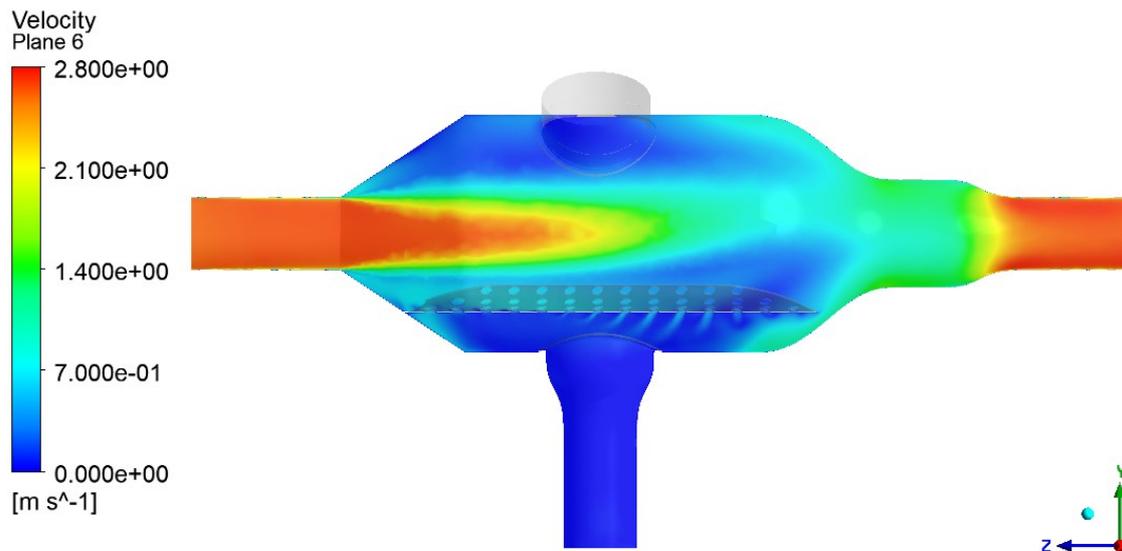
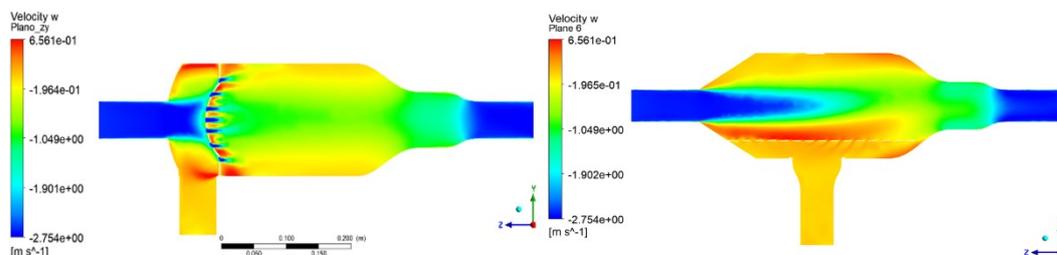


Figura 31 - Simulação do vetor velocidade na câmara de injeção modificada

Conforme mostrado, o escoamento é essencialmente horizontal (na direção contrária ao eixo Z), o que, entretanto, não significa que não existam componentes v e u da velocidade nas respectivas direções perpendiculares Y e X já que o escoamento é tridimensional. O módulo do vetor velocidade \vec{V} é calculado com base nos seus três componentes mutuamente ortogonais (u , v e w), expresso pela equação (5.17):

$$|\vec{V}| = \sqrt{w^2 + v^2 + u^2} \quad (5.17)$$

As figuras, a seguir, ilustram resultados da simulação desses três componentes do vetor velocidade do fluido. Na sequência, as imagens da Figura 32 apresentam resultados da simulação do componente w do vetor velocidade do escoamento, que é o componente na direção do eixo Z , porém no seu sentido contrário, para o sistema de coordenadas escolhido.



(a) versão original da câmara de injeção

(b) versão modificada da câmara de injeção

Figura 32 - Componente w da velocidade no plano ZY

Oportuno observar que a escala de cores selecionada para exibir os resultados da simulação da Figura 31 é mais ampla do que a escala de cores da Figura 32. Ou seja, enquanto na Figura 31 a escala de cor possui um máximo em 2,800 m/s e na Figura 32 o máximo é de apenas 0,6561 m/s, ambos são representados no mesmo tom da cor vermelha. Compatível com a escala de cor automaticamente definida pelo software, na imagem da Figura 31, o valor máximo do módulo do vetor velocidade simulada (na seção de entrada) permanece o mesmo, *i.e.*, $|\vec{V}| = 2,800 \text{ m/s}$ (positivo pois o gráfico representa o módulo do vetor velocidade). Já na Figura 32, que representa o componente w do vetor velocidade, este aparece com o valor $w = -2,800 \text{ m/s}$ (negativo, pois contrário ao eixo Z), porém expresso na cor azul para esta nova versão da escala de cor definida.

Pelo tom do azul expresso na escala de cor mostrada nas imagens a e b da Figuras 32, no tubo da seção de entrada das versões original e modificada da câmara de injeção, pode-se estimar que o componente médio da velocidade w é da ordem de 2,76 m/s, valor esse que reproduz com excelente exatidão o valor da velocidade ($w = 2.76 \text{ m/s}$) calculada a partir do valor da vazão medida ($\dot{m} = \rho \cdot w \cdot A = 5,57 \text{ kg/s}$), utilizada como dado de entrada da simulação, lembrando que a densidade $\rho = 997,5 \text{ kg/m}^3$; $A = 0,002027 \text{ m}^2$, para um tubo de 2" de diâmetro interno. Esta, e outras evidências associadas aos demais componentes do vetor velocidade, constituem-se, certamente, em excelentes evidências da confiabilidade do software *Fluent/Ansys* para simular o campo de velocidade.

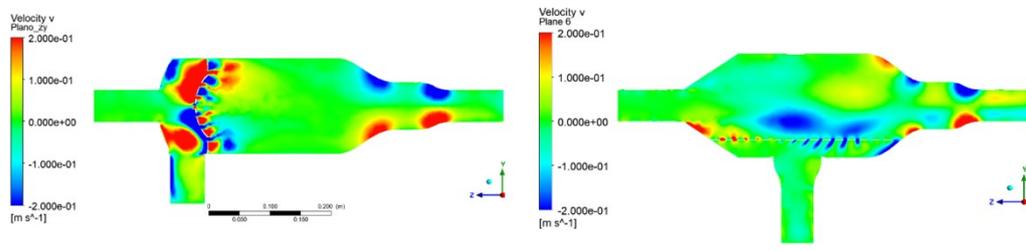
A razão de a Figura 32 estar sendo apresentada numa escala de cor reduzida, em relação ao que foi mostrado na Figura 31, cumpriu o propósito de permitir a captação de fenômenos associados ao escoamento em velocidades mais baixas.

Conforme mostrado, observa-se que:

- os resultados confirmam que a estrutura de jato permanece bem estruturada na entrada da versão modificada da câmara;
- nesse domínio de velocidades mais baixas, consegue-se visualizar algumas estruturas de interesse não mostradas no resultado correspondente expresso em escala ampliada, notadamente zonas de recirculação no entorno da peneira, a exemplo da mancha vermelha acima desta, caracterizando fluxo no sentido contrário ao escoamento (no sentido do eixo Z).

Na sequência das rodadas de simulação do campo de velocidade, as imagens da Figura 33 documentam o componente vertical (v) da velocidade do escoamento (na

direção Y) para ambos os casos estudados, nas versões original e modificada da câmara de injeção. Em se tratando do componente vertical da velocidade, esses resultados fornecem informação de interesse para mostrar o escoamento vertical através dos furos da peneira horizontal.



(a) versão original da câmara de injeção (b) versão modificada da câmara de injeção
 Figura 33 - Componente v da velocidade no plano ZY

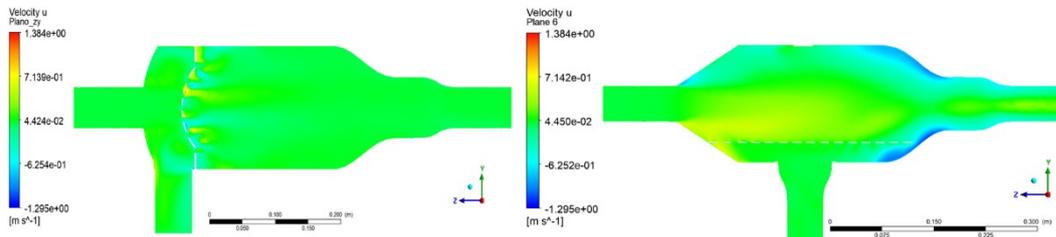
Referindo-se ao sistema de coordenadas utilizado, nas imagens acima:

- não se deve estranhar a predominância da cor verde (velocidade nula) no tramo de entrada da câmara, já que o componente da velocidade aqui reportada é o componente v, que denota o componente vertical do vetor velocidade. Por tratar-se do componente v da velocidade, era de se esperar a cor verde no bocal de entrada da câmara, confirmando que, no tramo de entrada, $v = 0$, já que o escoamento é preferencialmente no sentido -Z;
- interessante também observar que, embora o tramo de dreno tenha sido fechado nesta simulação, as zonas de recirculação do escoamento do interior da câmara evidenciam zonas muito suaves de recirculação (gradientes do tom verde) no interior do tubo de dreno;
- os valores negativos de v denotam um fluxo vertical, de cima para baixo (ênfatisados na cor azul, na parte central e à direita da peneira), enquanto valores positivos de v denotam um fluxo de baixo para cima (ilustrados nas cores amarela e vermelha, ocorrendo na parte esquerda da peneira),
- na vizinhança da peneira horizontal, incontestavelmente identifica-se uma zona bem definida de recirculação no seu entorno (ênfatisada na cor azul), a despeito de o dreno de descarga vertical ter sido fechado.

Para que a magnitude desse componente v pudesse se manifestar de forma mais contundente, fez-se necessário alterar no *setup* da tela de controle do software os valores extremos da velocidade, neste caso variando entre os valores -0,2 m/s (na cor azul escuro) e +0,2 m/s (em vermelho).

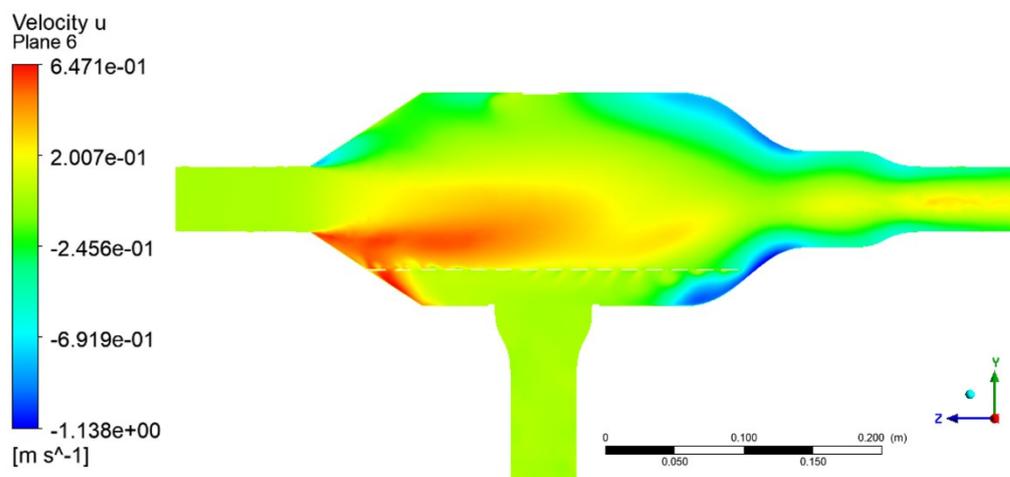
Associada à mesma simulação do campo de velocidade, as imagens a e b da Figura 34 mostram o componente (u) da velocidade do escoamento (na direção X), portanto transversal à direção principal do escoamento na câmara, cujos resultados

são apresentados para ambas as versões (original e modificada) da câmara de injeção. Conforme evidenciado no resultado-gráfico correspondente, prevalece o tom verde ($u \approx 0$).



(a) Componente u da velocidade (câmara original). Escala *default* do software

(b) Componente u da velocidade (câmara de Injeção modificada). Escala compacta



(c) Detalhes do componente u da velocidade (câmara de Injeção modificada)

Figura 34 - Componente u da velocidade no plano ZY

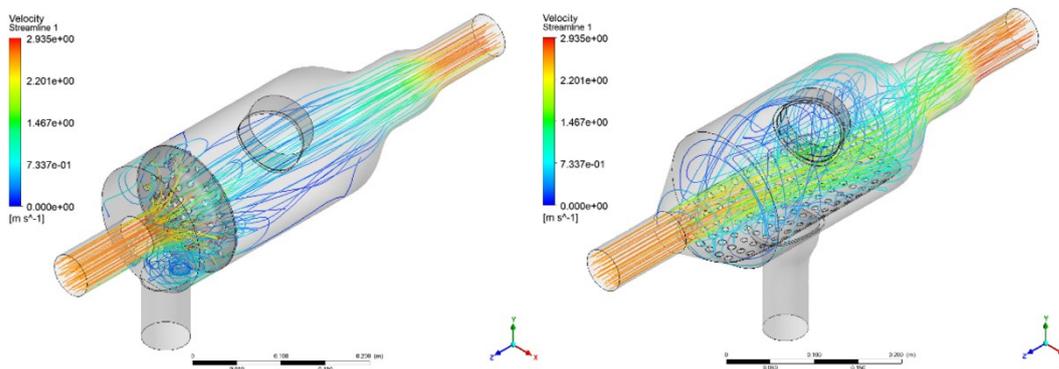
Considerando que este componente u da velocidade transversal é praticamente nulo optou-se por repetir o resultado da simulação mostrado na Fig. 34, porém em uma escala mais ampliada, para destacar que, embora em pequena intensidade, observa-se a presença deste componente induzindo pequenas zonas de recirculação. Quando a escala é compactada, consegue-se visualizar estruturas em baixas velocidades, a exemplo do que é mostrado na imagem da direita (Fig. 34c), associada à versão modificada da câmara de injeção.

A observação dessas imagens do componente u da velocidade (escoamento na direção X, transversal à direção do escoamento principal) apenas confirma que:

- de fato, o escoamento é tridimensional no interior da câmara; já que os gradientes de cor no interior da câmara são evidências de pequenas zonas de recirculação que, inevitavelmente, ocorrem no seu interior;
- conforme esperado, $u = 0$ praticamente em todo o interior do volume de controle (predominância da cor verde), a despeito de pequenos gradientes de cor que denotam zonas de recirculação dado ao caráter essencialmente tridimensional do escoamento no interior da câmara, notadamente na proximidade da peneira horizontal.

Outro resultado de interesse deste estudo que faz uso da simulação do escoamento para orientar a otimização dos tramos hidráulicos do dispositivo de limpeza *online* de trocadores de calor é o que detalha a geometria das **linhas de corrente** (*streamlines*). No contexto da dinâmica dos fluidos, uma linha de corrente denota a linha imaginária em um fluido tal que a tangente em qualquer ponto indica a direção da velocidade de uma partícula do fluido naquele ponto. Nesse contexto, “navegar sobre uma linha de corrente” significa se mover da maneira mais eficaz e rápida possível através do escoamento de um líquido ou gás (no presente caso, no escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza). Sob esta perspectiva, as linhas de corrente assumem uma relevância especial pelo fato de os artefatos de limpeza (esferas esponjosas) terem sido intencionalmente construídos com material de densidade próxima à do seu fluido de transporte (no caso água). Assim sendo, é razoável considerar que, individualmente, cada artefato de limpeza seguirá exatamente a trajetória da sua respectiva linha de corrente; *i.e.*, da linha de corrente que passa pela posição onde o artefato foi depositado dentro da câmara de injeção, sobre a peneira horizontal.

As imagens do painel da Figura 35 ilustram, para o escoamento associado a cada uma das versões (original e modificada da câmara de injeção), imagens capturadas, em tempos subsequentes, de um vídeo gerado pelo software *Fluent/Ansys*, que gera as linhas de corrente em movimento no domínio do tempo.

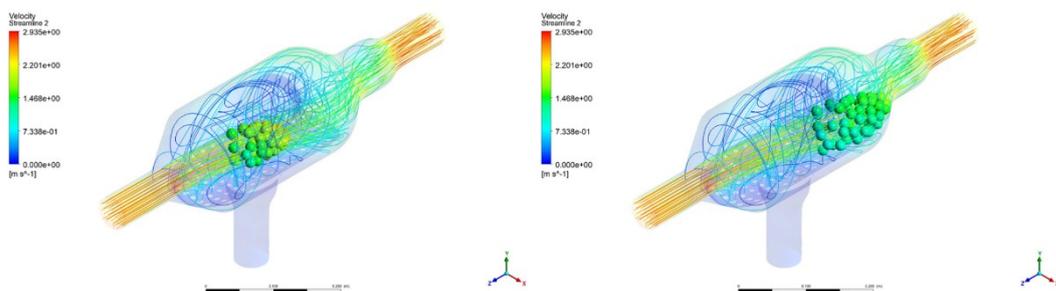


(a) versão original da câmara de injeção (b) versão modificada da câmara de injeção

Figura 35 - Simulação das linhas de corrente do escoamento

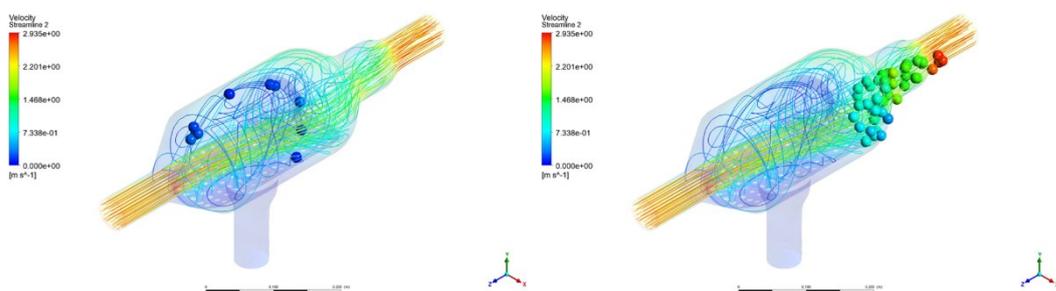
Conforme evidenciado pelos resultados da simulação realizada, em ambas as versões das câmaras de injeção (local onde os artefatos de limpeza são introduzidos no *OnlineCleaner*), o escoamento é significativamente mais bem comportado na versão modificada da câmara de injeção. Conforme evidenciado pelas linhas de corrente simuladas na versão original desta câmara, a peneira vertical compromete de forma drástica a estrutura do jato na entrada da câmara, jato esse responsável pela captura dos artefatos (esferas esponjosas) no início de um ciclo de limpeza *online* dos tubos do trocador de calor a ser acoplado ao equipamento de limpeza.

Considerando, assim, apenas a versão modificada desta câmara de injeção, após a substituição da desastrosa peneira vertical por outra, horizontal, bem como a melhoria do projeto construtivo do tramo vertical de dreno, as imagens da Fig. 36 ilustram imagens capturadas em tempos sucessivos do processo de injeção dos artefatos de limpeza originalmente introduzidos na câmara de injeção. A título de ilustração apresentam-se 50 linhas de corrente do escoamento que se desenvolve no interior da versão modificada da câmara de injeção, tal qual instalada no equipamento inovador de limpeza *online* concebido. Como os artefatos possuem a mesma densidade do fluido de transporte objeto da simulação do escoamento estudado, elas caracterizam, também, a trajetória dos artefatos de limpeza.



(a) Artefatos de limpeza originalmente introduzidos na câmara de injeção

(b) Artefatos de limpeza em processo de injeção



(c) Artefatos de limpeza em recirculação na câmara de injeção.

(d) Artefatos de limpeza na fase final do processo de injeção no trocador.

Figura 36 - Imagens capturadas da trajetória dos artefatos de limpeza

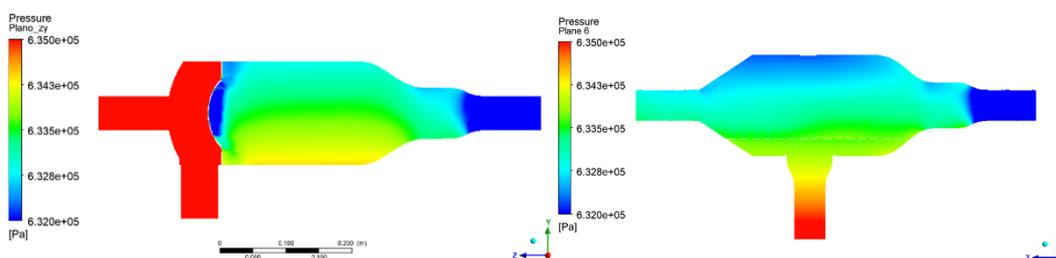
Se por um lado, em um ciclo ideal de limpeza, deseja-se minimizar zonas de recirculação para assegurar um transporte eficaz dos artefatos da câmara de injeção para os tubos do trocador submetido ao processo de limpeza *online*, por outro, um certo nível de recirculação no interior da câmara de injeção é altamente desejado. Essa recirculação é desejada exatamente no interior da câmara de recuperação, na fase final de cada ciclo de limpeza *online*, quando os artefatos já impregnados com a incrustação removida dos tubos do trocador, são recuperados temporariamente na câmara de recuperação. O turbilhonamento dos artefatos de limpeza dentro da câmara de recuperação (logo após terem passado pelos tubos do trocador de calor) é o que permite remover de suas superfícies esponjosas a incrustação removida dos tubos. Completando o ciclo de limpeza, os artefatos são então transpostos da câmara de recuperação de volta à câmara de injeção para serem reutilizados no ciclo subsequente de limpeza *online*.

Similarmente ao que ocorreu na câmara de recuperação, uma nova roda de turbilhonamento dos artefatos é desejável na câmara de injeção, completando a

lavagem dos artefatos. No curso dessas duas etapas de recuperação dos artefatos de limpeza, primeiro na câmara de recuperação, e posteriormente, na câmara de injeção, esses “processos de agitação dos artefatos” no interior das câmaras permitem desprender a incrustação da superfície dos artefatos, descartá-la pelos furos da peneira horizontal e pelo dreno vertical, enquanto a peneira retém os artefatos já limpos para serem programados o ciclo de limpeza subsequente. Relevante aqui lembrar que o tempo de agitação (parte do tempo do ciclo) de limpeza) é programável no sistema de automação do *OnlineCleaner*, por meio dos tempos de acionamento das eletroválvulas instaladas em posições críticas dos tramos hidráulicos do *OnlineCleaner*.

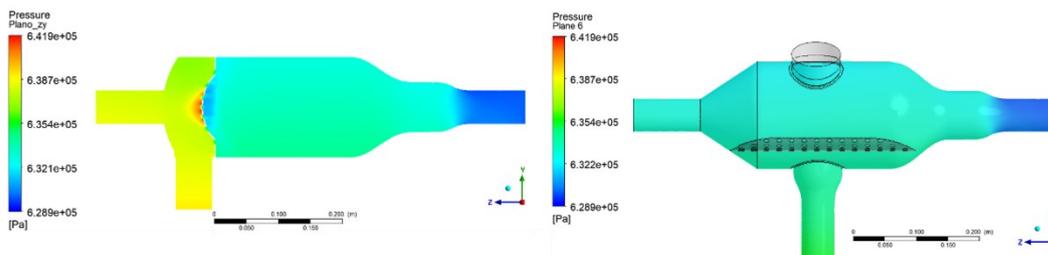
5.3.1.3.2. Campo de pressão

Na sequência da simulação realizada no escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza nas versões original e modificada da câmara de injeção, as imagens da Figura 37 ilustram resultados da simulação do campo de pressão (grandeza escalar). Enquanto as imagens a e c da Fig. 37 referem-se a resultados da simulação do escoamento na versão original da câmara de injeção, as imagens b e d referem-se a resultados na versão modificada desta câmara.



(a) Campo de pressão (versão original da câmara de injeção). Escala default.

(b) Campo de pressão (versão modificada da câmara de injeção). Escala ajustada.



(c) Campo de pressão (versão original da câmara de injeção). Escala ajustada.

(d) Campo de pressão (versão modificada da câmara de injeção). Escala modificada.

Figura 37 - Resultados da simulação do campo de pressão do escoamento

A partir das condições de contorno previamente definidas para orientar a simulação do escoamento na câmara ($\dot{m} = 5,57 \text{ kg/s}$ e $P_{saída (outlet)} = 6,3 \text{ bar} = 630000 \text{ Pa}$), o software *Fluent/Ansys* também calcula o valor da pressão de entrada (*inlet*) entre as seções de entrada e de saída dos volumes de controle estudados (*i.e.*, versões original e modificada da câmara de injeção). As imagens da Figura 38, captadas da tela de resultados gerados, documentam os respectivos valores numéricos da pressão na entrada (valor calculado), e na saída (dado de entrada) associado ao escoamento na câmara de injeção.

Area-Weighted Average Static Pressure [Pa]	Area-Weighted Average Static Pressure [Pa]
-----	-----
inlet 638283.03	inlet 633133.35
Area-Weighted Average Static Pressure [Pa]	Area-Weighted Average Static Pressure [Pa]
-----	-----
outlet 630000	outlet 630000

(a) Pressão de entrada (*inlet*) calculada na versão original da câmara de injeção.

(b) Pressão de entrada calculada na versão modificada da câmara de injeção.

Figura 38 - Resultados da pressão simulada na câmara de injeção

A Tabela 3 resume os resultados calculados da pressão nas seções de entrada (P_{ent}), de saída ($P_{saída}$), a diferença entre elas (ΔP), bem com diferenças percentuais de interesse para a análise.

Tabela 3 - Ganhos de perda de carga resultante da mudança da peneira

Versão Original da Câmara de Injeção				Versão Modificada da Câmara de Injeção			
Pent	Psaida	Delta P	Percentual	Pent	Psaida	Delta P	Percentual
(Pa)	(Pa)	(Pa)	(%)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(%)
638.283,03	630.000,00	8.283,03	1,30%	633.133,35	630.000,00	3.133,35	0,49%
		0,81%				62,2%	

A análise dos resultados da simulação dos respectivos campos de pressão acima mostrados confirma a coerência dos dados e remete às seguintes considerações:

- o escoamento se desenvolve no sentido contrário ao gradiente de pressão; ou seja, $P_{entrada}$ (na cor verde) $>$ $P_{saída}$ (na cor azul), fazendo-se referência à escala de cor definida à esquerda do gráfico;
- conforme mostrado, a substituição da peneira vertical (versão original da câmara) para a peneira horizontal (versão modificada) resultou em uma redução de 5149,68 Pa na perda de carga, o que se traduz em uma redução da resistência mecânica ao escoamento de 62,2%. Em outras palavras, as modificações associadas à troca de posição da peneira, e o deslocamento do tramo vertical de dreno para a parte central da câmara de injeção, contribuíram de forma expressiva para a melhoria do seu projeto construtivo suavizando, inclusive, a hidrodinâmica do escoamento no seu interior. Essas melhorias reduziram, também, as zonas de recirculação que comprometem a eficácia do processo de injeção dos artefatos de limpeza;
- na saída de dreno vertical (que foi fechado como condição de contorno), a pressão é máxima (na cor vermelha), caracterizando a pressão de saturação na face de fechamento do dreno vertical;
- no interior da câmara de injeção, observa-se um suave aumento de pressão na direção contrária ao eixo Y (efeito da pressão hidrostática), valor que decresce de diversos tons de verde para amarelo e finalmente vermelho (valor de pressão máxima).

5.3.1.3.3.

Regime turbulento do escoamento e intensidade de turbulência

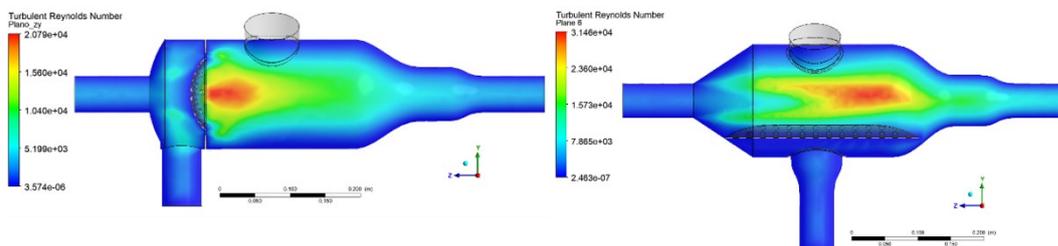
Esta seção se inicia com a caracterização do regime do escoamento simulado, hidrodinamicamente representado pelo parâmetro adimensional denominado Número de Reynolds Turbulento, que é uma das funções calculadas localmente pelo software *Fluent/Ansys*. Fisicamente, o Número de Reynolds é interpretado pela razão entre as forças inerciais (ρv) e forças viscosas (μ/L) que

atuam em um elemento de fluido em que o fluxo laminar é caracterizado pelo domínio das forças de natureza viscosa e o regime turbulento pelo predomínio de forças inerciais. Já o Número de Reynolds Turbulento é calculado com base nas flutuações da velocidade, mais precisamente pela Equação (6.1).

$$Re_{turbulent} = \frac{\rho d \sqrt{k}}{\mu} \quad (6.1)$$

Nesta expressão, para o caso da água, $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ é a densidade; $k \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ é a energia cinética turbulenta (associada ao valor RMS da intensidade da flutuação da velocidade); $d \text{ (m)}$, é a distância mínima do volume de controle à parede; $\mu = 0,891 \text{ centipoise}$, a viscosidade da água a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e $\nu = \mu/\rho = 0,893 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, a viscosidade cinemática. Esse parâmetro adimensional é apresentado para o escoamento em ambas as versões (original e modificada) da câmara de injeção.

As imagens da Figura 39 apresentam resultados da simulação CFD deste fator adimensional (*Turbulent Reynolds Number*):



(a) Número de Reynolds Turbulento (escoamento no interior da versão original da câmara de injeção)

(b) Número de Reynolds Turbulento (escoamento no interior da versão modificada da câmara de injeção)

Figura 39 - Resultados da simulação do *Número de Reynolds Turbulento*

Esses resultados da simulação na escala *default* do software (expressa os valores máximos observáveis) definem, localmente, detalhes do regime do escoamento, permitindo enfatizar:

- para ambas as versões da câmara, baixos níveis (cor azul forte) de turbulência no tubo de entrada e
- zonas de turbulência nas zonas posterior à peneira vertical (versão original) e acima da peneira vertical (versão modificada), que caracterizam regiões de maior recirculação.

O estudo incluiu, também, a análise da intensidade de turbulência, calculada com base nos valores das respectivas flutuações de velocidade, associada com a energia cinética turbulenta, adimensionalizada no valor instantâneo da velocidade local, calculada pela expressão:

$$(\overline{q'^2})^{1/2} = [\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}]^{1/2} \quad (6.2)$$

Completando a apresentação da série de resultados da simulação realizada no escoamento da câmara de injeção, as imagens a e c da Figura 40 apresentam, respectivamente, resultados da simulação da intensidade de turbulência na versão original da câmara, enquanto as imagens b e d representam resultados similares na versão modificada da câmara. Para todos os resultados apresentados, a simulação foi realizada com base no modelo de turbulência $k-\omega$, SST (Transporte de tensão de cisalhamento).

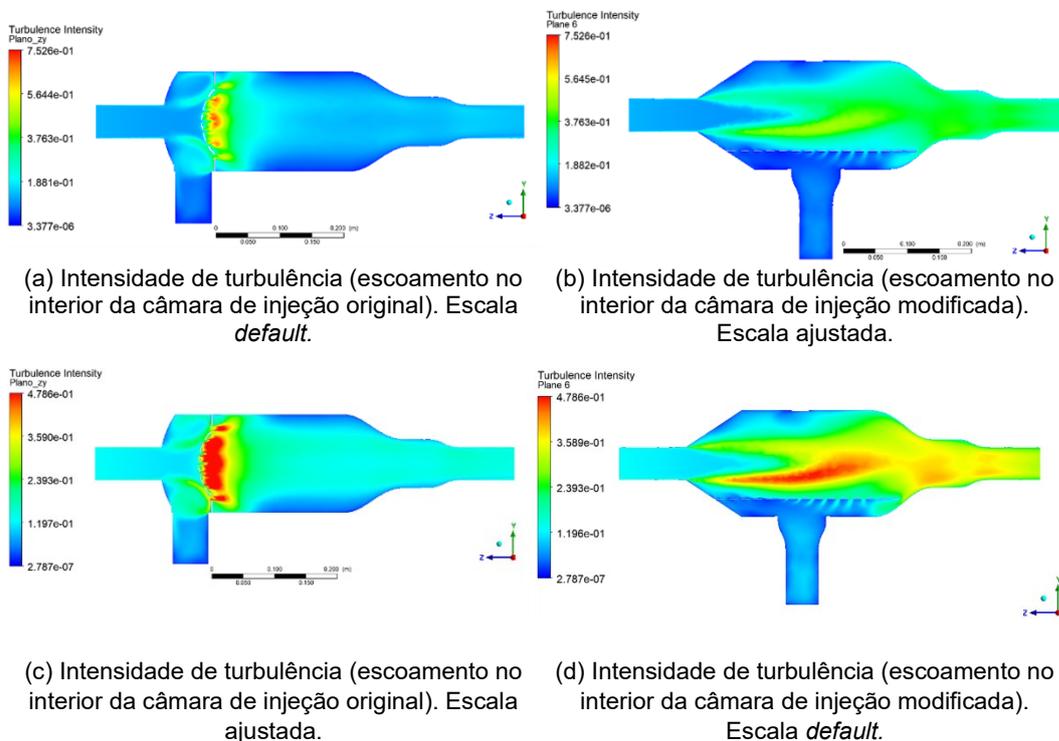


Figura 40 - Resultado da simulação da intensidade de turbulência

Os resultados da intensidade de turbulência e do *Turbulent Reynolds Number* evidenciam que:

- conforme evidenciado, a intensidade de turbulência é nitidamente maior na esteira do jato formado no interior da câmara, decrescendo à medida que se afasta da esteira do jato (observar os gradientes de cor tendendo ao azul escuro na região mais afastada do jato).
- a presença da peneira (chapa perfurada com rugosidade maior que a parede da câmara), posicionada horizontalmente na parte inferior do interior da câmara de injeção, de fato gera um deslocamento do jato;
- no que concerne à passagem de fluido pelos furos da peneira (a despeito de o tubo de dreno estar fechado como condição de contorno desta simulação), é interessante observar o escoamento na forma de “pequenos jatos” na cor verde claro (baixa turbulência), da escala de cores selecionada;
- no caso da câmara com peneira vertical, o *Turbulent Reynolds Number* se manifesta de forma mais extensa (na cor vermelha) na esteira da peneira, caracterizando a turbulência do jato parcialmente bloqueado por ela, enquanto na versão modificada da câmara de injeção (imagem da direita), este adimensional característico da turbulência concentra-se na porção superior da câmara;
- na busca de tentar relacionar algumas estruturas reveladas pela simulação realizada na vizinhança da peneira horizontal da câmara de injeção com outros fenômenos bem documentados na literatura, entende-se que o fato de o componente w do escoamento ser nulo nos furos da peneira horizontal e atingir um valor não-nulo nas suas proximidades impacta os componentes v e u (Figuras 31 e 34, respectivamente), identificado como “instabilidade de Kelvin-Helmholtz” (e.g., KOSYAKOV *et al.*, 2019; DONG *et al.*, 2023).

A partir dos resultados do estudo do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza na câmara de injeção (que orientou a introdução de modificações radicais no seu projeto construtivo), a câmara de recuperação também foi aprimorada, cuja versão final do projeto ficou muito similar ao da câmara de injeção. Não obstante o escoamento nas versões original e modificada da câmara de recuperação também terem sido realizadas, esses resultados e análise foram omitidos em benefício da objetividade.

5.3.2.

Simulação do escoamento integrado em ambas as câmaras

Complementando o estudo, uma terceira rodada de simulação foi realizada, desta vez associada ao circuito hidráulico envolvendo ambas as câmaras de injeção e de recuperação dos artefatos de limpeza, porém no sentido inverso ao do escoamento de injeção, já que associado ao escoamento de recuperação dos artefatos (escoamento originado na câmara de recuperação, com destino à câmara

de injeção). Esta terceira rodada de simulação cumpriu, portanto, dois propósitos: estudar o tramo hidráulico completo que integra as duas câmaras do *OnlineCleaner* e avaliar o tramo hidráulico de descarte das incrustações removidas em cada ciclo de limpeza. A realização desta última simulação no circuito hidráulico de recuperação dos artefatos (que ocorre após cada ciclo de limpeza) requereu o fechamento da entrada da câmara de injeção (alimentada pelo tramo de recalque da bomba hidráulica) e a abertura da sua saída vertical do dreno de descarte das incrustações. Importante aqui observar que ambas as câmaras (de injeção e de recuperação) de artefatos de limpeza estão equipadas com peneiras horizontais que, embora permitam o descarte da incrustação removida pelo tramo de dreno vertical, mantêm, no seu interior, os artefatos de limpeza que serão reutilizados em ciclos subsequentes de limpeza *online*.

5.3.2.1.

Dados de entrada e condições de contorno

A Figura 23 do capítulo anterior apresentou um desenho esquemático do equipamento de limpeza acoplado ao trocador de calor submetido ao processo de limpeza *online*, porém operando no seu ciclo de recuperação de artefatos de limpeza. Enfatizado na cor marrom para caracterizar a água contaminada pela incrustação removida dos tubos do trocador logo após um determinado ciclo de limpeza, esta operação ocorre, de forma automatizada, permitindo trazer de volta à câmara de injeção os artefatos (ainda impregnados da incrustação recém removida).

No curso deste processo, os artefatos são lavados pela ação da turbulência do escoamento no interior da câmara, permitindo o descarte da incrustação para o circuito de descarga da instalação local, porém mantendo os artefatos (purificados) no interior da câmara de injeção para serem reutilizados no ciclo de limpeza subsequente. Já a Tabela 4 do capítulo anterior apresentou resultados de medições realizadas durante outros ensaios de validação do *OnlineCleaner* acoplado ao trocador de calor, porém durante um procedimento típico de recuperação de artefatos de limpeza que ocorre de forma automatizada, após cada ciclo de limpeza realizado. Explicitados na cor vermelha na Tabela 3, e resumidos a seguir, os dados deste ensaio de validação orientaram esta terceira e última rodada de simulação:

Dados de entrada:

- Fluido do escoamento: água, cujas propriedades foram avaliadas na temperatura de entrada (medida) do fluido de trabalho do trocador de calor; $T_{ent} = 26,2 \text{ }^\circ\text{C}$; $\rho = 0,9969 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$; $\mu = 0,8701 \text{ mPa s}$ (*Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, Ed 64).

Condições de Contorno:

- Vazão (medida): $\dot{m} = 9,25 \text{ kg/s}$;
- Pressão $P_0 = 1,5 \text{ bar} = 150000 \text{ Pa}$ (medida no circuito de descarga da instalação local).
- Intensidade de turbulência na entrada: 5%;
- Velocidade zero (eletroválvula V4 fechada) no dreno vertical abaixo da peneira da câmara de recuperação;

Velocidade zero nas paredes sólidas.

5.3.2.2.**Volume de controle e malha computacional**

O desenho da Figura 41 foi construído para orientar a extração do volume de controle da massa fluida objeto da simulação (CFD, via *Fluent/Ansys*) do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza no circuito hidráulico que viabiliza a sua recuperação. Este desenho (construído em *SolidWorks*) caracteriza o escoamento objeto da simulação: mais especificamente o fluxo do fluido de transporte dos artefatos após este (água na temperatura de saída do trocador) ter circulado pelos tubos do trocador. O escoamento simulado origina-se, assim, na câmara de recuperação, passa pelo dispositivo direcionador de fluxo, pelo contador (Conde) de artefatos, adentra a câmara de injeção (trazendo de volta os artefatos de limpeza impregnados da incrustação removida) e termina no tramo vertical de descarga, posicionado na parte inferior desta câmara. O escoamento turbulento no interior da câmara, contribui para a limpeza dos artefatos, descartando a incrustação para o circuito de descarga, porém retendo na câmara de injeção os artefatos.

Similarmente ao caso da simulação realizada na câmara de recuperação discutida na seção anterior, embora para um valor mais elevado da vazão do escoamento ($\dot{m} = 9,25 \text{ kg/s}$), a pressão de saída para esta nova simulação com ambas as câmaras é a mesma; *i.e.*, $P_0 = 1,5 \text{ bar}$, já que o dreno vertical (abaixo da

peneira) da câmara de recuperação sempre se conecta ao mesmo circuito do anel da água de descarga da instalação local.

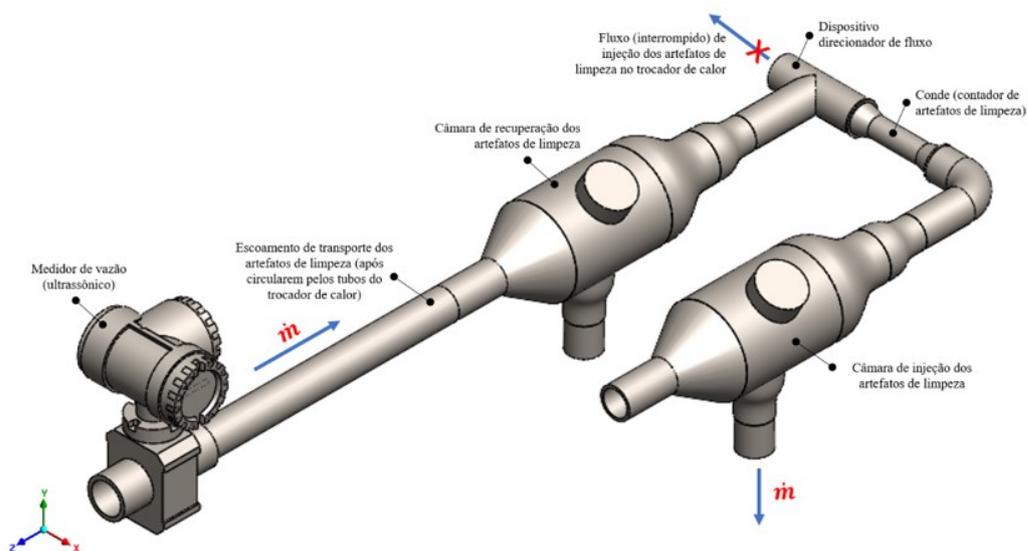


Figura 41 - Circuito hidráulico de recuperação dos artefatos de limpeza

Embora o dispositivo concebido cumpra o propósito de limpeza *online*, portanto envolvendo transferência de energia na forma de calor, as simulações realizadas consideraram o escoamento isotérmico, porém na temperatura medida do fluido de trabalho do trocador, assim já incorporando o efeito térmico.

As imagens da Figura 42 mostram detalhes do volume de controle criado para gerar a malha computacional.

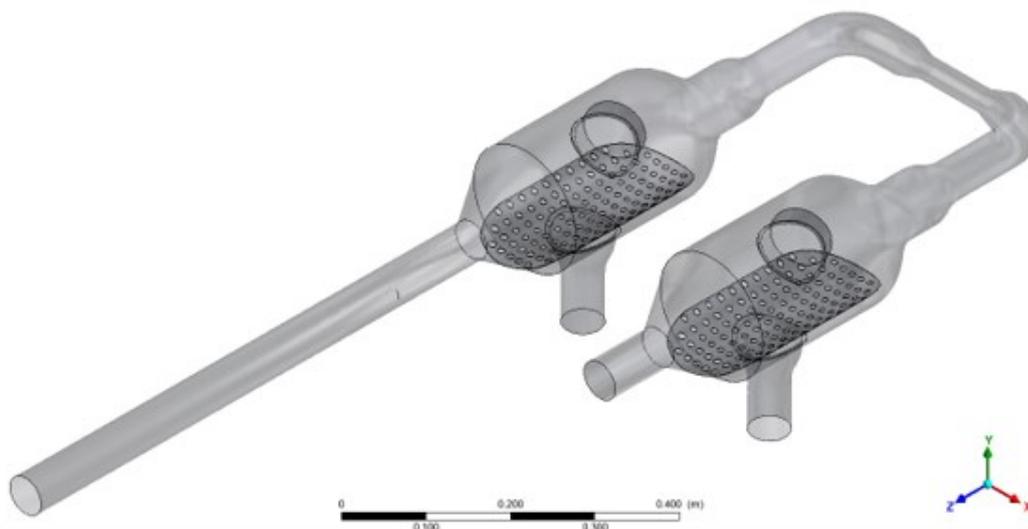


Figura 42 - Volume de controle do escoamento no circuito das câmaras

Já a imagem da Figura 43 mostra a malha computacional (com 5,4 milhões de células computacionais) gerada e utilizada na simulação do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza, iniciado na câmara de recuperação (após circularem pelos tubos do trocador de calor), conduzindo-os de volta à câmara de injeção.

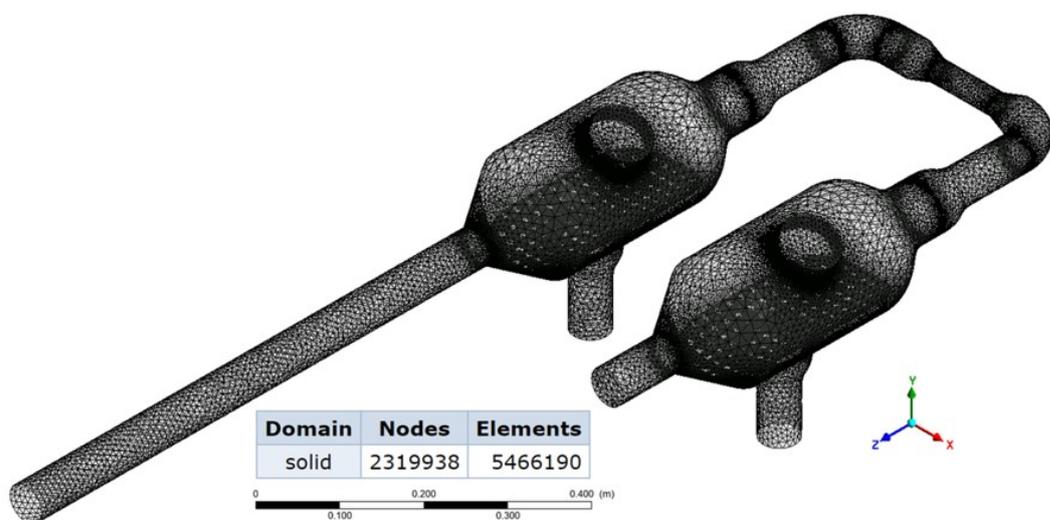


Figura 43 - Malha computacional do escoamento no circuito das câmaras

As imagens da Figura 44 mostram detalhes da malha computacional que integra ambas as câmaras de recuperação e de injeção, enfatizando maior resolução em regiões críticas do escoamento, cuja simulação requer uma maior concentração de células computacionais.

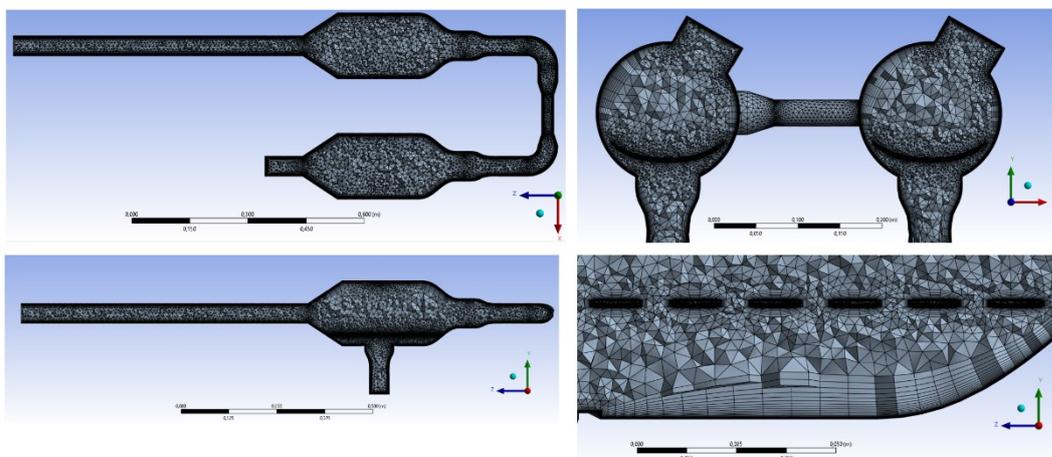


Figura 44 - Detalhes da malha computacional em áreas críticas

5.3.2.3.

Resultados da simulação do escoamento no circuito integrado das câmaras

Similarmente à seção anterior, apresentam-se, a seguir, os resultados da simulação no circuito hidráulico que integra as câmaras de recuperação e de injeção (*i.e.*, no circuito reverso de recuperação dos artefatos de limpeza). São apresentados, os componentes tridimensionais do campo de velocidade, linhas de corrente (*streamlines*), campo de pressão, Número de Reynolds Turbulento e intensidade de turbulência, simulados e visualizados em diferentes planos e seções de interesse do escoamento associado à reversão do fluxo para conduzir de volta os artefatos de limpeza (da câmara de recuperação para à câmara de injeção) após estes terem circulado pelos tubos do trocador de calor; ou seja, após a realização de um ciclo de limpeza.

5.3.2.3.1.

Campo de velocidade

A Figura 44 ilustra o resultado da simulação do módulo V do vetor velocidade no plano central ZX, na escala *default* do software que expressa os valores extremos obtidos.

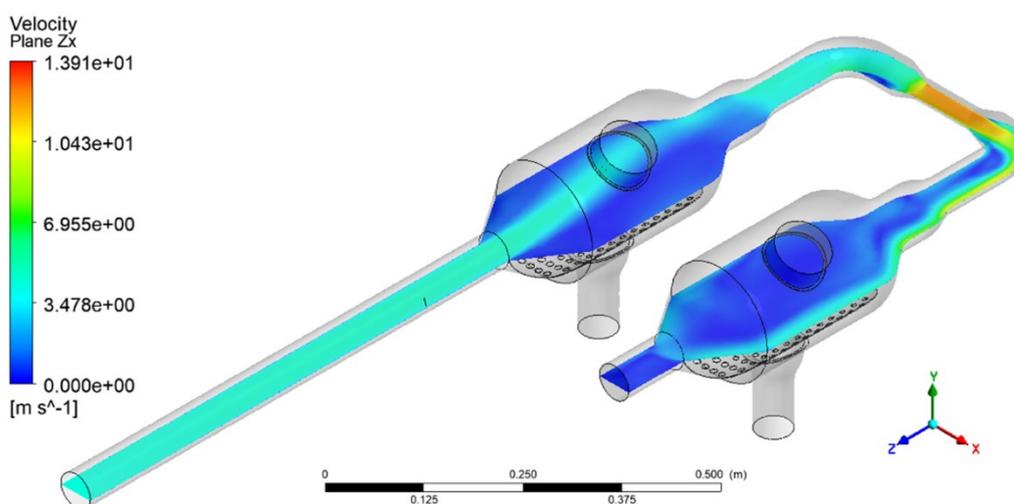


Figura 45 - Módulo V do vetor velocidade no plano central ZX

Da observação desse resultado gráfico no plano ZX observam-se:

- estrutura de jato bem definida na entrada da câmara de recuperação, levemente desviado para a esquerda, com o escoamento acelerando no tubo interno do contador de esferas (de menor diâmetro) e adentrando a câmara de injeção com velocidades mais elevadas (tom de azul mais claro) como resultado na curva de 90° a jusante deste;
- desvio de jato esse já observado pelos resultados da primeira rodada de simulação na câmara de injeção;
- em síntese, a simulação confirmou o comportamento esperado do escoamento ao longo deste tramo hidráulico.

Já a Figura 46, em escala reduzida, apresenta os resultados da simulação do mesmo módulo do vetor velocidade, porém no plano XY, permitindo uma visualização frontal do escoamento ao longo do eixo z.

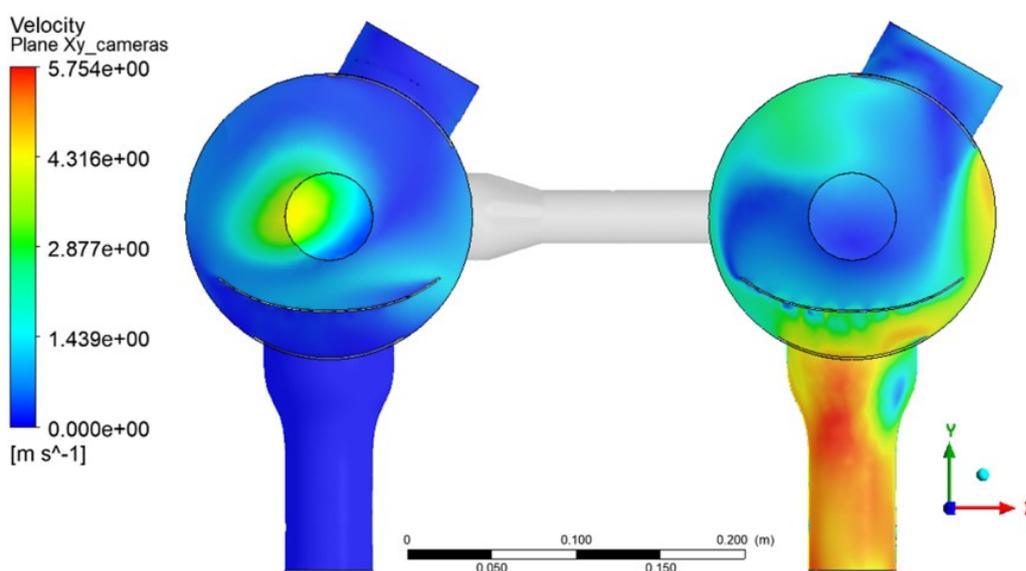


Figura 46 - Módulo V do vetor velocidade no plano central XY

Este resultado evidencia:

- o desvio do jato que se forma na entrada da câmara de recuperação (saída vertical de dreno fechada como condição de contorno), ligeiramente desviado para a esquerda;
- gradientes de velocidade decrescente à medida que se afasta do escoamento em jato na entrada da câmara de recuperação (com velocidade zero na parede, conforme esperado);
- fluxo com velocidades da ordem de 5,7 m/s na saída de dreno vertical instalado abaixo da peneira da câmara de injeção, ao término do circuito hidráulico estudado, com pequenas zonas de recirculação, sugerindo turbilhonamento na saída de dreno vertical.

- zonas bem definidas de recirculação no entorno da peneira horizontal na câmara de injeção, provocadas pelo escoamento vertical no dreno de saída;

Já a imagem da Figura 47 ilustra as linhas de corrente segundo as quais aos artefatos de limpeza navegam. Esse resultado, quando analisado em vídeo (alternativa de *output* de grande interesse do software Fluent/Ansys), é altamente ilustrativo para entender a trajetória dos artefatos de limpeza, notadamente dentro das câmaras de recuperação e de injeção onde ocorre a sua lavagem para retirada das incrustações removidas dos tubos do trocador de calor.

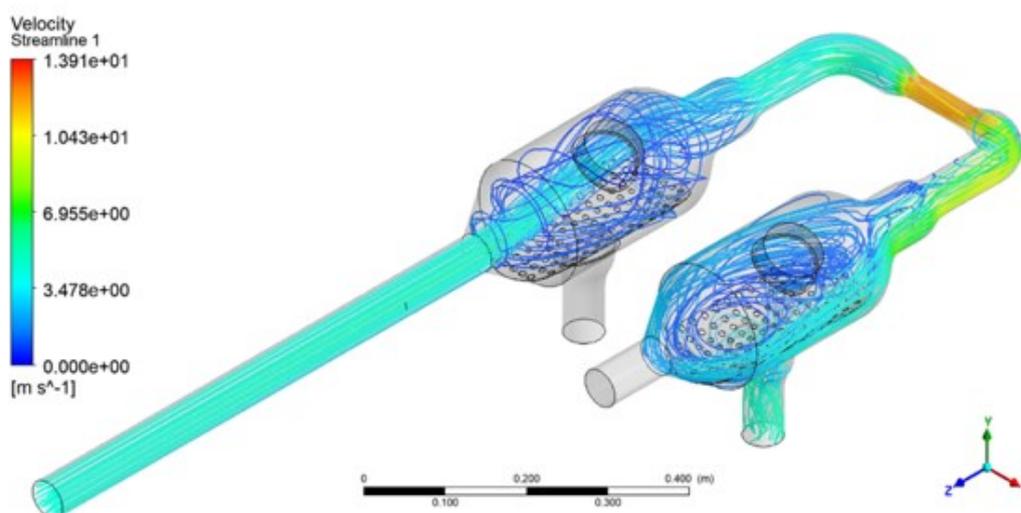


Figura 47 - Linhas de corrente (*streamlines*) no domínio do escoamento

As imagens da Figura 48 ilustram fotos sequenciais do vídeo gerado em diferentes posições, para ilustrar momentos distintos de navegação dos artefatos de limpeza.

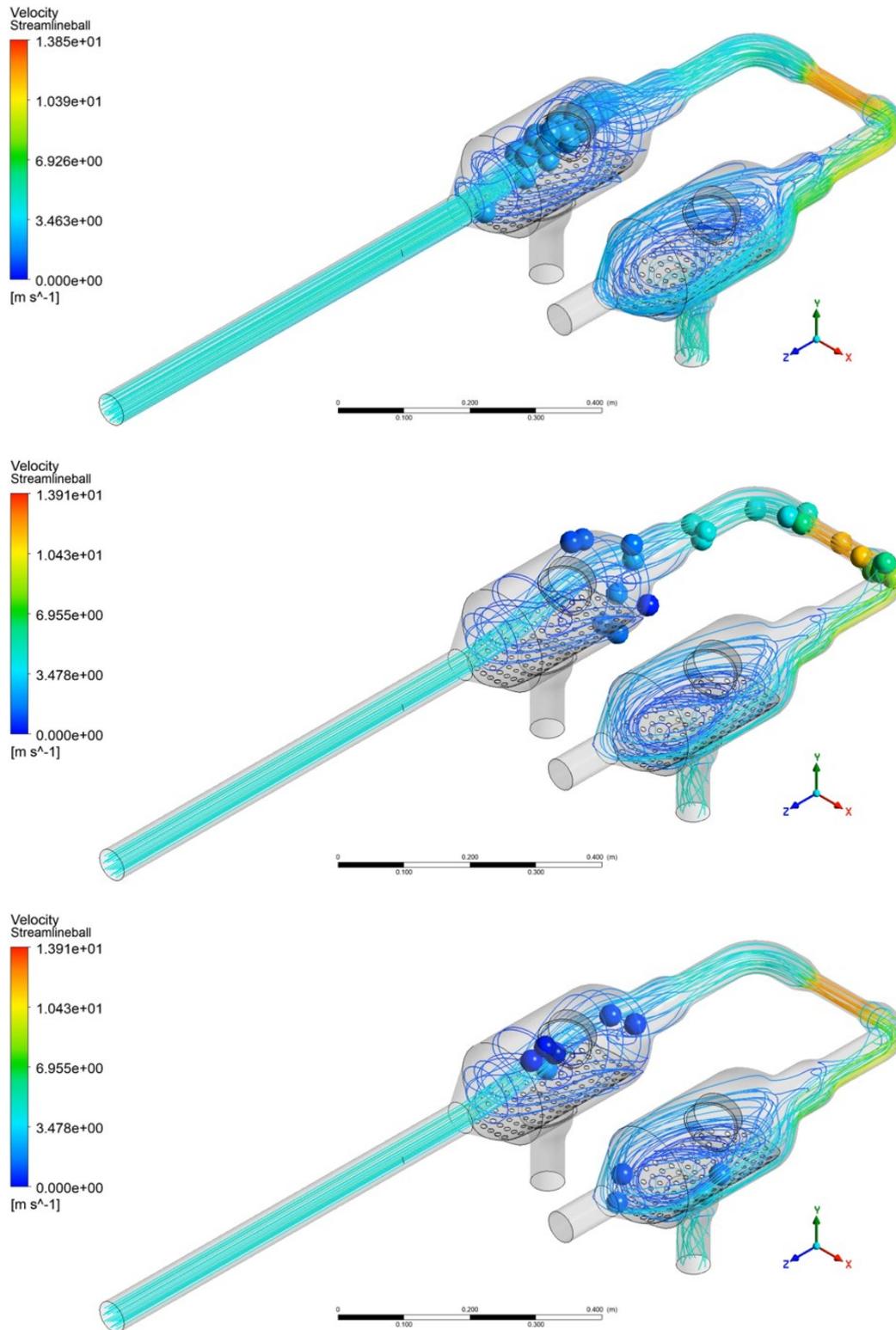


Figura 48 - Artefatos de limpeza navegando nas linhas de corrente

Estas imagens ilustram claramente que:

- o percurso sinuoso dos artefatos de limpeza, contribui para a remoção da incrustação que adere às suas superfícies após cada ciclo de limpeza;
- os artefatos de limpeza (na cor azul escuro) navegam em círculos em velocidade mais baixa no entorno da peneira acima do dreno vertical na câmara de injeção, enquanto o fluido de transporte impregnado com a incrustação sai em escoamento turbilhonado pela saída no dreno vertical;
- os artefatos de cor verde e amarela enfatizam que os artefatos aceleram ao navegarem pelo duto de menor diâmetro do contador optoeletrônico Conde.

A Figura 49, mostra o componente w do vetor velocidade na direção do eixo Z (no sentido negativo na câmara de recuperação e no sentido positivo na câmara de injeção), cujos resultados são mostrados na escala *default*, que apresenta os valores extremos.

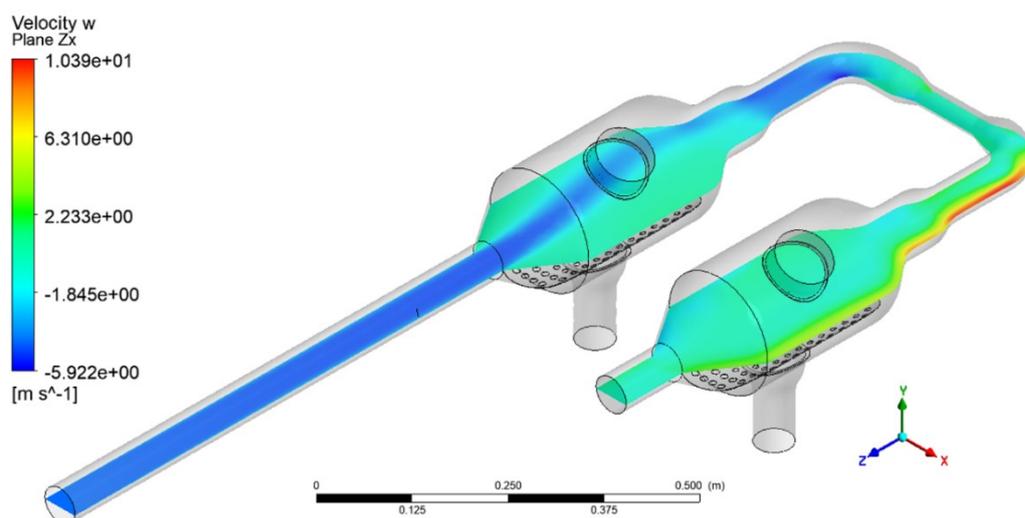


Figura 49 - Componente w do vetor velocidade do escoamento no plano ZX

Esse resultado remete para os seguintes pontos de atenção:

- o escoamento se acelera após passar pelo tubo interno do Conde, exibindo velocidade máxima na curva a sua jusante (ênfatisado pela cor vermelha), que resulta do efeito de curvatura do escoamento antes de sua entrada na câmara de injeção;
- interessante observar que as zonas de recirculação na câmara de recuperação se desenvolvem em torno do jato, enquanto na câmara de injeção (término do escoamento) a recirculação se dá sobre a peneira, certamente devido ao escoamento vertical pelo dreno de saída.

A Figura 50 ilustra o componente w da velocidade numa vista frontal (cujo resultado da simulação é mostrado no plano YX).

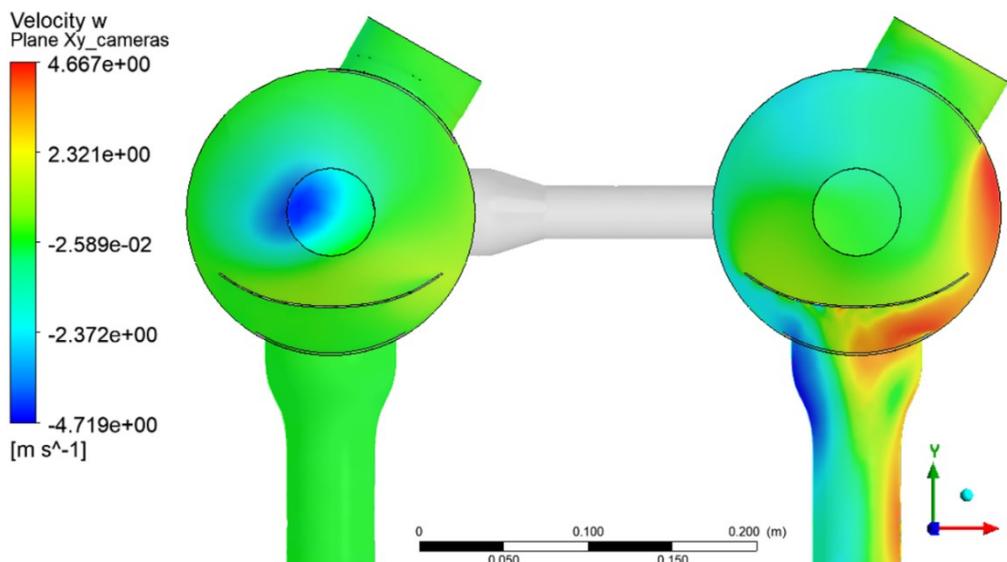


Figura 50 - Componente w do vetor velocidade do escoamento no plano YX

Estes resultados confirmam:

- desvio para a esquerda do escoamento tipo jato na entrada da câmara de injeção;
- a zona de maior velocidade induzida pela curvatura do escoamento a jusante do Conde e
- zonas de recirculação no dreno vertical da câmara de injeção, confirmando ao carácter turbilhonar do escoamento no dreno vertical de saída.

A Figura 51 mostra o componente u do vetor velocidade do escoamento, na direção principal do escoamento pelo interior do contador optoeletrônico de artefatos de limpeza (u H 12 m/s, já que o tom laranja se refere a uma velocidade menor que o tom vermelho forte);

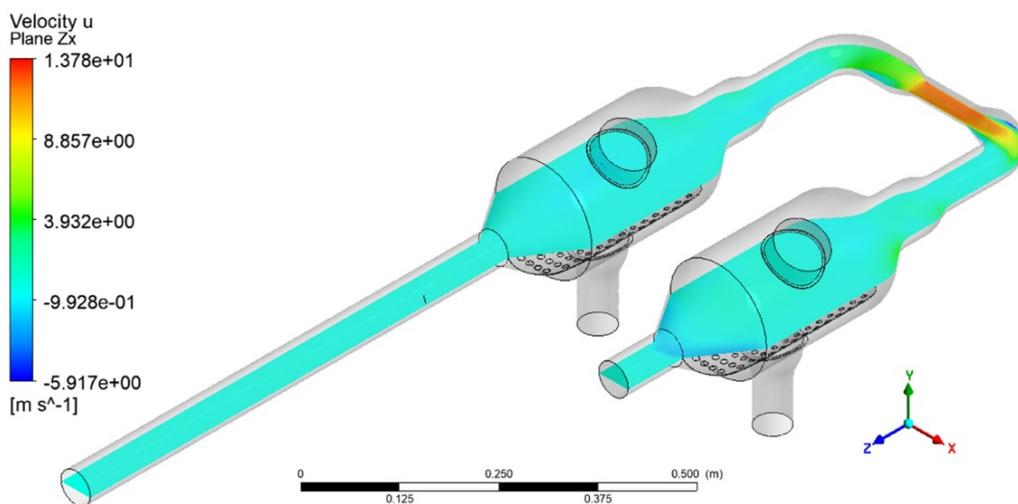


Figura 51 - Componente u do vetor velocidade do escoamento no plano ZX

Já a Figura 52 reporta o mesmo resultado, em escala modificada, para enfatizar o escoamento pelo tramo interno do Conde.

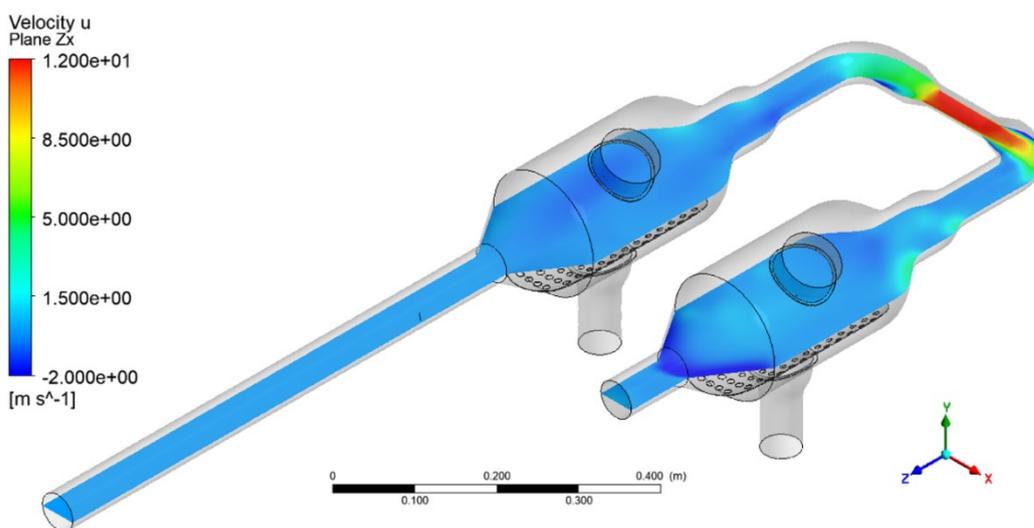


Figura 52 - Componente u do vetor velocidade (escala modificada)

Girando para o Plano XY, a Figura 53 permite visualizar a zona de recirculação na peneira horizontal instalada na câmara de injeção (observar que o escoamento abaixo da peneira nos tons de cor amarelo-laranja refletem escoamento positivo) na sentido do eixo X), enquanto os sinais de escoamento na cor azul (também abaixo da peneira) denota escoamento negativo, portanto no sentido

contrário ao eixo X, nitidamente caracterizando recirculação sob a peneira, o que também confirma o caráter de escoamento em turbilhão no dreno vertical.

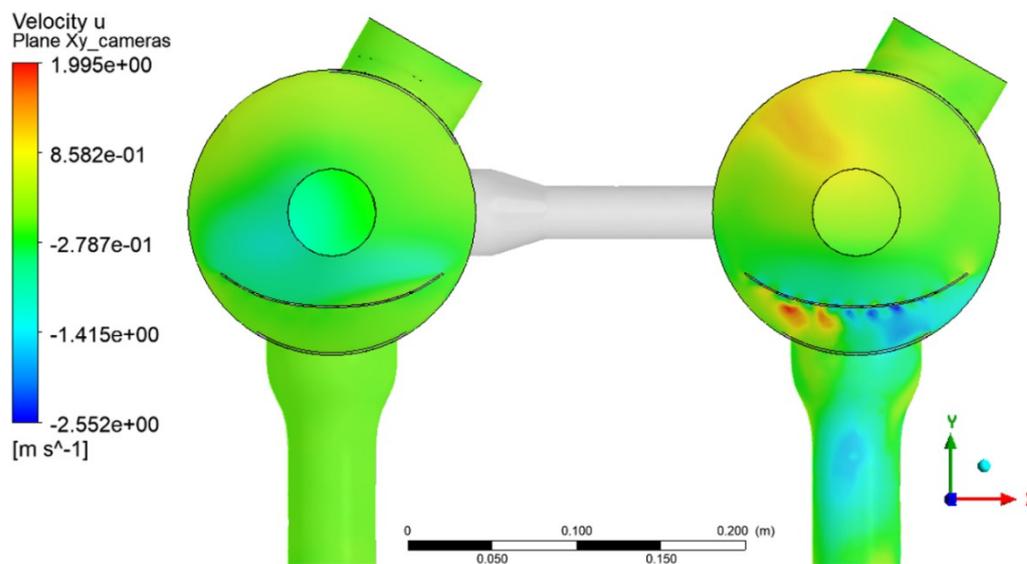


Figura 53 - Componente u do vetor velocidade (escala modificada)

A Figura 54 apresenta o resultado da simulação para o cálculo do componente v da velocidade (na direção Y, no Plano ZX), direção essa de interesse para visualizar o escoamento vertical pelo dreno de saída e pequenas zonas de recirculação nesta direção.

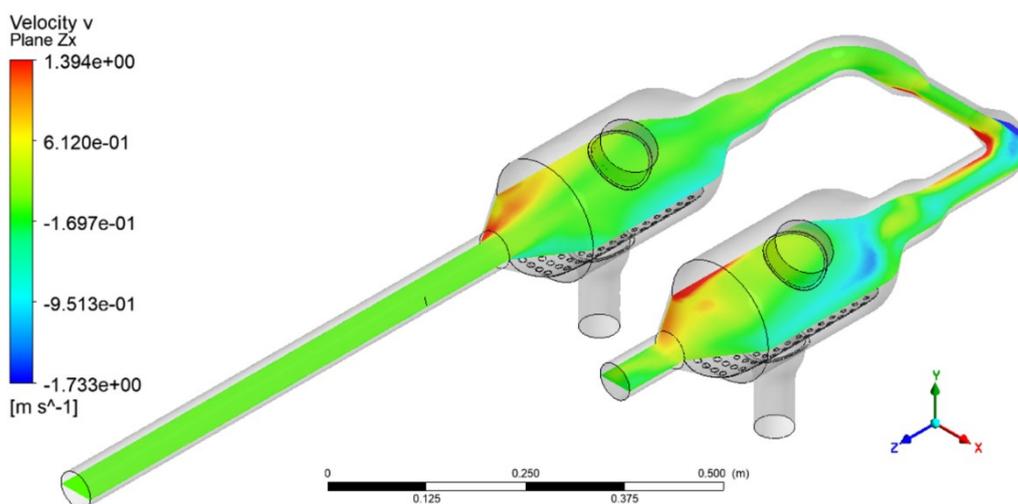


Figura 54 - Componente v do vetor velocidade do escoamento no plano ZX

Nesta figura, alguns tons verde-claro (velocidade em torno de zero para o componente v da velocidade), com pequenas zonas de recirculação mostradas pelas cores vermelha e azul em posições extremas.

A Figura 55 mostra o mesmo componente v da velocidade, porém num plano frontal YX, enfatizando o escoamento no dreno vertical da câmara de injeção (à direita).

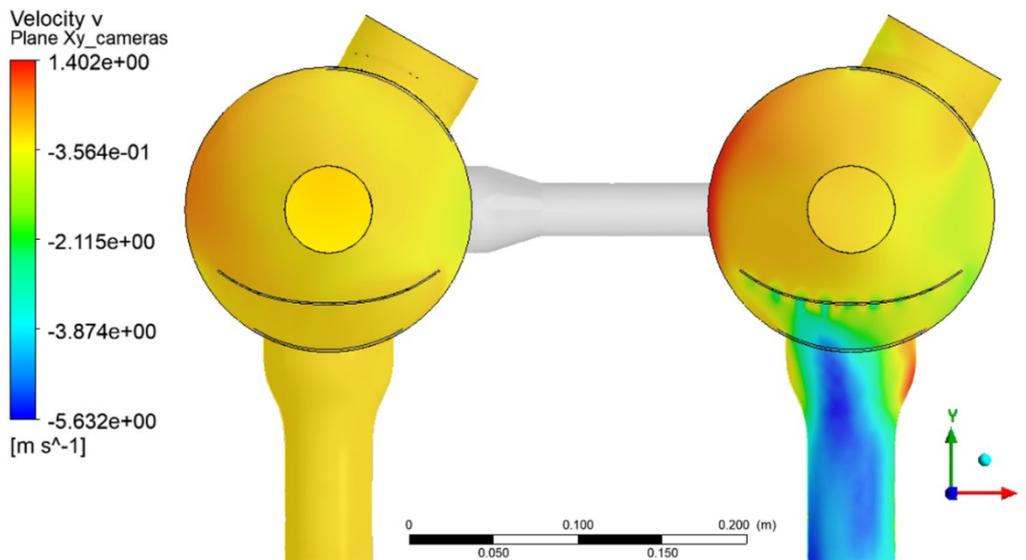


Figura 55 - Componente v do vetor velocidade do escoamento no plano XY

Nesta figura, interessa observar:

- o escoamento máximo (da ordem de 5 m/s) contrário ao eixo Y no dreno de saída;
- zonas de recirculação no escoamento turbilhonado no dreno de saída;
- escoamento pelos furos da peneira, no sentido contrário ao eixo Y;
- algumas zonas em vermelho em um dos cantos abaixo da peneira da câmara de injeção (da direita), contribuindo para a formação de vórtices nessa região.

5.3.2.3.2.

Campo de pressão

Na sequência, são apresentados os resultados da simulação para o campo de pressão.

A Figura 56, na escala *default* automaticamente selecionada pelo próprio simulador *Fluent*, conforme esperado, indica que o escoamento se desenvolve no sentido decrescente do campo de pressão (na cor vermelha pressão da ordem de $2,2 \times 10^5$ Pa e na cor verde pressão da ordem de $1,6 \times 10^5$ Pa.

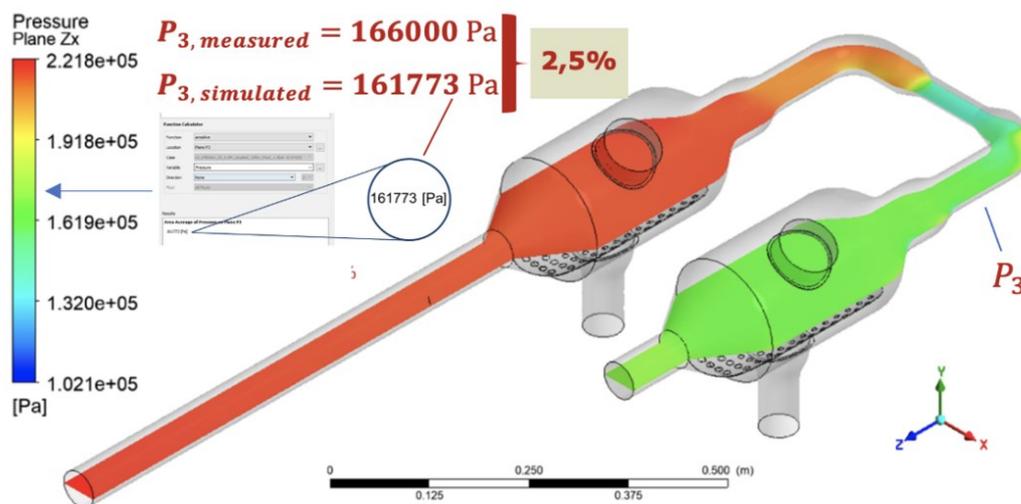


Figura 56 - Pressão do escoamento no plano ZX

Com o propósito de validar o resultado da simulação, optou-se por comparar o valor da pressão simulada pelo software *Fluent/Ansys* (valor médio na seção transversal P_3) com o valor medido por um instrumento calibrado (portanto com confiabilidade metrológica) em uma seção em que o tramo hidráulico do protótipo do equipamento de limpeza *online* estivesse devidamente instrumentado. Conforme mostrado no esquemático da Figura 6.20, na seção de entrada da câmara de injeção, considerando o escoamento reverso, *i.e.*, da câmara de recuperação para a câmara de injeção, o valor da pressão P_3 foi medida, indicando o valor $P_3 = 1,7 \text{ bar} = 170\,000 \text{ Pa}$. Este valor foi comparado com o valor calculado pela simulação, que indicou o valor de $P_3 = 161\,773 \text{ Pa}$, portanto diferindo de apenas 4,8% do valor medido por instrumento com confiabilidade metrológica, assim evidenciando a excelente potencialidade do software em gerar resultados confiáveis.

A Figura 57 mostra o campo de pressão simulado no plano XY, novamente mostrando o gradiente de pressão que impulsiona o escoamento com descarga no circuito de descarga da instalação local (ver esquemático da figura 6.20) mantido a

$P_0 = 1,5 \text{ bar} = 150\,000 \text{ Pa}$, observando que o valor mínimo da escala é $145\,500 \text{ Pa}$.

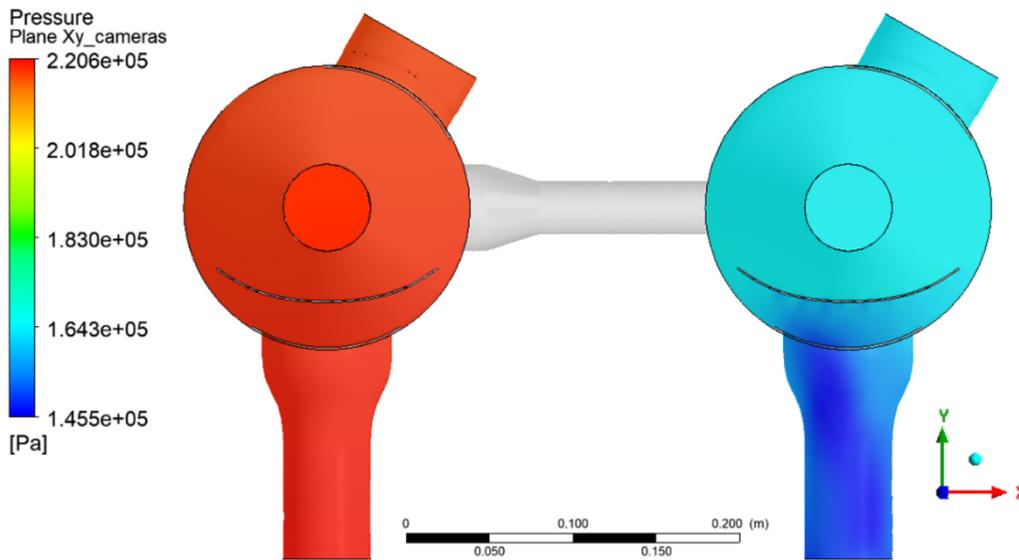


Figura 57 - Pressão do escoamento no plano XY

A Figura 58 apresenta os mesmos resultados em escala compactada, permitindo avaliar estruturas do campo de pressão com mais detalhes.

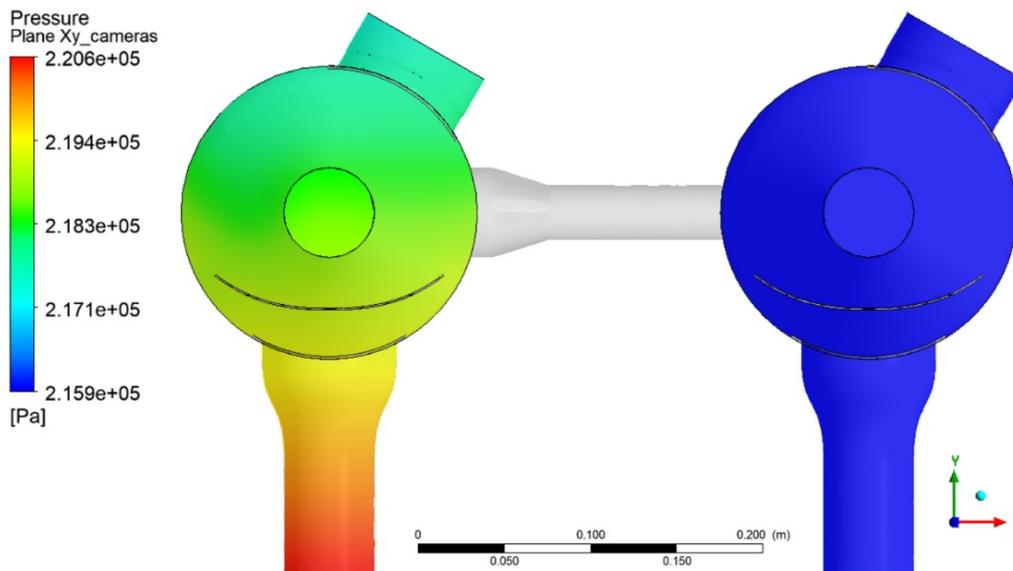


Figura 58 - Pressão do escoamento no plano XY (escala modificada)

5.3.2.3.3.

Intensidade de turbulência e Número de Reynolds Turbulento

Caminhando para o final das rodadas de simulações realizadas, as Figuras a seguir documentam resultados de estruturas da turbulência associadas ao escoamento estudado. As Figuras 59 e 60 caracterizam o regime do escoamento em cada célula computacional do escoamento.

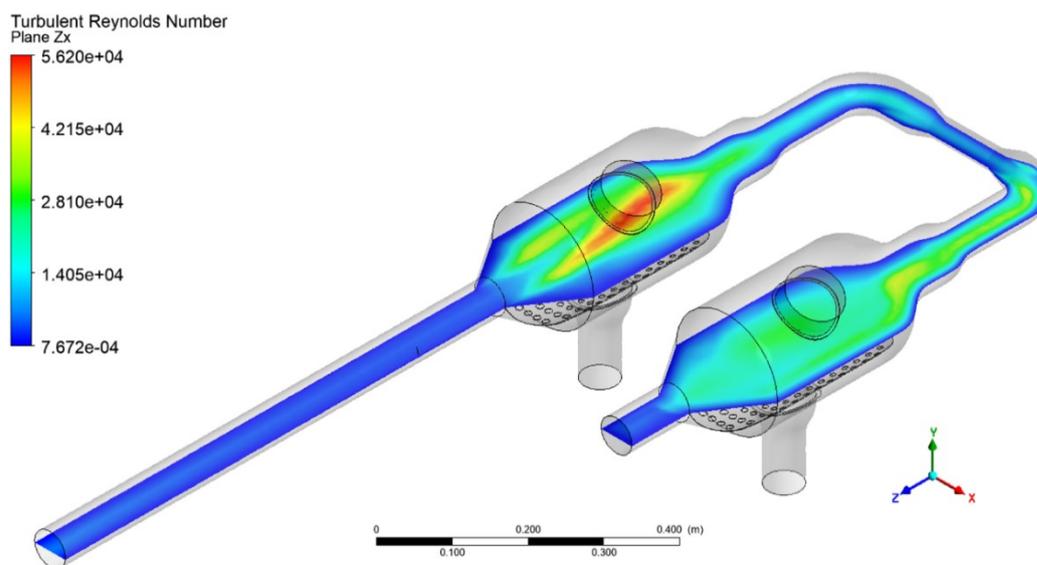


Figura 59 - Número de Reynolds turbulento (escoamento no plano ZX)

Enquanto a Figura 59 apresenta a escala default da simulação do *Turbulent Reynolds Number*, a Figura 60, em escala criteriosamente selecionada, enfatiza do gradiente de Reynolds Number em regiões específicas do escoamento no plano ZX. Interessante observar que na Figura 60 é explicitado este gradiente no tubo de entrada, com Reynolds zero na parede (já que $k = 0$ na parede, com valor explicitado em tom de azul claro ($R_{e\ turbulent} \cong 3700$, na região central do tubo de entrada. E, conforme esperado, nas zonas de maior turbulência onde o escoamento é mais instável, o Número de Reynolds Turbulento (na cor vermelha) se aproxima do valor $R_e \cong 14000$.

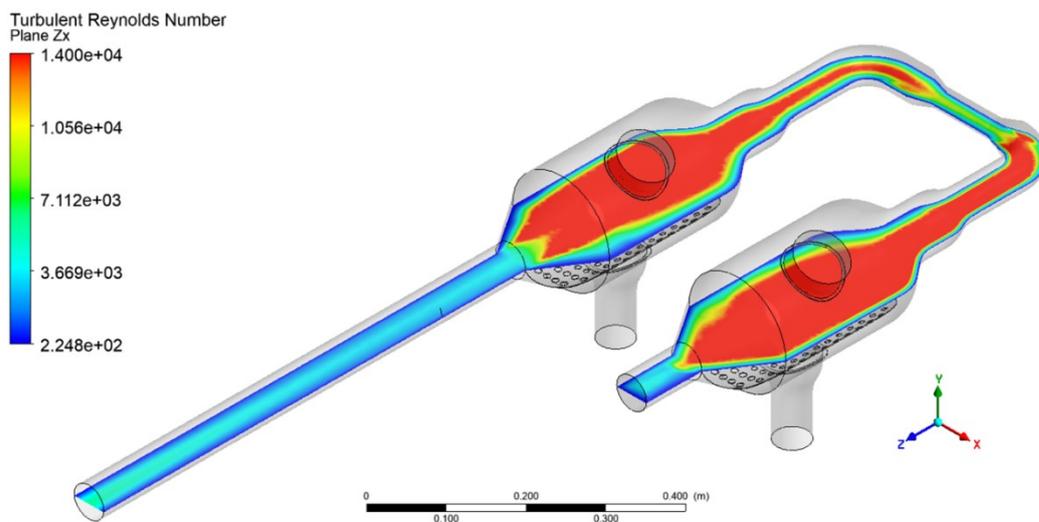


Figura 60 - Número de Reynolds turbulento (escala modificada)

Já a Figura 61 ilustra o valor do Número de Reynolds Turbulento no plano YX, portando explicitando outras estruturas, notadamente o escoamento do tipo jato na entrada da câmara de injeção onde o nível de turbulência é mais intenso.

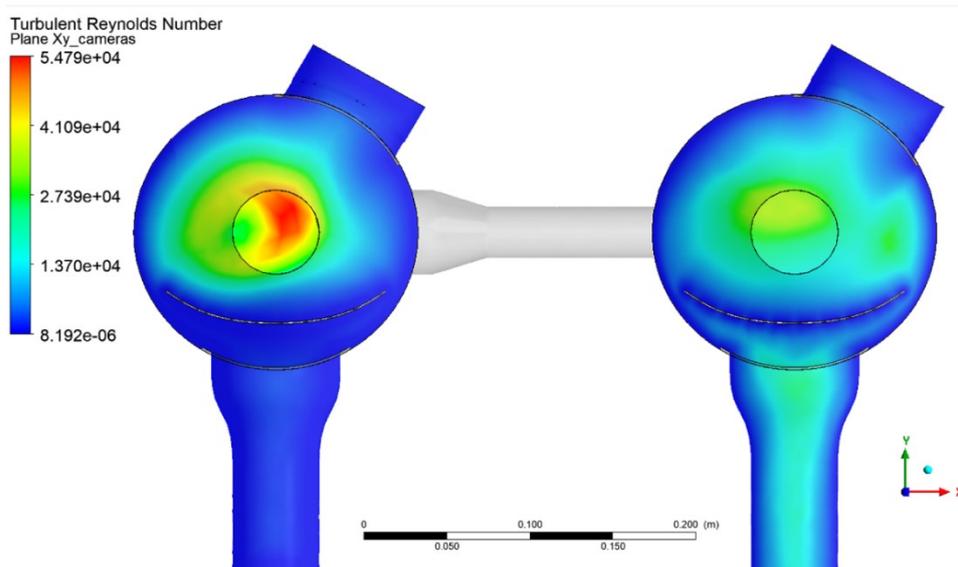


Figura 61 - Número de Reynolds turbulento (escoamento no plano XY)

A Figura 62 ilustra o valor da intensidade de turbulência (*i.e.*, o valor do componente de flutuação da velocidade normalizada no seu respectivo valor médio local da velocidade), permitindo avaliar aspectos relevantes da distribuição de intensidade de turbulência na totalidade do domínio estudado.

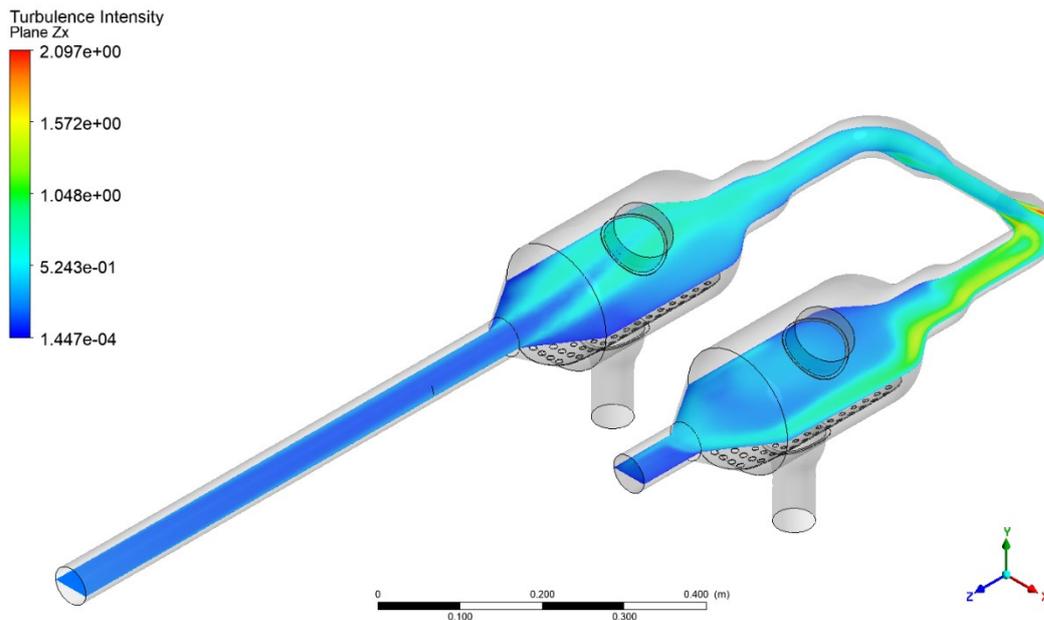


Figura 62 - Intensidade de turbulência no escoamento, no plano ZX

Finalizando, as Figuras 63 e 64 ilustram, respectivamente estas complexas estruturas da turbulência no Plano frontal YX, para o valor *default* da escala simulada (valores extremos) e para uma outra escala selecionada para exibir outras estruturas de interesse.

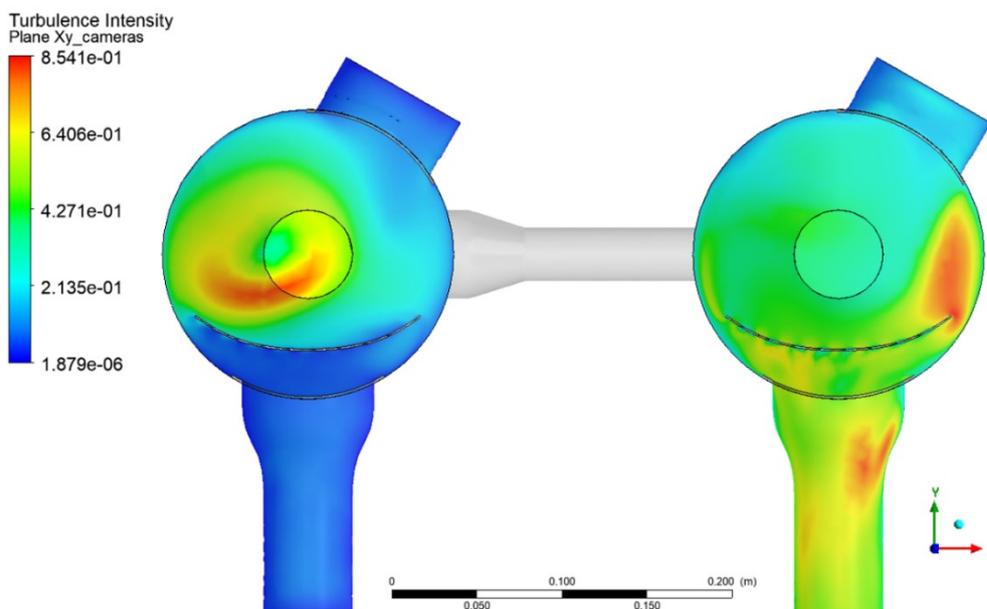


Figura 63 - Intensidade de turbulência no escoamento, no plano XY

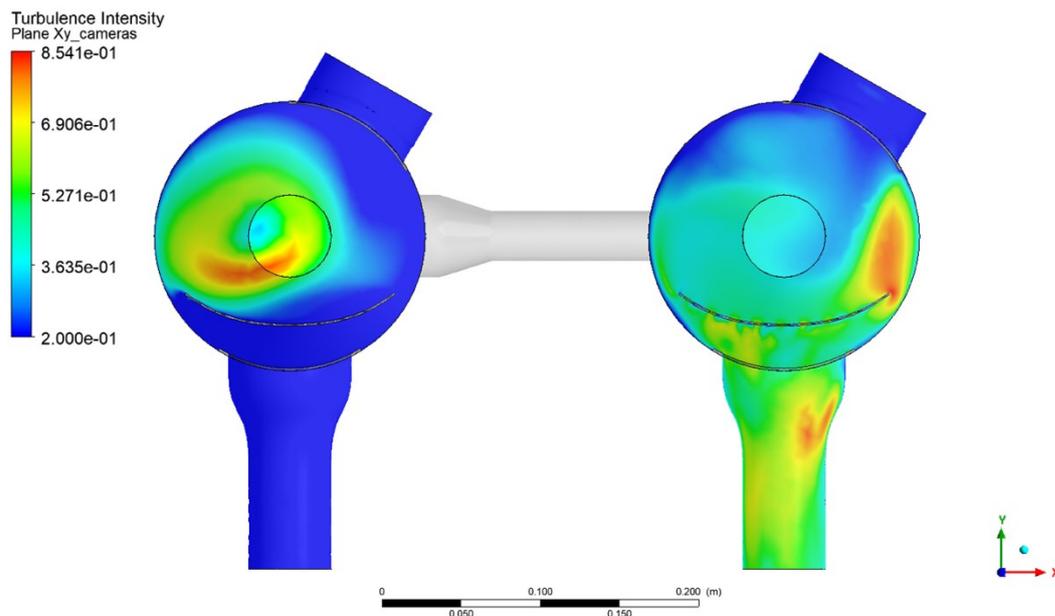


Figura 64 - Intensidade de turbulência no plano XY (escala modificada)

Finalizando, os muitos resultados da simulação aqui apresentados e discutidos, confirma a enorme potencialidade da Ferramenta, lembrando que os resultados simulados se encontram disponíveis, permitindo muitas outras análises em seções e planos de interesses específicos.

5.4. Comentários de ordem geral do capítulo

Dentre os muitos resultados da simulação aqui apresentados e discutidos, este capítulo cumpriu dois propósitos específicos: (i) destacar resultados de interesse que orientaram a incorporação de melhorias nos tramos hidráulicos críticos do protótipo do dispositivo de limpeza online de trocadores de calor e (ii) ilustrar a enorme potencialidade das ferramentas computacionais utilizadas (*SolidWorks* e *Fluent/Ansys*), lembrando que arquivos gerais gerados pela simulação se encontram disponíveis, permitindo aprofundar a análise em seções e planos de interesses específicos.

6. Conclusões e recomendações

6.1. Conclusões

Em sintonia com os objetivos originalmente propostos no Capítulo 1, o trabalho cumpriu integralmente o seu propósito.

No que concerne o objetivo principal da dissertação —*i.e.*, contribuir para o aprimoramento do dispositivo de limpeza *online* de trocadores de calor, simulando os campos de pressão, velocidade e intensidade de turbulência— este propósito foi plenamente alcançado. Mais especificamente, pelo fato de os resultados das três rodadas da simulação realizada pela técnica volumes finitos por CFD (*Computer Fluid Dynamics*) terem sido validados com base em dados experimentais, assim conseguindo prover argumentos incontestáveis que permitiram orientar a incorporação de inovações incrementais no dispositivo de limpeza *online* de trocadores de calor. As melhorias introduzidas no projeto construtivo do equipamento resultaram na redução de perdas de carga localizadas e na amenização de zonas de recirculação do escoamento nos tramos hidráulicos do equipamento, fatores que impactam nos custos de bombeamento. De um modo geral, o aprimoramento do equipamento (já protegido por um pedido de patente de equipamento junto ao Instituto Nacional de Propriedade Intelectual, Ref. INPI PETC2023), o torna mais econômico e mais operacional para realizar a limpeza *online* de trocadores de calor utilizados em equipamentos de processos industriais, contribuindo para mitigar o indesejável, porém inevitável fenômeno de formação de *fouling* que tão drasticamente compromete a efetividade desses equipamentos de processo.

No que concernem os objetivos específicos, esta pesquisa de mestrado:

- realizou uma ampla revisão da literatura relacionada à taxonomia de trocadores de calor e, também, sobre o complexo fenômeno de formação da incrustação e o seu impacto na efetividade do trocador.
analisou a eficácia dos métodos atuais de limpeza de trocadores de calor, sinalizando as limitações das alternativas tecnológicas disponíveis *vis-à-vis* a tecnologia de limpeza *online* proposta;

- avaliou, do ponto de vista hidrodinâmico, a eficácia de operação do dispositivo de limpeza *online* de trocadores de calor em sua configuração atual, com atenção especial aos problemas relacionados às perdas de carga que foram mitigadas com base nos resultados das diferentes rodadas de simulação realizada.
- discutiu, à luz da física do problema estudado, os resultados das simulações computacionais dos campos de velocidade, pressão e intensidade de turbulência associados ao escoamento no interior de componentes críticos do dispositivo de limpeza *online*, sinalizando coerências previstas pela lógica hidrodinâmica do escoamento estudado e exaltando alguns fenômenos não esperados (e.g: zonas de recirculação na proximidade da peneira; desvio do centro do escoamento do tipo jato formado na entrada da versão modificada da câmara);
- confrontou resultados teóricos que resultaram das simulações CFD com resultados experimentais confiáveis (calibrados) gerados em ensaios de validação do protótipo do equipamento, monitorados por instrumentos de medição de vazão e pressão embarcados em estações específicas, conforme discutido no Capítulo 5; e
- avaliou, com base nos resultados das simulações realizadas, as modificações incorporadas no projeto construtivo do dispositivo de limpeza *online* de trocadores de calor concebido.

Resumindo os objetivos central e específicos originalmente formulados, os resultados da simulação CFD (*Computer Fluid Dynamics*) realizada no escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza que circulam pelos tramos críticos do equipamento concebido orientou ajustes e a incorporação de melhorias localizadas no projeto construtivo da alternativa tecnológica proposta. A incorporação de inovações incrementais e a construção de um protótipo modificado priorizou (i) eliminar zonas de recirculação do interior das câmaras de injeção e de recuperação e (ii) reduzir perdas de carga localizada, visando diminuir custos de bombeamento. Conforme discutido no Capítulo 6, apenas para enfatizar um resultado relevante do confronto entre simulação e medição, a substituição da peneira vertical (versão original da câmara) para a peneira horizontal (versão modificada) resultou em um ganho de 5149,68 Pa na redução da perda de carga, o que se traduz em uma redução da resistência mecânica ao escoamento de 62,2%. Em outras palavras, as modificações associadas à troca de posição da peneira, e o deslocamento do tramo vertical de dreno para a parte central da câmara de injeção, contribuíram de forma expressiva para a melhoria do seu projeto construtivo suavizando, inclusive, a hidrodinâmica do escoamento no seu interior. Essas

melhorias reduziram, também, as zonas de recirculação que comprometem a eficácia do processo de injeção dos artefatos de limpeza;

A confiabilidade dos resultados da simulação numérica foi confirmada com base nos quatro fatores discutidos no Apêndice B, a seguir comentados:

- nos critérios específicos de convergência previamente definido para cada equação de governo do escoamento estudado (10^{-3} para as equações de conservação de momento e massa e de 10^{-4} para as equações $\kappa - \omega$ SST do modelo de turbulência selecionado);
- na simulação independente da malha, o que requereu um teste de malha durante a fase que antecedeu a simulação (descrita no Apêndice B);
- no modelo de turbulência $-\omega$ SST, confirmado pelo parâmetro y^+ (distância do primeiro elemento de malha à parede) já que este satisfaz a condição $y^+ \leq 5$; *i.e.*, dentro da subcamada limite laminar; conforme garantido pelos resultados dos testes de malhas realizados;
- nos resultados gerados da computação confrontados com valores medidos experimentalmente por instrumentos calibrados e com rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades (SI) em locais críticos do escoamento.

O acoplamento entre pressão e velocidade foi realizado com sucesso fazendo-se uso do algoritmo *Coupled* do software *Fluent*. Já a discretização espacial das equações de conservação de massa, quantidade de movimento linear e equações do modelo de turbulência foram realizadas satisfatoriamente com base em um esquema de discretização *Upwind* de segunda ordem.

Concluindo, cabe destacar dois aspectos relevantes, que enfatizam o potencial da ferramenta computacional utilizada:

- os desenvolvimentos de simulação CFD do escoamento do fluido de transporte dos artefatos de limpeza em circuitos hidráulicos críticos do dispositivo de limpeza *online* concebido devem ser entendidos como parte da estratégia metodológica adotada para orientar a introdução de inovações incrementais no protótipo do *OnlineCleaner*, após este ter sido submetido a uma prova de conceito realizada em um ambiente industrial. Os dados de CFD gerados foram comparados e complementados com dados medidos, experimentalmente adquiridos nos testes de validação realizados com o *OnlineCleaner* acoplado a um trocador de calor de um hidrogerador (44 MW) em operação no complexo hidrelétrico operado pela Light Energia S.A. (área de concessão em estado do Rio de Janeiro/Brasil). Se, por um lado, os dados experimentais fornecem uma referência confiável baseada em resultados de medições rastreáveis em locais estratégicos e viáveis para serem instrumentados nos circuitos hidráulicos do protótipo de limpeza, a simulação numérica CFD permite análises complexas em todo o domínio do fluxo, incluindo avaliações de características complexas de fluxo de

- fluxos internos (por exemplo, campos de pressão e velocidade e características da estrutura de turbulência) e
- a pesquisa de mestrado desenvolvida priorizou a simulação CFD dos tramos hidráulicos do dispositivo de limpeza *online* concebido, daí não ter sido necessário ativar o módulo energia do software *Fluent/Ansys*. Para os propósitos da dissertação de mestrado a decisão foi acertada já que a não ativação do módulo energia reduz consideravelmente o tempo de processamento da simulação. O fato de o módulo energia não ter sido ativado tampouco comprometeu os resultados das simulações realizadas uma vez que cada escoamento foi modelado com base na sua temperatura real (medida localmente), ora considerando as condições de entrada do fluido de trabalho dos artefatos de limpeza no trocador de calor e ora simulado com base na temperatura medida na saída do trocador de calor. Em outras palavras, embora o efeito térmico que ocorre no trocador não tenha sido simulado (pois não constitui-se no objetivo da pesquisa) os escoamentos de injeção e de recuperação dos artefatos de limpeza foram corretamente modelados na simulação.

6.2.

Recomendações para desdobramentos do trabalho

Não obstante este trabalho de simulação realizado ter visado aprimorar o projeto construtivo do dispositivo concebido para realizar a limpeza online de trocadores de calor, as simulações foram limitadas. Concentraram-se no escoamento de injeção dos artefatos de limpeza na câmara de injeção e no escoamento reverso de recuperação desses artefatos no circuito hidráulico que interliga a câmara de recuperação à câmara de injeção. Novas rodadas de simulação certamente poderão orientar novos aprimoramentos no equipamento de limpeza de trocadores de calor.

Num eventual desdobramento deste trabalho, recomenda-se ampliar o escopo da investigação do escoamento de transporte dos artefatos de limpeza, simulando um tramo integrado que inclua o trocador de calor. Esta é uma proposta que certamente irá requerer uma malha mais elaborada e um tempo excessivamente maior de computação já que requer o acionamento do módulo que resolve a equação da energia. Tornando o estudo ainda mais complexo, sugere-se avaliar a possibilidade de simular o escoamento considerando o escoamento multifásico (fase contínua: água e fase discreta: artefatos de limpeza), estudo de interesse caso a densidade dos artefatos de limpeza seja distinta da densidade do seu fluido de transporte.

Referências bibliográficas

AL-JANABI, A.; MALAYERI, M. R.; MÜLLER-STEINHAGEN, H. Experimental Investigation of Crystallization Fouling on Grooved Stainless-Steel Surfaces During Convective Heat Transfer. **Heat Transfer Engineering**, v. 30, n. 10–11, p. 832–839, 19 out. 2009.

ALMEIDA, Í. D. **Metodologia do trabalho científico**. [s. l.] Editora UFPE, 2021.

AL-WAELI, A. H. A.; CHAICHAN, M. T.; KAZEM, H. A.; SOPIAN, K. Evaluation and analysis of nanofluid and surfactant impact on photovoltaic-thermal systems. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 13, p. 100392, mar. 2019.

ANSYS. **Meshing Tutorial Ansys**. [s. l: s. n.] v. 1312–220 p.

AWAIS, M.; BHUIYAN, A. A. Recent advancements in impedance of fouling resistance and particulate depositions in heat exchangers. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 141, p. 580–603, 1 out. 2019. Acesso em: 12 Jul. 2023.

BABCOCK & WILCOX. **B&W celebrates more than 150 years of industry firsts and achievements in innovation**. Disponível em: <<https://www.babcock.com/home/about/corporate/history>>. Acesso em: 28 Sep. 2023.

BERCE, J.; ZUPANČIČ, M.; MOŽE, M.; GOLOBIČ, I. A Review of Crystallization Fouling in Heat Exchangers. **Processes** **2021**, Vol. **9**, Page **1356**, v. 9, n. 8, p. 1356, 1 ago. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2227-9717/9/8/1356/htm>>. Acesso em: 8 Jul. 2023.

BOCHAROV, A. N.; EVSTIGNEEV, N. M.; RYABKOV, O. I. Fully implicit multiple graphics processing units' schemes for hypersonic flows with lower upper symmetric Gauss-Seidel preconditioner on unstructured non-orthogonal grids. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1698, n. 1, p. 012023, 1 Dec. 2020.

BONILLA, J.; ROCA, L.; DE LA CALLE, A.; DORMIDO, S. Modelo Dinámico de un Recuperador de Gases -Sales Fundidas para una Planta Termosolar Híbrida de Energías Renovables. **Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI**, v. 14, n. 1, p. 70–81, Jan. 2017.

BOTT, T. R. CHAPTER 7 - Particulate Deposition. *Em*: BOTT, T. R. **Fouling of Heat Exchangers**. Chemical Engineering Monographs. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 1995a. p. 55–96.

BOTT, T. R. CHAPTER 8 - Crystallisation and Scale Formation. *Em*: BOTT, T. R. **Fouling of Heat Exchangers**. Chemical Engineering Monographs. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 1995b. p. 97–135.

BOTT, T. R.; MELO, L. F. **Fouling of heat exchangers**. [s. l: s. n.] v. 1455–355 p.

BOURIS, D.; KONSTANTINIDIS, E.; BALABANI, S.; CASTIGLIA, D.; BERGELES, G. Design of a novel, intensified heat exchanger for reduced fouling rates. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 48, n. 18, p. 3817–3832, Aug. 2005.

ÇENGEL, Y. A. *Transferência de Calor e Massa*. **3**, p. 1–891, 2009.

CHO, Y. I.; CHOI, B. G.; DRAZNER, B. J. Electronic anti-fouling technology to mitigate precipitation fouling in plate-and-frame heat exchangers. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 41, n. 17, p. 2565–2571, 1 set. 1998. Acesso em: 12 Jul. 2023.

CHO, Y. i.; CHOI, B.-G. Validation of an electronic anti-fouling technology in a single-tube heat exchanger. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 42, n. 8, p. 1491–1499, Apr. 1999.

DE ARAUJO PEREIRA APA, J. **Simulação do escoamento na câmara de injeção de artefatos de limpeza de um dispositivo inovador de limpeza online de trocadores de calor**. 2023. Pontifícia Universidade Católica do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2023.

DE OLIVEIRA JUNIOR, V. H. **Validação metrológica de alternativa tecnológica para mitigação de incrustação em trocadores de calor**. 2015. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

DI PRETORO, A.; D'IGLIO, F.; MANENTI, F. Optimal Cleaning Cycle Scheduling under Uncertain Conditions: A Flexibility Analysis on Heat Exchanger Fouling. **Processes**, v. 9, n. 1, p. 93, 4 Jan. 2021.

DONG, W.; FRITTS, D. C.; LIU, A. Z.; LUND, T. S.; LIU, H.; SNIVELY, J. Accelerating Atmospheric Gravity Wave Simulations Using Machine Learning: Kelvin-Helmholtz Instability and Mountain Wave Sources Driving Gravity Wave Breaking and Secondary Gravity Wave Generation. *Geophysical Research Letters*, v. 50, n. 15, 16 Aug. 2023.

EZGI, C. Basic Design Methods of Heat Exchanger. *Em: Heat Exchangers - Design, Experiment and Simulation*. [s. l.] In Tech, 2017. p. 9–35.

FARMER, A. D.; COLLINGS, A. F.; JAMESON, G. J. Effect of ultrasound on surface cleaning of silica particles. **International Journal of Mineral Processing**, v. 60, n. 2, p. 101–113, Sep. 2000.

FESANGHARY, M.; DAMANGIR, E.; SOLEIMANI, I. Design optimization of shell and tube heat exchangers using global sensitivity analysis and harmony search algorithm. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 5–6, p. 1026–1031, Apr. 2009.

FETTAKA, S.; THIBAUT, J.; GUPTA, Y. Design of shell-and-tube heat exchangers using multi objective optimization. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 60, p. 343–354, May 2013.

FROTA, M. N.; CASTRO-PACHECO, E. R.; HERNÁNDEZ-VÁSQUEZ, J. D.; MARQUES DA SILVA, R. P. Alternative method for assessing the effectiveness of heat exchangers. **Measurement: Sensors**, v. 18, p. 100066, Dez. 2021.

FROTA, M. N.; HERNÁNDEZ-VÁSQUEZ, J. D.; CASTRO-PACHECO, E. R.; GERMANO, S. B.; BARRETO, J. T. Enhancing the Effectiveness of Hydrogenerator Heat Exchangers Through the Control of Measurement Uncertainties. Em: XIII Heat Exchanger Fouling and Cleaning Conference, 2019, Józefów (Warsaw). [...]. Józefów (Warsaw): Heat Exchanger Fouling and Cleaning, 2019.

FROTA, M. N.; HERNÁNDEZ-VÁSQUEZ, J. D.; DA SILVA, R. P. M.; GERMANO, S. B.; TRUYOLL, S. de L. H. Alternative Approaches for Real-time Monitoring of the Effectiveness of Hydrogenerator Heat Exchangers. **Heat Transfer Engineering**, p. 1–20, 18 Sept. 2023.

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, Feb. 2014.

FROTA M; VALENTE, G. **Relatório Final do Projeto de P&D Light/Aneel 5161-010/2016, intitulado: Cabeça de Série de um sistema inovador de limpeza de trocadores de calor de hidrogenadores.** [s. l: s. n.].

FROTA, M.; VALENTE, G. P. **Serially-produced head equipment of an innovative system for cleaning hydrogenator heat. Project Report P&D Light/Aneel 5161-010/2016 exchangers.** [s. l: s. n.].

GARCÍA GÓMEZ, S. **Aplicación de campos electromagnéticos en la eliminación y control de la película biológica en intercambiadores de calor tubulares refrigerados por agua de mar.** 2016. Universidad De Cantábria, Santander, Colombia, 2016. Access: 4 Feb. 2024.

HARCHE, R.; ABSI, R.; MOUHEB, A. Study of the fouling deposit in the heat exchangers of Algiers refinery. **International Journal of Industrial Chemistry**, v. 5, n. 2, p. 16, 24 Jun. 2014.

HELALIZADEH, A.; MÜLLER-STEINHAGEN, H.; JAMIALAHMADI, M. Mixed salt crystallisation fouling. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 39, n. 1, p. 29–43, Jan. 2000.

HUANG, C. Y.; LIN, C. H. Influence on the magnetic field on the scale formation in a microfluidic channel under a low Reynolds number flow. **Microfluidics and Nanofluidics**, v. 27, n. 6, p. 1–9, 1 jun. 2023. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10404-023-02647-2>>.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **heat and mass transfer - Incropera 6e Fundamentals of Heat and Mass Transfer**2007.

KAKAÇ, S.; LIU, H.; PRAMUANJAROENKIJ, A. **Heat Exchangers.** [s. l.] CRC Press, 2002.

KAPUSTENKO, P.; KLEMEŠ, J. J.; ARSENYEVA, O. Plate heat exchangers fouling mitigation effects in heating of water solutions: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 179, p. 113283, Jun. 2023.

KARVINEN, A.; AHLSTEDT, H. Comparison of Turbulence Models in Case of Jet in Crossflow Using Commercial CFD Code. *In: Engineering Turbulence Modelling and Experiments 6*. [s. l.] Elsevier, 2005. p. 399–408.

KAYS, M. W.; LONDON, L. A. **Compact Heat Exchangers**. 2. ed. [s. l.] McGraw-Hill Book Company, 1964.

KELVION HOLDING GMBH. **From GEA to Kelvion HISTORY**. Disponível em: <<https://www.kelvion.com>>. Access: 24 March. 2024.

KIESER, B.; PHILION, R.; SMITH, S.; MCCARTNEY, T. The application of industrial scale ultrasonic cleaning to heat exchanger. **Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning**, p. 336–366, 2011. Access: 25 Sept. 2023.

KOSYAKOV, S. I.; KULICHKOV, S. N.; CHKHETIANI, O. G.; TSYBULSKAYA, N. D. Mathematical simulation of the Kelvin—Helmholtz instability using the method of large particles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 231, p. 012028, 12 Fev. 2019.

KUKULKA, D. J.; LEISING, P. Evaluation of heat exchanger surface coatings. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 16, p. 2333–2338, Nov. 2010.

LASZCZYK, P. Simplified modeling of liquid-liquid heat exchangers for use in control systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 119, p. 140–155, Jun. 2017.

LEE, H.-H. **Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 18**. [s. l.] SDC publications, 2018.

LEGORRETA, C.; HINGE, S.; TONNER, J.; LOVATO, A. Plates — the next breakthrough in desalination. **Desalination**, v. 122, n. 2–3, p. 235–246, Jul. 1999.

LODES, T. W.; FIELD, B. J. The Challenge of Shell-and-Tube Heat Exchanger Mechanical Design. <https://doi.org/10.1080/01457638708962799>, v. 8, n. 3, p.

LUBICZ, S. B.; OLIVEIRA, K. C.; GERMANO, S. B.; BARBOSA, C. R. H.; FROTA, M. N.; VALENTE, G. Automação da circulação de esferas abrasivas: proposição de alternativa tecnológica inovadora de sistema de limpeza de trocadores de calor de hidrogeradores. Em: Anais digital do evento CITENEL-SEENEL, 2017, João Pessoa. [...]. João Pessoa: 2017.

MA, S.; LU, S.; MA, H.; MA, D.; ZHANG, H. Experimental study on the on-line cleaning system influencing the heat transfer performance of shell-tube heat exchanger. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 58, n. 11, p. 1897–1911, 1 Nov. 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-022-03207-0>>.

MANSUR, M. C. D.; SANTOS, C. P. dos; DARRIGRAN, G.; HEYDRICH, I.; CALLIL, C. T.; CARDOSO, F. R. Primeiros dados quali-quantitativos do mexilhão-dourado, *Limnoperna fortunei* (Dunker), no Delta do Jacuí, no Lago Guaíba e na Laguna dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil e alguns aspectos de sua invasão no novo ambiente. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 20, n. 1, p. 75–84.

MENESES-PRADO, L. P.; DÍAZ-PINILLA, L. I.; GONZÁLEZ, G. Dinámica de fluidos computacional en el análisis de intercambiadores de calor de coraza y tubos. **Revista UIS Ingenierías**, v. 18, n. 2, p. 237–244, 1 Jan. 2018.

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

MOKYR, J.; STROTZ, R. H. The Second Industrial Revolution, 1870-1914. Em: 2000, [...]. 2000.

MÜLLER-STEINHAGEN, H.; MALAYERI, M. R.; WATKINSON, A. P. Heat Exchanger Fouling: Environmental Impacts. **Heat Transfer Engineering**, v. 30, n. 10–11, p. 773–776, 19 Oct. 2009.

MÜLLER-STEINHAGEN, H.; MALAYERI, M. R.; WATKINSON, A. P. Heat exchanger fouling: Mitigation and cleaning strategies. Em: *Heat Transfer Engineering*, 3–4., 2011, [...]. 2011. v. 32, p. 189–196.

MÜLLER-STEINHAGEN, H.; ZHAO, Q.; HELALI-ZADEH, A.; REN, X.-G. The effect of surface properties on CaSO₄ scale formation during convective heat transfer and subcooled flow boiling. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 78, n. 1, p. 12–20, Feb. 2000.

MÜLLER-STEINHAGEN, H.; ZHAO, Q.; HELALI-ZADEH, A.; REN, X.-G. The effect of surface properties on CaSO₄ scale formation during convective heat transfer and subcooled flow boiling. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 78, n. 1, p. 12–20, Feb. 2000.

MULVANY, N.; TU, J. Y.; CHEN, L.; ANDERSON, B. Assessment of two-equation turbulence modelling for high Reynolds number hydrofoil flows. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, v. 45, n. 3, p. 275–299.

NUNES, J.; HALL BARBOSA, C. R.; GERMANO, S. B.; FROTA, M. N.; VALENTE, G. Sistema Optoeletrônico na Faixa do Infravermelho para Contagem de Esferas em Meios Turvos Infrared Optoelectronic System for Counting Spheres in Turbid Media. Em: *Anais do IX Congresso Brasileiro de Metrologia*, 2017,

OBOT, I. B.; MEROUFEL, A.; ONYEACHU, I. B.; ALENAZI, A.; SOROUR, A. A. Corrosion inhibitors for acid cleaning of desalination heat exchangers: Progress, challenges and future perspectives. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111760>>. Access: 12 July 2023.

OGBONNAYA, S. K.; AJAYI, O. O. Fouling phenomenon and its effect on heat exchanger: A review. **Frontiers in Heat and Mass Transfer**, v. 9, 2017. Acesso em: 12 Jul. 2023.

PEKAŘ, L. Introduction to heat exchangers. Em: **Advanced Analytic and Control Techniques for Thermal Systems with Heat Exchangers**. [s. l.] Elsevier, 2020. p. 3–27.

PÉREZ SÁNCHEZ, A.; PÉREZ SÁNCHEZ, E. J.; HEREDIA SÁNCHEZ, A.; PAZOS AMAYUELA, L. Diseño de un intercambiador de calor de serpentín para el enfriamiento de acetona. **Nexo Revista Científica**, v. 32, n. 01, p. 61–74, 2 Jul. 2019.

PÉREZ SÁNCHEZ, A.; VELAZCO ROSELL, O. A.; RANERO GONZÁLEZ, E.; PÉREZ SÁNCHEZ, E. J. Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de calor de doble tubo para el calentamiento de acetaldehído. **Nexo Revista Científica**, v. 35, n. 01, p. 01–21, 4 Apr. 2022.

PICÓN-NÚÑEZ, M.; POLLEY, G. T.; MEDINA-FLORES, M. Thermal design of multi-stream heat exchangers. **Applied Thermal Engineering**, v. 22, n. 14, p. 1643–1660, Oct. 2002.

POGIATZIS, T.; ISHIYAMA, E. M.; PATERSON, W. R.; VASSILIADIS, V. S.; WILSON, D. I. Identifying optimal cleaning cycles for heat exchangers subject to fouling and ageing. **Applied Energy**, v. 89, n. 1, p. 60–66, Jan. 2012.

REDDY, B. V. Fundamental heat transfer mechanism between bed-to-membrane water-walls in circulating fluidized bed combustors. **International Journal of Energy Research**, v. 27, n. 9, p. 813–824, jul. 2003.

RIOS, J. L. **Avaliação metrológica de um dispositivo servo-hidráulico para mitigação de incrustação em trocadores de calor industriais**. 2020. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2020.

RIOS, J. L.; FROTA, M. N.; HERNÁNDEZ-VÁSQUEZ, J. D.; BARBOSA, C. R. H. Monte Carlo Study of Online Cleaning Cycles of Hydrogenerator Heat Exchangers. **Heat Transfer Engineering**, v. 43, n. 22, p. 1946–1957, 16 dez. 2022.

RIOS, J. L.; GERMANO, S. B.; FROTA, M. N.; OLIVEIRA, E. J. A. de; SILVA FILHO, S. M. P. da. Sistema inteligente para ablução de trocadores de calor (Intelligent system for abluion of heat exchangers). Em: Anais do Metrologia 2017 / 9. Congresso Brasileiro de Metrologia (CBM), 2017, Fortaleza. [...].

RODRÍGUEZ, M. B. R.; RODRÍGUEZ, J. L. M.; FONTICIELLA, O. M. C.; LEITE, J. C. Ecological function according to entrance dissipation applied to the optimization of shell and tube heat exchangers. **ITEGAM- Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications (ITEGAM-JETIA)**, v. 1, n. 4, 2015.

SAHA, S. K.; RANJAN, H.; EMANI, M. S.; BHARTI, A. K. Fouling on Various Types of Enhanced Heat Transfer Surfaces. Em: **Springer Briefs in Applied Sciences and Technology**. [s. l.] Springer Verlag, 2020. p. 83–95.

SAHOO, A.; RADHAKRISHNAN, T. K.; RAO, C. S. Modeling and control of a real time shell and tube heat exchanger. **Resource-Efficient Technologies**, v. 3, n. 1, p. 124–132, March. 2017.

SCHLÜTER, F.; AUGUSTIN, W.; SCHOLL, S. Modeling local fouling resistances. Proceedings of the Heat Exchanger Fouling and Cleaning. **Heat Exchanger Fouling and Cleaning**, 2019. Disponível em: <www.heatexchanger-fouling.com>.

SEOL, S. H.; SERAGELDIN, A. A.; KWON, O. K. Experimental research on a heat pump applying a ball-circulating type automatic fouling cleaning system for fish farms. **Energies**, v. 13, n. 22, 2 Nov. 2020.

SILVA-YUMI, J.; MORENO ROMERO, T.; CHANGO LESCANO, G. Nanofluids, Synthesis and Stability - Brief Review. **ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.**, 29 Aug. 2021.

SINGH, D. K.; VILLAMAYOR, A.; LACHEHEB, L. Shell and tube heat exchanger progression fouling and its mitigation using chemical cleaning process. **AIP Conference Proceedings**, v. 2317, n. 1, 5 Feb. 2021. Disponible em: </aip/acp/article/2317/1/030003/1002211/Shell-and-tube-heat-exchanger-progression-fouling>. Access: 10 Jul. 2023.

SINGH DHAKAR, P.; TAUFUQ, A.; DHAKAR, P. S. A review study thermal behaviour of plate heat exchanger with various modifications in design. **Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)**, v. 7, p. 600–605, 20 Disponible em: <https://www.researchgate.net/publication/344361163>.

SU, J.; MA, M.; WANG, T.; GUO, X.; HOU, L.; WANG, Z. **Fouling corrosion in aluminum heat exchangers Chinese Journal of Aeronautics**. Chinese Journal of Aeronautics, 1 jun. 2015.

TENG, K. H.; KAZI, S. N.; AMIRI, A.; HABALI, A. F.; BAKAR, M. A.; CHEW, B. T.; AL-SHAMMA'A, A.; SHAW, A.; SOLANGI, K. H.; KHAN, G. Calcium carbonate fouling on double-pipe heat exchanger with different heat exchanging surfaces. 2017. Disponible em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2017.03.057>. Access: 12 July 2023.

TORNINCASA, S.; DI TORINO, P.; DI, F.; POLITECNICO, M.; TORINO, D. **THE FUTURE AND THE EVOLUTION OF CAD**. [s. l: s. n.].

VALDÉS ORTIZ, M. J.; ARDILA MARÍN, J. G.; MARTÍNEZ PÉREZ, A. F.; BETANCUR GÓMEZ, J. D. Análisis numérico vía Ansys de intercambiadores de calor con mejora pasiva: casos de estudio densidad del mallado y modelo de turbulencia. **Revista CINTEX**, v. 22, n. 1, p. 59–68, 2 Oct. 2017a.

VALDÉS ORTIZ, M. J.; ARDILA MARÍN, J. G.; MARTÍNEZ PÉREZ, A. F.; BETANCUR GÓMEZ, J. D. Análisis numérico vía Ansys de intercambiadores de calor con mejora pasiva: casos de estudio densidad del mallado y modelo de turbulencia. **Revista CINTEX**, v. 22, n. 1, p. 59–68, 2 Oct. 2017b.

WANG, L.; SUNDÉN, B.; MANGLIK, R. M. **Plate Heat Exchangers: Design, Applications and Performance**. United Kingdom: WIT Press Southampton, 2007. v. 11

XU, X.; XU, C.; LIU, J.; FANG, X.; ZHANG, Z. A direct absorption solar collector based on a water-ethylene glycol based nanofluid with anti-freeze property and excellent dispersion stability. **Renewable Energy**, v. 133, p. 760–769, Apr. 2019.

ZETTLER, H. U. Heat Exchanger Fouling and Cleaning Conference - 2019, Warsaw, Poland. **Heat Transfer Engineering**, v. 43, n. 15–16, p. 1269–1270, 8 Sep. 2022.

ZOGG, M. **History of Heat Pumps Swiss Contributions and International Milestones**. [s. l: s. n.].

ZOHURI, B. Heat Exchanger Types and Classifications. *Em: Compact Heat Exchangers*. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 19–56.

ZUÑIGA-CERROBLANCO, J. L.; HORTELANO-CAPETILLO, J. G.; COLLAZO-BARRIENTOS, J. C.; HERNANDEZ-GUERRERO, A. Análisis térmico e hidráulico de diferentes geometrías de tubos para mejorar el desempeño de un radiador de automóvil. **Revista de Ingeniería Industrial**, p. 13–23, 30 March 2020.

APÊNDICE A: Projeto Construtivo das Câmaras de artefatos de limpeza

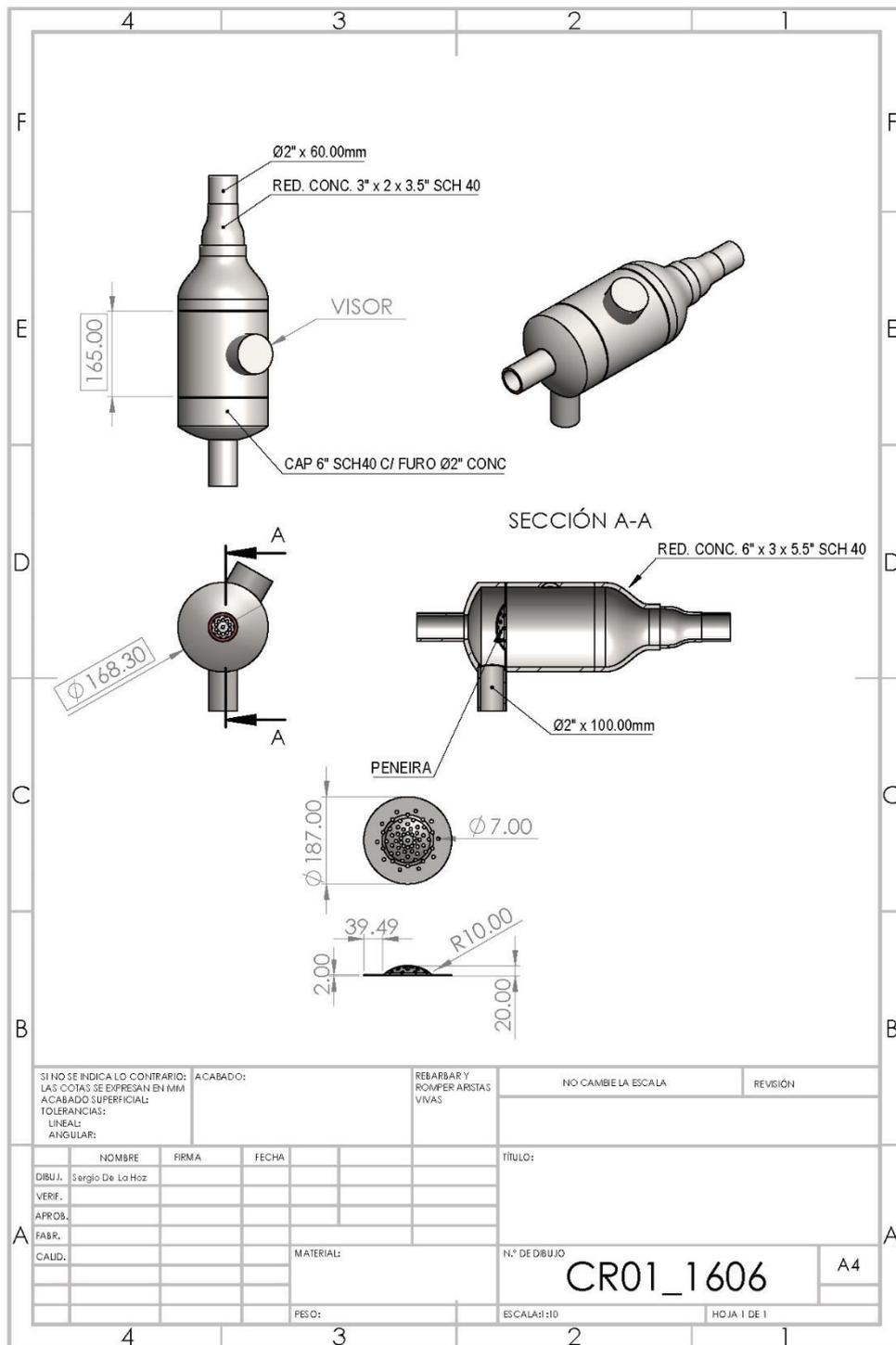


Figura A 1 - Desenho SolidWorks e dimensões da versão original da câmara de injeção

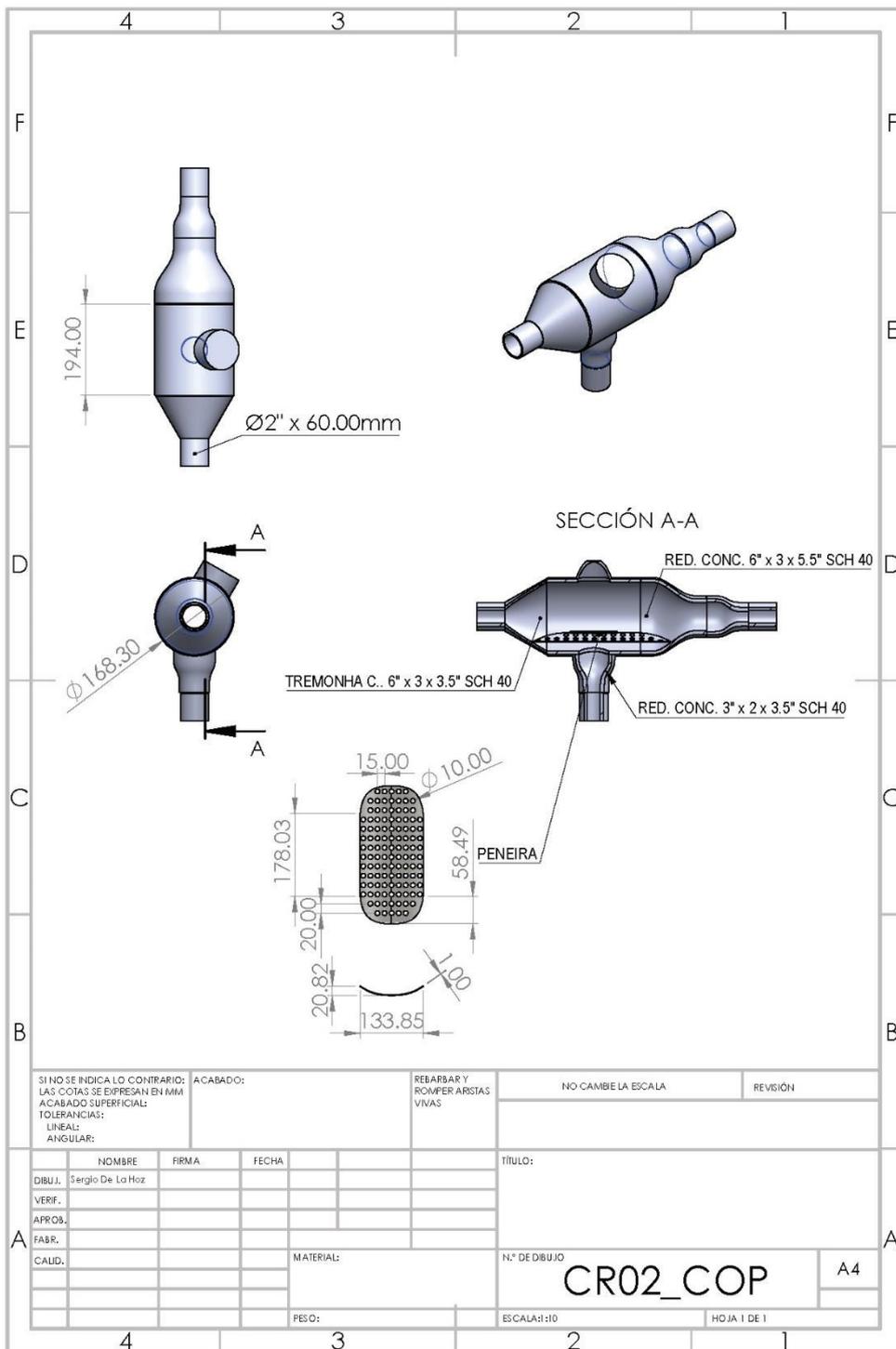


Figura A 2 - Desenho SolidWorks e dimensões da câmara de injeção modificada

APÊNDICE B: Confiabilidade dos resultados, convergência da simulação e teste de malhas

Com o intuito de assegurar confiança nos resultados das simulações numéricas desenvolvidas no presente estudo, faz-se necessário: (i) atingir o critério de convergência previamente definido para cada uma das equações de conservação resolvidas pelos métodos numéricos; (ii) conduzir o respectivo teste de malha (resolução espacial) para identificar a quantidade volumes de controle que garantem soluções numéricas independentes da malha; (iii) garantir que o valor do y^+ esteja acordo com o valor recomendado para o modelo $\kappa - \omega$ SST, *i.e.*: $y^+ < 5$ e iv) e realizar comparações numérico-experimental para identificar se a modelagem computacional utilizada foi capaz de reproduzir fidedignamente o fenômeno físico.

A seguir são apresentadas evidências de cada um dos quatro itens previamente mencionados.

B.1 Convergência da simulação

Conforme mencionado no Capítulo 5, a simulação numérica foi aprovada no teste de convergência tendo em vista que os resíduos numéricos das soluções das equações integradas de governo do escoamento atingiram os valores 10^{-3} (para as equações de conservação de momento e massa) e 10^{-4} (para as equações de $\kappa - \omega$ SST do modelo de turbulência). Para cada uma das equações de conservação resolvidas para o escoamento na câmara de injeção modificada, a Figura B1 ilustra a evolução dos resíduos em termos de cada iteração, até atingir cada um dos critérios de convergência. Comportamento análogo dos resíduos foram obtidos nas outras simulações.

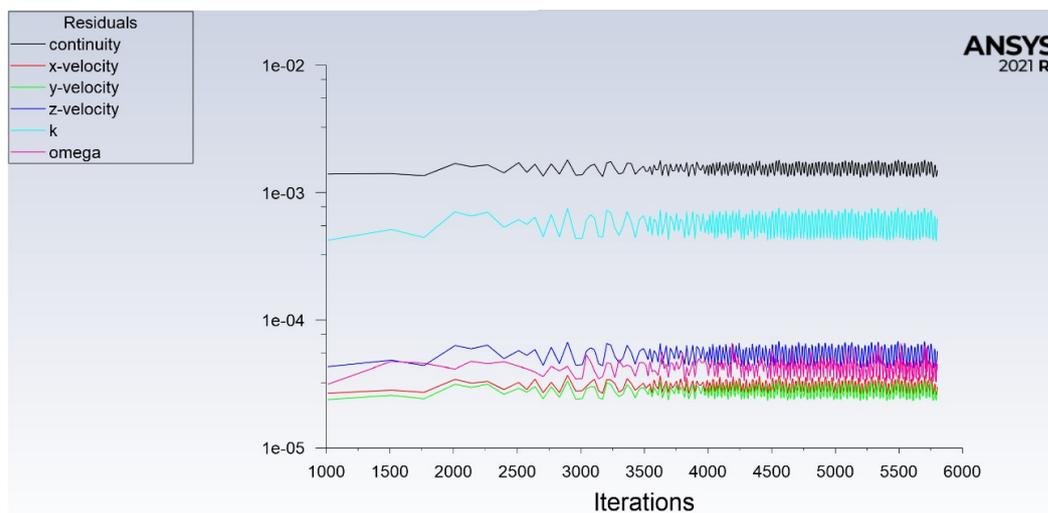


Figura B 1 - Evolução dos resíduos da solução das equações de conservação

B.2 Teste de malha

Visando garantir a independência da solução numérica da resolução espacial utilizada foi conduzido o teste de malha na câmara de injeção modificada. As malhas computacionais utilizadas para o teste apresentam, respectivamente, as seguintes dimensões: 1,3; 2,5 e 4 milhões de elementos. O teste foi conduzido a partir da avaliação da média de grandezas de interesse em determinados planos de referência. As grandezas físicas objeto da análise foram pressão, energia cinética turbulenta (TKE) e intensidade da turbulência (TI). A Tabela 4 ilustra o valor obtido para cada grandeza em termos da malha computacional utilizada. Ainda nesta tabela, é possível identificar a variação percentual da grandeza de interesse quando a malha aumenta de tamanho. Tabela 4. Teste de malha de cada grandeza utilizada

Tabela 4 - Teste de malha de cada grandeza utilizada

Malha (milhões de elementos)	$\bar{P}_{entrada}$ (Pa)	\overline{TKE}_{saida} (m^2/s^2)	\overline{TI}_{saida} (%)	Variação de $\bar{P}_{entrada}$	Variação de \overline{TKE}_{saida}	Variação de \overline{TI}_{saida}
4,0	633 133,40	0,1153	27,36	0,002 %	2,94 %	1,40 %
2,5	633 120,40	0,1120	26,98	0,008 %	17,25 %	7,80 %
1,3	633 067,20	0,0955	25,03			

Cabe observar na Tabela 4 que quando se aumenta o tamanho da malha computacional de 2,5 milhões para 4,0 milhões de elementos, as variações de pressão na entrada do domínio computacional ficam desprezíveis (0,002 %). Já em termos das grandezas turbulentas, as variações são maiores, *i.e.*, 2,94 % para TKE e 1,40 % para TI. As variações ligeiramente maiores para as grandezas turbulentas são esperadas considerando que o cálculo numérico destas grandezas depende da determinação de todas as derivadas de velocidade (hipótese de Boussinesq). Contudo, em termos dos objetivos do presente estudo, os resultados obtidos com as malhas de 2,5 e 4,0 milhões de elementos podem ser considerados aceitáveis. Em concordância com o teste de malha, o domínio computacional com 2,5 milhões de elementos poderia ser utilizado. Entretanto, objetivando um enfoque conservador, todas as malhas utilizadas para cada simulação tinham tamanhos superiores ou iguais a 3,0 milhões de elementos.

B.3 Conferência da distância adimensional Y^+

Na modelagem de turbulência pela abordagem $\kappa - \omega$ SST faz-se necessário garantir que a distância adimensional do primeiro ponto nodal à parede esteja dentro da subcamada laminar, *i.e.*, $y^+ < 5$. A Figura B2 confirma que o y^+ se manteve abaixo do valor-critério 5 em todo o domínio da simulação.

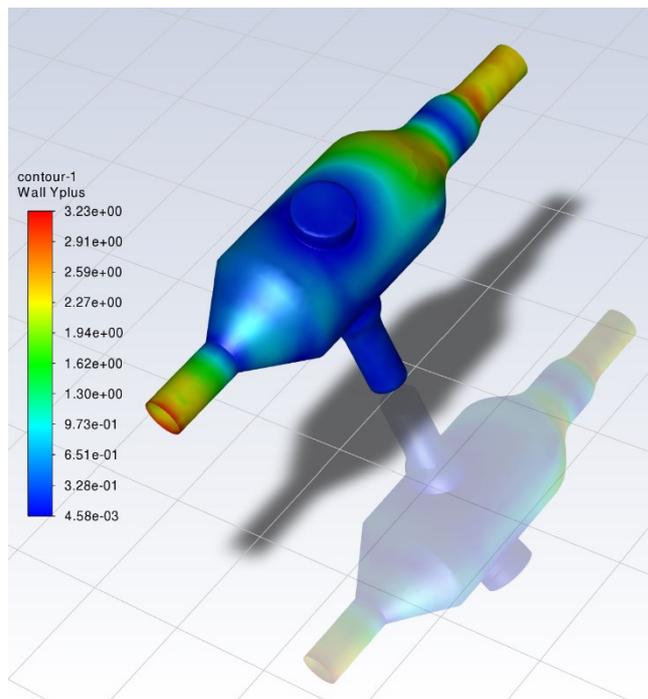


Figura B 2 - Campo do Y^+ na câmara de injeção modificada

B.4 Comparação numérico-experimental entre resultados

A comparação entre o valor medido por instrumentos calibrados e o valor simulado pelo código computacional *Fluent Ansys* foi apresentado e discutido no Capítulo 5, comprovando excelente concordância.