

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS GUARAPUAVA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

EDUARDO ANTONIO OSOVSKI

**ANÁLISE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL DA VÁLVULA
BORBOLETA DE UMA TURBINA FRANCIS**

**GUARAPUAVA
2021**

EDUARDO ANTONIO OSOVSKI

**ANÁLISE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL DA VÁLVULA
BORBOLETA DE UMA TURBINA FRANCIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Engenharia Mecânica, como
requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Mecânica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná – Campus
Guarapuava.

Orientador: Prof. Dr. David Lira Nuñez

GUARAPUAVA
2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Guarapuava
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação de Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL DA VÁLVULA BORBOLETA DE UMA TURBINA FRANCIS

por

EDUARDO ANTONIO OSOVSKI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 31 de agosto de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados.

Professor Dr. David Lira Nunez
(Professor Orientador)

Professor Dr. Sérgio Dalmás
(Membro da Banca)

Professora Dra. Raquel da Cunha Ribeiro da Silva
(Membro da Banca)

Professor Dr. Sérgio Dalmás
(Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica)

– O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

OSOVSKI, Eduardo A. **Análise fluidodinâmica computacional da válvula borboleta de uma turbina Francis**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

RESUMO

A análise fluidodinâmica computacional (CFD) tem alta aplicabilidade no setor industrial pois possibilita desenvolver processos de produção mais rápidos, eficientes e precisos com um menor custo, quando comparadas às análises experimentais. Essa ferramenta é utilizada para simular numericamente o comportamento de sistemas envolvendo escoamento de fluidos e, nos últimos anos, vem se mostrando uma ferramenta prática e moderna na pesquisa de ponta da dinâmica de fluidos. Nesse contexto, a oportunidade deste estudo consiste em analisar o escoamento interno em uma válvula borboleta de uma turbina Francis por meio de simulação numérica computacional e assim consolidar o potencial das teorias de mecânica dos fluidos e projetos de máquinas utilizando CAD (Projeto Assistido por Computador) e CFD. A abordagem metodológica DSR (Modelo de Pesquisa Científica) é utilizada para guiar o desenvolvimento do trabalho. Seguindo esta metodologia, foram realizadas simulações em um modelo inicial da válvula borboleta e após avaliar os resultados da simulação, efetuaram-se modificações nesta geometria com base na teoria de mecânica dos fluidos para então uma nova simulação ser gerada. Este processo iterativo de simulações e modificações ocorreu até que se alcançou uma geometria que apresentava escoamento interno com menor queda de pressão e reduzidas regiões de recirculação.

Palavras-chave: Fluidodinâmica Computacional (CFD). Válvula Borboleta. Simulação. Turbina Francis. Escoamento Interno.

OSOVSKI, Eduardo A. **Computational fluid dynamic analysis of a Francis turbine butterfly valve**. 2021. Completion of coursework to obtain a bachelor's degree in Mechanical Engineering – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

ABSTRACT

Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis has high applicability in the industrial sector as it enables the development of faster, more efficient and more accurate production processes at a lower cost, when compared to experimental analyses. This tool is used to numerically simulate the behavior of systems involving fluid flow and, in recent years, it has proven to be a practical and modern tool in cutting-edge fluid dynamics research. In this context, the opportunity of this study is to analyze the internal flow in a butterfly valve of a Francis turbine through computational numerical simulation and thus consolidate the potential of fluid mechanics theories and machine design using CAD (Computer Aided Design) and CFD. The DSR (Design Science Research) methodological approach is used to guide the development of the work. Following this methodology, simulations were carried out on an initial model of the butterfly valve and after evaluating the simulation results, modifications were made to this geometry based on the theory of fluid mechanics so that a new simulation could be generated. This iterative process of simulations and modifications took place until a geometry was reached that presented internal flow with less pressure drop and reduced regions of recirculation.

Keywords: Computational Fluid Dynamics (CFD). Butterfly Valve. Simulation. Francis Turbine. Internal Flow.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Vetor do campo de velocidades	21
Equação 2 – Vetor do campo de acelerações	21
Equação 3 – Número de Reynolds	24
Equação 4 – Vetor vorticidade	25
Equação 5 – Vetor taxa de rotação	25
Equação 6 – Vetor vorticidade em coordenadas cartesianas	26
Equação 7 – Perda de pressão	26
Equação 8 – Fator de atrito de Darcy	26
Equação 9 – Perda de carga devido atrito	26
Equação 10 – Perdas menores	27
Equação 11 – Conservação da massa	27
Equação 12 – Equação diferencial geral para conservação da massa	27
Equação 13 – Conservação da massa em coordenadas cartesianas	27
Equação 14 – Conservação do momentum linear	28
Equação 15 – Equação diferencial geral para conservação do momentum linear	28
Equação 16 – Equação de Navier-Stokes	28
Equação 17 – Componente x da equação de Navier-Stokes	28
Equação 18 – Componente y da equação de Navier-Stokes	29
Equação 19 – Componente z da equação de Navier-Stokes	29
Equação 20 – Potência hidráulica	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Custos de alterações nas diferentes fases de projeto	15
Figura 2 - Arranjo molecular do: (a) estado sólido, (b) estado líquido e (c) estado gasoso	20
Figura 3 - Comparativo de comportamento entre sólido e líquido sob uma força de cisalhamento	20
Figura 4 - Perfil de velocidades em escoamento externo (placa)	22
Figura 5 - Perfil de velocidades em escoamento interno (tubo)	22
Figura 6 - Transição laminar-turbulenta de um escoamento	23
Figura 7 - Simulação CFD da transição laminar-turbulenta de um escoamento	24
Figura 8 – Rotacionalidade de uma partícula	25
Figura 9 - Simulação CFD da aeronave hipersônica NASA X-43 voando a Mach 7	29
Figura 10 – Matriz energética brasileira de 2020	33
Figura 11 – Perfil esquemático de uma usina hidrelétrica	35
Figura 12 – Vista do nível superior da usina hidrelétrica de Itaipu	36
Figura 13 – Vista do nível inferior da usina hidrelétrica de Itaipu	36
Figura 14 – Sistema de tomada d’água	37
Figura 15 – Sistema de vertedouro	38
Figura 16 – Casa de força	39
Figura 17 – Diagrama queda líquida x vazão para seleção de turbina	40
Figura 18 – Vista explodida de turbina Francis	41
Figura 19 – Linha de eixo	41
Figura 20 – Representação de montagem de turbina Francis	42
Figura 21 – Válvula borboleta	43
Figura 22 – Válvula borboleta em corte	44
Figura 23 – Conjunto da válvula borboleta	45
Figura 24 – Etapas específicas do método DSR	47
Figura 25 - Interconectividade dos três estágios principais em uma análise de CFD	50
Figura 26 - Fases de uma análise CFD	51
Figura 27 - Malha híbrida com duas malhas estruturadas e uma não estruturada	51
Figura 28 - Procedimento de solução	53
Figura 29 - Monitoramento de convergência de coeficiente de elevação	55
Figura 30 – Escoamento de óleo na indústria	56
Figura 31 – Vista isométrica da geometria importada	59
Figura 32 – Vista frontal da geometria	59
Figura 33 – Geometria com remoção de elementos	59
Figura 34 – Geometria do: a) sistema de acionamento antes da simplificação, b) sistema de acionamento simplificado, c) flange antes da simplificação, d) flange simplificado	61
Figura 35 – Geometria simplificada	61
Figura 36 – Região de escoamento em domínio computacional	62
Figura 37 – Entrada e saída de água	63
Figura 38 – Escoamento em forma de partículas	65
Figura 39 – Vista isométrica do campo de velocidades do escoamento	65
Figura 40 – Vista lateral do campo de velocidades do escoamento	66
Figura 41 – Vista superior do campo de velocidades do escoamento	66
Figura 42 – Gráfico Queda de pressão (MPa) x Tempo (s)	67

Figura 43 – Disco, fixação da vedação e cubo da válvula borboleta	69
Figura 44 – Perfil de escoamento interno	69
Figura 45 – Disco, fixação da vedação e cubo modificados	70
Figura 46 – Perfil de escoamento modificado	70
Figura 47 – Escoamento em forma de partículas com geometria modificada	71
Figura 48 – Vista isométrica do campo de velocidades do escoamento com geometria modificada	72
Figura 49 - Vista lateral do campo de velocidades do escoamento com geometria modificada	72
Figura 50 - Vista superior do campo de velocidades do escoamento com geometria modificada	73
Figura 51 – Gráfico Queda de pressão (MPa) x Tempo (s) (geometria modificada)	73
Figura 52 – Comparativo do campo de velocidades	76
Figura 53 – Gráfico comparativo de queda de pressão	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo de softwares CFD	32
Quadro 2 – Propriedades Físicas da água	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Método DSR	47
Tabela 2 – Tipos de artefato	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVC	Acidente Vascular Cerebral
BEN	Balanco Energético Nacional
CAD	Projeto Assistido por Computador (do inglês - <i>Computer-Aided Design</i>)
CAE	Engenharia Assistida por Computador (do inglês - <i>Computer-Aided Engineering</i>)
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (do inglês - <i>Computational Fluid Dynamics</i>) ou Fluidodinâmica Computacional
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CSD	Dinâmica Estrutural Computacional (do inglês - <i>Computational Structural Dynamics</i>)
DSR	<i>Design Science Research</i>
EPE	Empresa de Pesquisa de Energia
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UHE	Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	JUSTIFICATIVA	16
1.2.	OBJETIVOS	18
1.2.1.	Objetivo Geral	18
1.2.2.	Objetivos Específicos	18
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1.	MECÂNICA DOS FLUIDOS	19
2.1.1.	O que é um fluido?	19
2.1.2.	Propriedades de um Escoamento	21
2.1.3.	Condição de não Escorregamento	21
2.1.4.	Escoamento Laminar e Escoamento Turbulento	23
2.1.5.	Vorticidade e Rotacionalidade	25
2.1.6.	Queda de Pressão e Perda de Carga	26
2.1.7.	Euações de Transporte	29
	2.1.7.1. Conservação da Massa - Equação da Continuidade	29
	2.1.7.2. Conservação da Quantidade de Movimento	30
	2.1.7.3. Equação de Navier-Stokes	31
2.1.8.	Dinâmica dos Fluidos Computacional	26
2.1.9.	Softwares De Simulação Fluidodinâmica	31
2.2.	UNIDADES GERADORAS DE ENERGIA ELÉTRICA	33
2.2.1.	Balanco Energético Nacional	33
2.2.2.	Estrutura de unidades hidráulicas geradoras de energia	35
	2.2.2.1. Barragem hidrelétrica	37
	2.2.2.2. Tomada d'água	37
	2.2.2.3. Vertedouros	38
	2.2.2.4. Casa De Força	38
2.2.3.	Turbina Francis	39
3.	ASPECTOS METODOLÓGICOS	46
3.1.	IDENTIFICAÇÃO DA OPORTUNIDADE DE PESQUISA E MOTIVAÇÃO	48
3.2.	DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DA SOLUÇÃO	49
3.3.	CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO	50
3.3.1.	Pré-processamento	50
	3.3.1.1. Criação da Geometria	51
	3.3.1.2. Geração de Malha	51
	3.3.1.3. Propriedades Físicas do Fluido	52
	3.3.1.4. Condições de Contorno	52
3.3.2.	Solucionador	53
	3.3.2.1. Controle da Solução	54
	3.3.2.2. Monitoramento de Convergência	54
3.4.	DEMONSTRAÇÃO	55
3.5.	AVALIAÇÃO E COMUNICAÇÃO	57
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1.	GEOMETRIA INICIAL	58
4.1.1.	Concepção E Desenvolvimento	58
	4.1.1.1. Criação Da Geometria	59
	4.1.1.2. Geração De Malha	62
	4.1.1.3. Propriedade Físicas Do Fluido	63

4.1.1.4.	Condições De Contorno	63
4.1.1.5.	Controle De Solução	64
4.1.1.6.	Monitoramento De Convergência	64
4.1.2.	Demonstração	64
4.1.3.	Avaliação	67
4.2.	MODIFICAÇÕES NA GEOMETRIA	68
4.3.	GEOMETRIA MODIFICADA	71
4.3.1.	Concepção E Desenvolvimento	71
4.3.2.	Demonstração	71
4.3.3.	Avaliação E Comunicação	74
5.	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	78

1. INTRODUÇÃO

A mecânica dos fluidos é, conceitualmente, o ramo da mecânica que estuda o comportamento físico dos fluidos e de suas propriedades (FOX et al., 2018). Mesmo que despercebidamente, os fluidos estão estreitamente presentes na vida cotidiana. Alguns exemplos disso são: sistemas de ventilação e ar condicionado residencial, sistemas de canais e represas e em projetos de meios de transporte, sejam eles veículos automotores, barcos ou aviões. Basicamente, quando se pensa no assunto nota-se que quase tudo no planeta é um fluido ou se move em um fluido ou próximo dele (WHITE, 2018).

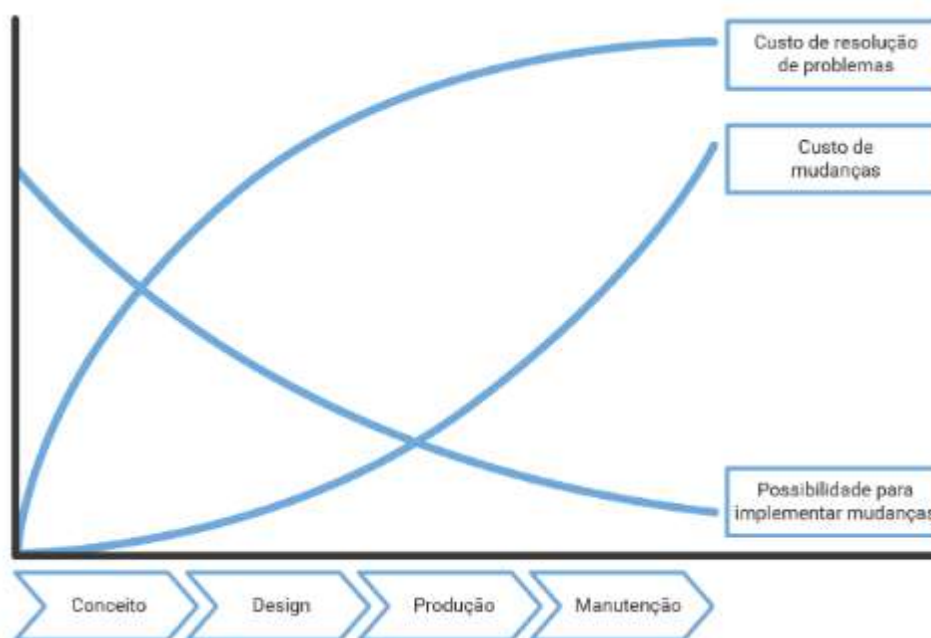
Na engenharia, a mecânica dos fluidos constitui a base de diversas disciplinas específicas como: hidráulica e hidrologia na engenharia civil, estudo de difusão de poluentes no ar, água e solo na engenharia ambiental, aerodinâmica e hidrodinâmica na engenharia aeronáutica e estudo de motores, compressores e turbinas na engenharia mecânica (BISTAFA, 2018). Quando se diz respeito à última, o escoamento de fluidos pode ser subdividido em escoamento externo (quando o fluido não é confinado por paredes) como é o caso de escoamento de ar sob a superfície de um veículo e, escoamento interno (quando existem fronteiras que limitam o escoamento) como no exemplo do escoamento de água em uma tubulação.

Apesar do extenso estudo e alta aplicabilidade da mecânica dos fluidos, quando se diz respeito à resolução de problemas, na atualidade é muito difícil que estes sejam resolvidos sem utilizar ferramentas computacionais, pois o método de resolução é complexo e muitas vezes gera novas possibilidades de análise (WHITE, 2018). Além disso, por vezes é necessária a prototipagem física do projeto e constantes processos de retrabalho acumulando horas de trabalho perdidas que encarecem seu projeto. Portanto, para resolução de problemas fluidodinâmicos costuma-se utilizar uma técnica de aproximação conhecida como dinâmica dos fluidos computacional (CFD – do inglês *Computational Fluid Dynamics*).

A economia gerada pela utilização de ferramentas CFD pode ser expressa por duas vias. A primeira via se refere aos custos intrínsecos de pesquisa e desenvolvimento, uma vez que as empresas costumam possuir limitações de orçamento e um bom gerenciamento de recursos se torna peça chave para se estar à frente das concorrentes. Em uma análise comparativa dos custos de simulações computacionais frente aos custos de prototipagens o resultado aponta para um custo mais elevado no segundo caso devido ao valor da fabricação de componentes e na construção do protótipo. A segunda via está ligada à redução dos custos de reprojeto. As

ferramentas de simulação têm o poder de prever os problemas de projeto ainda em etapas preliminares, adiando a solução e evitando alterações em etapas mais avançadas que são mais caras (CREATIVE, 2019). A Figura 1 ilustra um gráfico que representa as curvas de custos de resolução de problemas e custos de mudanças nas diferentes fases de projeto.

Figura 1 – Custos de alterações nas diferentes fases de projeto



Fonte: Adaptado (CREATIVE, 2019)

Ao passar dos anos, as tecnologias em vários âmbitos vêm sendo aprimoradas. Algo diferente disso não ocorre no setor industrial, novas tecnologias estão sendo utilizadas como meio de desenvolver processos de produção mais eficientes, mais rápidos e de menor custo, priorizando o aumento na qualidade, precisão dos resultados e redução de danos (LAUBE, 2016).

Conceitualmente, o CFD é uma ferramenta utilizada para simular numericamente o comportamento de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, fluidos supersônicos, sistemas multifásicos, transferência de calor e fenômenos associados (como reações químicas e combustão) por meio de simulação em computador. Esta ferramenta soluciona equações matemáticas baseadas nas quatro leis básicas de conservação (massa, energia, momentum linear e momentum angular) sobre uma região de interesse com condições de contorno pré-estabelecidas (ÇENGEL; CIMBALA, 2015; WHITE, 2018).

O CFD é usualmente utilizado para obter detalhes sobre o campo de escoamento como as tensões de cisalhamento, linhas de corrente e perfis de velocidade, pressão ou para calcular as propriedades globais do sistema analisado como forças de sustentação e de arrasto (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

O resultado da popularização dos softwares CFD foi o aperfeiçoamento desses programas no decorrer dos últimos anos, impulsionado pela grande concorrência entre as diversas empresas do ramo. O cenário atual apresenta uma grande ênfase na simulação, automação, gerenciamento de projetos e otimização. As simulações mais complexas costumam ser muito exigentes para computadores comuns, por esse motivo, existem esforços no sentido de criar projetos de CFD na nuvem e permitir a colaboração da equipe por meio de aplicativos e outros dispositivos móveis. Outra demanda moderna crescente dos usuários requer a integração do CFD com os populares sistemas de Projeto Assistido por computador (CAD – do inglês *Computer Aided Design*), diferente da maioria dos aplicativos CFD que oferecem modelagem e design nativos (TEC, 2019).

Conforme Balanço Energético Nacional (BEN) de 2021, a energia elétrica no Brasil é majoritariamente hidráulica proveniente de unidades geradoras de energia. Estas unidades dispõem de turbinas hidráulicas que convertem a energia hidráulica em energia mecânica no eixo que é acoplado a um gerador de energia elétrica. As unidades hidráulicas de geração de energia são responsáveis por gerar aproximadamente dois terços da energia elétrica consumida no país. Por isso, todos os ganhos e otimizações nos elementos que compõem as turbinas são relevantes.

Inserido nesse cenário e tendo como objetivo consolidar o potencial das teorias de mecânicas dos fluidos e projetos de máquinas com ferramentas computacionais, este trabalho tem como objetivo analisar o escoamento interno em uma válvula borboleta de uma turbina Francis horizontal através de simulação numérica computacional utilizando um software CFD.

1.1. JUSTIFICATIVA

Conforme abordado na introdução deste trabalho, a utilização de simulações em softwares CFD é tendência em pesquisas acadêmicas na engenharia e na elaboração de projetos no setor industrial. Esta ferramenta permite processos de produção mais rápidos e de menor custo com resultados mais precisos.

Além dos aspectos econômicos positivos e vantagens na utilização dos softwares CFD citadas anteriormente, outro fator importante na justificativa da escolha deste tema está relacionada ao grande número de publicações que utilizam essa ferramenta como chave para a resolução de problemas e desenvolvimento de novas tecnologias. Alguns exemplos dessas publicações são:

- Estudo de misturadores e agitadores;
- Modelagem de trocadores de calor;
- Aerodinâmica de aeronaves, projéteis e automóveis;
- Simulação em ambientes com atmosfera controlada;
- Simulações na área da biologia e medicina;
- Transferência de calor na queima de biomassa em caldeiras;
- Refrigeração de microcomponentes, motores e reatores nucleares;
- Modelagem de componentes hidráulicos.

As vantagens econômicas relacionadas à utilização do CFD são apresentadas em pesquisas científicas. Um exemplo deste tipo de publicação é o artigo intitulado como “Experimentos e investigações CFD de curvas de 45 e 90 graus e os efeitos da variação dos raios de curvatura do cotovelo na erosão de partículas sólidas”. Os danos causados por partículas sólidas presas em fluidos que impactam nas paredes da superfície interna de gasodutos causam à indústria de petróleo e gás o prejuízo de centenas de milhões de dólares por ano. A falha dos dutos acontece principalmente em cotovelos que mudam a direção do fluxo, por isso, neste estudo realizou-se simulações CFD em cotovelos de 45 e 90 graus com diferentes curvaturas no intuito minimizar a erosão de partículas sólidas dos mesmos (BILAL; SEDREZ; SHIRAZI, 2021).

Já a publicação “Uma comparação abrangente de vários modelos CFD específicos do átrio esquerdo para pacientes com fibrilação atrial” aponta a utilização de simulações CFD em modelos de átrios criados a partir de exames de imagem de pacientes. Estas simulações fornecem informações importantes sobre o fenômeno da fibrilação atrial e auxiliam durante a seleção de terapias e procedimentos cirúrgicos. O risco de um Acidente Vascular Cerebral (AVC) é cinco vezes maior em pacientes com fibrilação atrial. A taxa de incapacidade e mortalidade de pacientes que sofrem AVC é elevada, gerando gastos com saúde estimados em cerca de US\$ 26 bilhões nos Estados Unidos no último ano (DUEÑAS-PAMPLONA et al., 2021).

No artigo intitulado “Caracterização CFD e otimização do fenômeno da cavitação em bombas centrífugas de dragagem” indica a utilização de simulações fluidodinâmicas multifásicas em bombas de dragagem a fim de determinar a faixa que o equipamento pode operar sem cavitação. O CFD complementa os testes, reduzindo os esforços e custos necessários para procedimentos experimentais para levantamento de dados (RAMIREZ et al., 2020).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo principal, realizar a análise fluidodinâmica de escoamento interno em uma válvula borboleta de uma turbina Francis. Realizando alterações na geometria do equipamento, seguidas de simulações em busca de uma geometria otimizada.

Para alcançar este objetivo foram definidos alguns objetivos específicos relacionados a seguir.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar conceitos de mecânica dos fluidos e equações de análise diferencial de escoamento de fluidos com a finalidade de construir uma base conceitual para o CFD;
- Apresentar o contexto, vantagens e aplicabilidade do CFD na engenharia mecânica;
- Introduzir os principais estágios presentes na estrutura de uma análise fluidodinâmica computacional;
- Gerar a simulação fluidodinâmica da válvula borboleta do modelo original. Logo, apresentar os resultados da simulação;
- Alterar a geometria da válvula borboleta em busca daquela que apresenta menores regiões de recirculação e quedas de pressão reduzidas;
- Apresentar as modificações de projeto entre modelo original e modelo final;
- Gerar a simulação fluidodinâmica da válvula borboleta no estado final. Assim, apresentar os resultados da simulação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.1 MECÂNICA DOS FLUIDOS

O estudo da Mecânica é o mais antigo dentre as ciências. Este estudo é subdividido em dois ramos: um que trata de corpos em repouso (estática) e outro que trata de corpos em movimento sob a influência de forças (dinâmica). A mecânica dos fluidos é uma das subdivisões da Mecânica e pode ser definida como a ciência que faz o estudo dos fluidos em repouso (estática dos fluidos) ou em movimento (dinâmica dos fluidos) (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

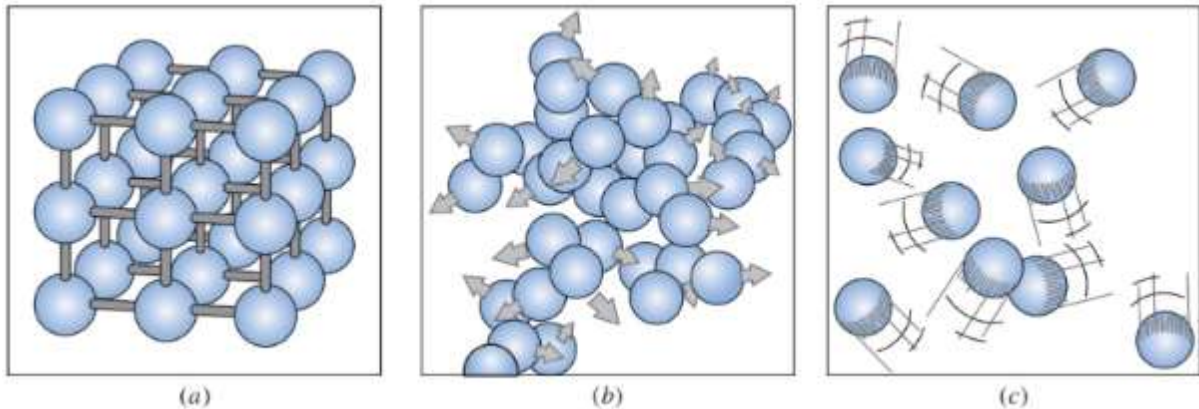
Tanto gases quanto líquidos são fluidos e têm aplicações nas mais diversas áreas da engenharia. Motores, bombas, ventiladores e turbinas são alguns exemplos de aplicações na indústria em geral. Além desses, há aplicações na área biológica como no estudo da circulação sanguínea e respiração; em projetos de sistemas de canais, diques e represas; na indústria química em sistemas de bombeamento e na construção civil no projeto de tubulações e dutos em sistemas de água e condicionamento de ar de edificações (FOX et al., 2018; WHITE, 2018).

2.1.1.1. O QUE É UM FLUIDO?

Na natureza, os meios materiais podem ser encontrados em três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. O estado sólido é o mais fácil de ser descrito com precisão, pois em geral, os átomos ou moléculas que o compõem estão dispostos de maneira ordenada e estão bem unidos devido a existência de forças intermoleculares intensas agindo sobre eles. Outro fator que explica a forma ordenada dos sólidos é sua estrutura cristalina bastante regular formada da repetição em cadeia de células unitárias. Os líquidos, por sua vez, apresentam ligações menos intensas e suas partículas se deslocam tornando sua disposição pouco organizada. Já no estado gasoso, a força de ligação entre as moléculas é praticamente inexistente e podem ser consideradas independentes entre si (BISTAFA, 2018; KOTZ et al., 2015).

A Figura 2 ilustra o comportamento das moléculas nos três estados físicos fundamentais.

Figura 2 - Arranjo molecular do: (a) estado sólido, (b) estado líquido e (c) estado gasoso

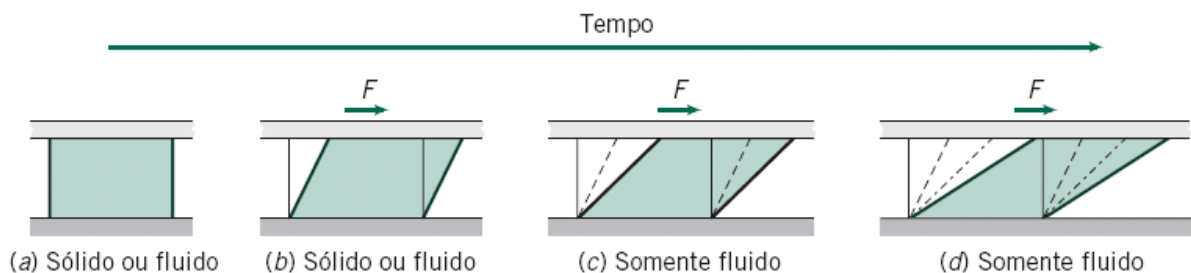


Fonte: (ÇENGEL; CIMBALA, 2015) p. 03.

Na mecânica dos fluidos toda matéria é encontrada em apenas dois estados, o fluido e o sólido. A diferença técnica entre os dois estados está relacionada à reação da matéria sob aplicação de uma tensão de cisalhamento ou tangencial de qualquer magnitude. Um sólido pode resistir a essa tensão de cisalhamento ao contrário de um fluido (WHITE, 2018).

Experimentalmente, podemos verificar a diferença de comportamento entre sólidos e fluidos posicionando o material entre duas placas paralelas, conforme ilustrado na Figura 3 (a), e depois aplicando uma força de cisalhamento F em uma das placas. Ambos os materiais têm característica de sofrer deformação inicial como visto na Figura 3 (b), mas se a tensão for mantida, só o fluido continuará deformando com o passar do tempo como ilustra as Figuras 3 (c) e 3 (d) (FOX et al., 2018).

Figura 3 - Comparativo de comportamento entre sólido e líquido sob uma força de cisalhamento



Fonte: (FOX et al., 2018) p. 04.

O conceito de fluido é formalmente definido por Fox (2018, p. 04) como “uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento

(tangencial), não importando o quão pequeno seja seu valor. Como o movimento do fluido continua sobre a aplicação dessa tensão, definimos um fluido também como uma substância que não pode suportar uma tensão de cisalhamento quando em repouso”.

2.1.2. PROPRIEDADES DE UM ESCOAMENTO

Para solucionar problemas envolvendo escoamentos, o conhecimento de algumas propriedades é fundamental. Entre estas, o conhecimento do campo de velocidades e das propriedades termodinâmicas dos fluidos são a base para solucionar a maioria destes problemas (WHITE, 2018).

De modo geral, o campo de velocidades pode ser definido como uma função vetorial que relaciona a posição das partículas do escoamento no decorrer do tempo. Esta função possui três componentes convencionadas por u , v e w sendo cada componente um campo escalar (WHITE, 2018; ÇENGEL; CIMBALA, 2015)).

$$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t) = u(x, y, z, t)\vec{i} + v(x, y, z, t)\vec{j} + w(x, y, z, t)\vec{k} \quad (1)$$

Analogamente, o vetor aceleração é dado pela derivação em função do tempo do vetor velocidade.

$$\vec{a} = \vec{a}(x, y, z, t) = \frac{d\vec{V}(x, y, z, t)}{dt} \quad (2)$$

Apesar do campo de velocidades ser a principal propriedade de um escoamento, outras três propriedades termodinâmicas são fundamentais para defini-lo. São elas: pressão (P), massa específica (ρ) e temperatura (T) (WHITE, 2018).

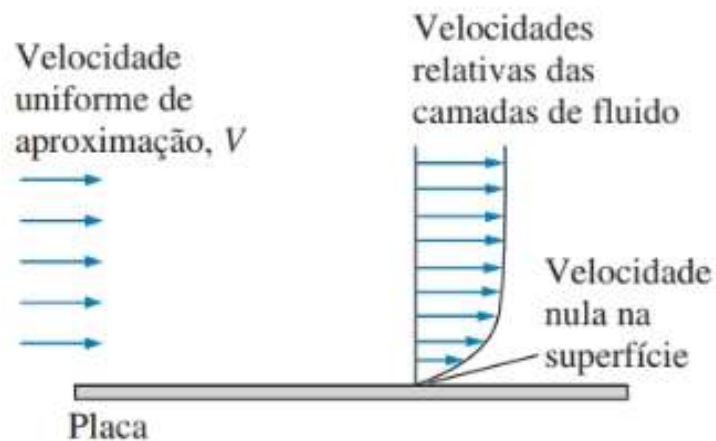
2.1.3. CONDIÇÃO DE NÃO ESCORREGAMENTO

Um fluido pode estar em regime de escoamento interno quando existem fronteiras que o limitam, ou externo quando não há limitações de paredes. Para ambos os casos, o contato do fluido com a superfície sólida sobre a qual escoar, cria uma fina camada de aderência na superfície do sólido onde não há escorregamento. Este fato é conhecido como condição de não

escorregamento (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). As interações moleculares tendem a equilibrar a quantidade de movimento entre o fluido e a superfície sólida, como resultado disso, sólido e fluido tendem a assumir uma mesma velocidade na superfície de contato (WHITE, 2018).

Na Figura 4 a seguir é possível verificar a interferência da camada de não escorregamento na construção do perfil de velocidades no caso de escoamento externo.

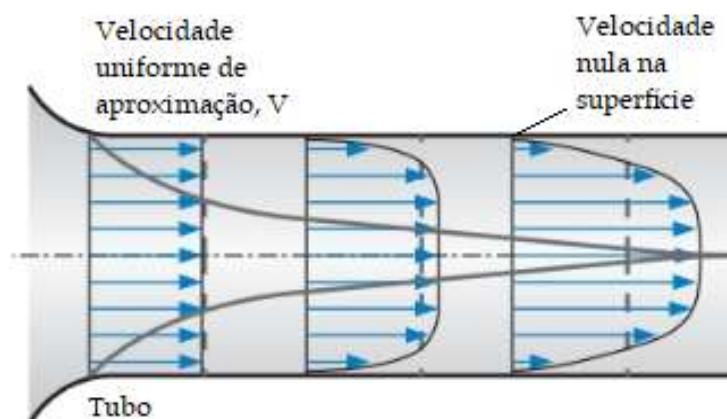
Figura 4 - Perfil de velocidades em escoamento externo (placa)



Fonte: (ÇENGEL; CIMBALA, 2015) p. 09.

A Figura 5 ilustra a interferência da camada de não escorregamento no caso de escoamento interno.

Figura 5 - Perfil de velocidades em escoamento interno (tubo)



Fonte: Adaptado (ÇENGEL; CIMBALA, 2015) p. 351.

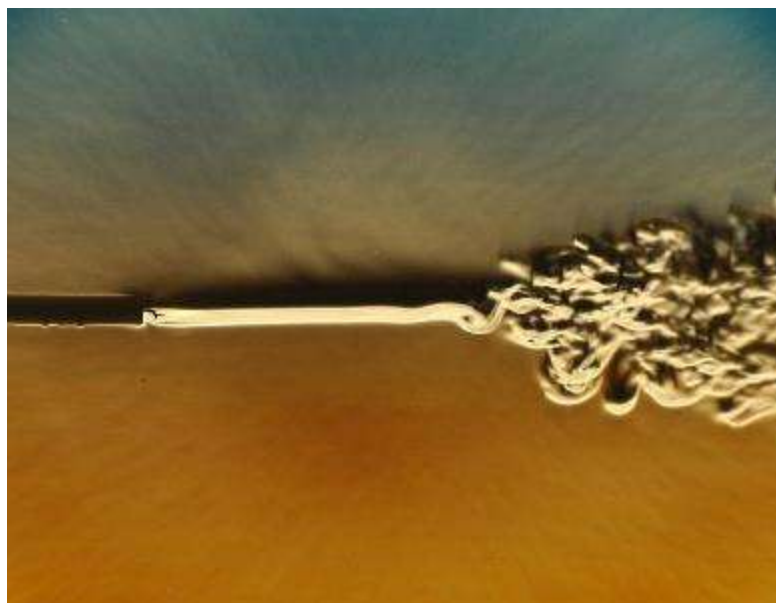
No escoamento externo da Figura 4, o resultado do fluido aderindo na superfície do sólido gera um gradiente de velocidades não linear. Isso acontece, pois, a camada de velocidade nula desacelera a camada de fluido adjacente, que por sua vez, desacelera outra adjacente a ela até encontrar um estado de uniformidade da velocidade do fluido (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). Analogamente ao escoamento externo, no escoamento interno o mesmo acontece, o fluido adere nas paredes internas da superfície por onde escoar desenvolvendo um perfil de velocidades parabólico como visto na Figura 5.

A condição de não escorregamento é responsável pelo desenvolvimento do perfil de velocidades devido a interação sólido-fluido. A fina camada de aderência que causa esta interação é chamada de camada limite (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

2.1.4. ESCOAMENTO LAMINAR E ESCOAMENTO TURBULENTO

O regime de escoamento de um fluido pode ser laminar, turbulento ou estar em uma fase de transição entre os dois, chamado de regime transitório. Este estado depende da relação entre forças inerciais e viscosas relacionadas a ele. O escoamento é laminar quando o fluido escoar em lâminas ou camadas com movimento altamente ordenado, e turbulento quando escoar em um movimento desordenado com flutuações de velocidade (ÇENGEL; CIMBALA, 2015; FOX et al., 2018). A Figura 6 ilustra o escoamento de um fluido na transição de laminar para turbulento.

Figura 6 - Transição laminar-turbulenta de um escoamento



Fonte: (METU, 2018)

Em 1880, Osborne Reynolds experimentalmente encontrou uma razão que relaciona o escoamento interno em tubos com as forças inerciais e viscosas dos fluidos. Esta razão é chamada de número de Reynolds (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

$$Re = \frac{\text{Forças inerciais}}{\text{Forças viscosas}} = \frac{V_{med}D}{\nu} \quad (3)$$

Onde

V_{med} é a velocidade média de escoamento (m/s);

D é o diâmetro do tubo (m);

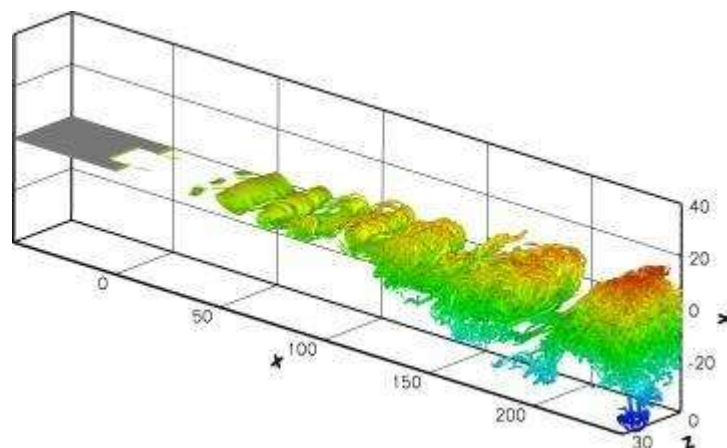
ν é a viscosidade cinemática (m²/s).

O experimento de Reynolds verificou que o regime de transição laminar-turbulento ocorria em $Re \approx 2300$ e este valor passou a ser chamado de Reynolds crítico. Contudo, esse valor pode variar de acordo com às condições experimentais tais como rugosidade superficial e vibrações da água no tanque (BISTAFA, 2018). Apesar da variação desses valores, as faixas de números de Reynolds aceitas na prática são:

- $Re \leq 2300$, escoamento laminar
- $2300 \leq Re \leq 4000$, escoamento transitório
- $Re \geq 4000$, escoamento turbulento

A Figura 7 representa o complexo processo da transição laminar-turbulenta.

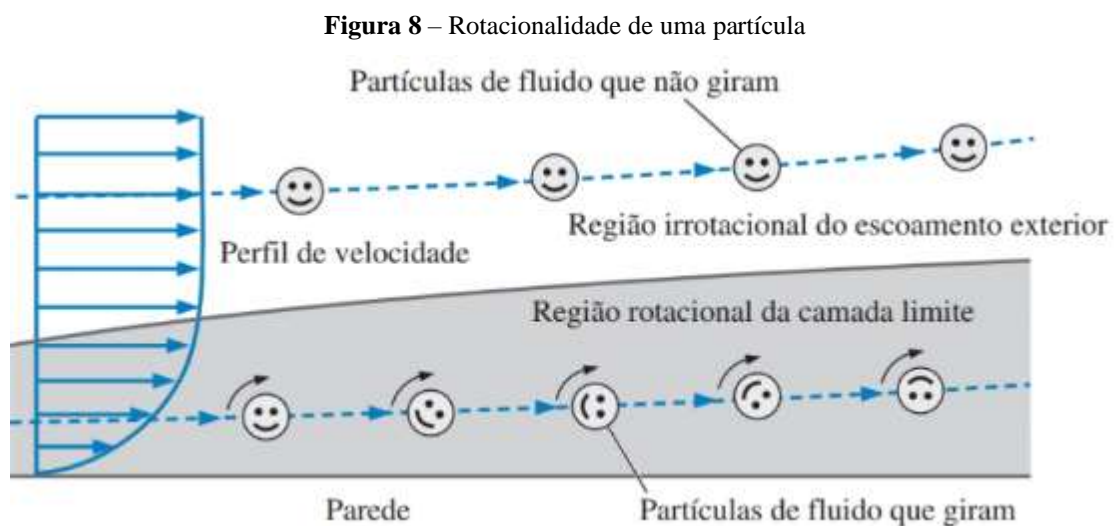
Figura 7 - Simulação CFD da transição laminar-turbulenta de um escoamento



Fonte: (BABUCKE; RIST; KLOKER, 2008)

2.1.5. VORTICIDADE E ROTACIONALIDADE

Na análise de escoamentos, a vorticidade tem grande importância física. Esta grandeza quantifica a rotação das partículas de um fluido. Se a vorticidade em um ponto do campo de escoamento se difere de zero, pode-se dizer que a partícula que ocupa este ponto está rotacionando, ou seja, o escoamento na região do ponto é rotacional. Analogamente, se a vorticidade em um determinado ponto é igual a zero, isso implica que o escoamento na região do ponto é irrotacional (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). A Figura 8 a seguir ilustra a rotacionalidade das partículas.



Fonte: (ÇENGEL; CIMBALA, 2015) p. 157.

A partir do vetor velocidade do escoamento é possível definir o vetor vorticidade ($\vec{\zeta}$) (WHITE, 2018)).

$$\vec{\zeta} = \vec{\nabla} \times \vec{V} = \text{rot}(\vec{V}) \quad (4)$$

Já o vetor da taxa de rotação ($\vec{\omega}$) pode ser definido como a metade do vetor vorticidade (WHITE, 2018).

$$\vec{w} = \frac{1}{2} \vec{v} \times \vec{v} = \frac{1}{2} \text{rot}(\vec{v}) = \frac{\vec{\zeta}}{2} \quad (5)$$

A rotação das partículas acontece nas proximidades da camada limite e no escoamento por turbomáquinas. A Figura 8 apresenta o conceito de rotacionalidade com partículas rotacionando junto a camada limite e não rotacionando conforme o fluido se distancia da parede (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

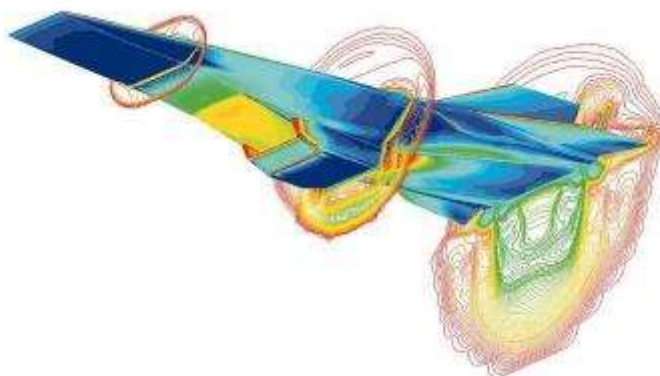
Em coordenadas cartesianas a Equação 4 pode ser expressa pela equação a seguir.

$$\vec{\zeta} = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (6)$$

2.1.6. DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

A dinâmica de fluidos computacional ou CFD é a análise de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, como reações químicas por meio de simulação em computador. A técnica é muito poderosa e abrange uma ampla gama de áreas de aplicação industrial e não industrial. Alguns exemplos dessas aplicações são: aerodinâmica de aeronaves e veículos, geração de energia, meteorologia, hidrologia e oceanografia, engenharia de processos químicos, ventilação, engenharia civil e ambiental e engenharia aeroespacial (TU; YEOH; LIU, 2013; VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A título de exemplo, na Figura 9 representa-se a simulação CFD da aeronave NASA X-43 voando a velocidade supersônica de Mach 7.

Figura 9 - Simulação CFD da aeronave supersônica NASA X-43 voando a Mach 7



Fonte: (KIRKLEY, 2011)

A indústria aeroespacial foi a primeira a utilizar técnicas de CFD no projeto e fabricação de aeronaves e motores a jato na década de 1960, mas foi só a partir da década de 1990 que as simulações fluidodinâmicas se popularizaram em diversos âmbitos. Quando comparado com as ferramentas de Engenharia Assistida por Computador (CAE – do inglês *Computer Aided Engineering*) e CAD, o CFD ficou para trás devido à grande complexidade na descrição de escoamentos e, sua prática só foi possível com o avanço dos hardwares de computação de alto desempenho e com a introdução de interfaces mais simples aos softwares. Esse avanço tecnológico vem solidificando o CFD como uma ferramenta prática e moderna na pesquisa de ponta da dinâmica de fluidos e transferência de calor (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Algumas vantagens da utilização do CFD são:

- Redução de prazos e custos de novos projetos;
- Complemento de abordagens analíticas;
- Capacidade de simular em condições não reproduzíveis em testes experimentais (protônicos físicos);
- Capacidade de simular sob condições perigosas;
- Nível alto de detalhes nos resultados.

Essas vantagens aliadas à grande gama de possibilidade da utilização do CFD se estendem ao ramo da pesquisa científica que se refletem em muitas publicações sobre este tema.

Um exemplo desse tipo de publicação é intitulado como “Desenvolvimento e verificação de um modelo de condensação de água em escoamento para simulações CFD em 3D da mistura de correntes de ar úmido”. Nesse artigo os autores propõem uma modelagem CFD que estuda a condensação gerada pela mistura de correntes de ar em diferentes temperaturas e umidade. Este modelo é aplicado a elementos onde a condensação de gotículas de água causam significativos danos como em turbocompressores e motores a combustão (SERRANO et al., 2018).

Na publicação “Análise acoplada CFD-CSD da propulsão subaquática usando um sistema biomimético de aletas e juntas” é proposto um modelo solucionador híbrido de CFD e Dinâmica Estrutural Computacional (CSD – do inglês *Computational Structural Dynamics*) a fim de projetar e analisar propulsores submersos biomiméticos flexíveis, que podem ser particularmente adequados para veículos não tripulados de pequena escala (CHUNG et al., 2018).

Em “Simulação tridimensional CFD de biomassa queimada a larga escala” os autores propõem um estudo de ferramentas CFD que podem ser usadas em sistemas de combustão com o intuito de obter informações úteis para otimizar a operação e projeto das caldeiras. Esta abordagem considera que o sistema permite o uso de uma ampla gama de combustíveis, incluindo aqueles com altos teores de umidade e cinzas (BERMÚDEZ et al., 2019).

O artigo “Modelagem de grades espaçadoras com palhetas de mistura para simulações de CFD em reatores nucleares” estuda um método numérico desenvolvido para simular a presença de grades espaçadoras com palhetas de mistura em conjuntos de reatores nucleares. Devido esses dispositivos de mistura possuírem morfologia complexa, o modelo utilizou a estratégia de criar uma malha mais fina na região de alta complexidade e outra mais grosseira para outras regiões para poder assim superar o problema com a potência computacional já que desta forma reduziu a simulação a um quarto das simulações de CFD do reator completo (CAPONE; BENHAMADOUCHE; HASSAN, 2016).

Na publicação “Computação CFD da aerodinâmica de projéteis com mecanismo de controle de escoamento” é discutido um estudo computacional realizado para modelar a aerodinâmica de voo livre de um projétil aletado, com e sem controle de escoamento. O controle de escoamento é feito por pequenos microflaps entre as aletas traseiras do projétil. Utilizando técnicas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) se obteve como resultado que os microflaps são ineficazes em velocidades transônicas e eficazes em velocidades supersônicas. (SAHU; HEAVEY, 2013)

2.1.7. QUEDA DE PRESSÃO E PERDA DE CARGA

A queda de pressão ou perda de carga, refere-se a perda de energia que um fluido em uma tubulação sofre sob pressão que sofre devido a alguns fatores. Estes fatores podem ser classificados como (1) perdas maiores, quando o fluido perde energia devido ao atrito do mesmo com a camada limite ou como (2) perdas menores, quando a perda de energia ocorre devido a entradas e/ou saídas do escoamento, expansões e/ou contrações durante o desenvolvimento do escoamento ou devido a presença de curvas, válvulas e acessórios na tubulação (FOX et al., 2018).

Na prática, a perda de pressão (ΔP_L) devido ao fator de atrito é expressa para todos os tipos de escoamentos internos bem desenvolvidos.

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{méd}^2}{2} \quad (7)$$

Com L igual ao comprimento do conduto, em metros. E f igual ao fator de atrito de Darcy para escoamento laminar em tubo circular.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (8)$$

Apesar de serem equivalentes, a perda de pressão e perda de carga são expressas em unidades diferentes. A seguir será apresentada a equação da perda de carga devido fator de atrito.

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{méd}^2}{2g} \quad (9)$$

As perdas menores são expressas em função da velocidade do escoamento e um coeficiente de perda (K) que é determinado experimentalmente (vide Anexo A). De forma geral, as perdas menores são calculadas conforme equação a seguir.

$$h_{LM} = K \frac{V_{méd}^2}{2} \quad (10)$$

2.1.8. EQUAÇÕES DE TRANSPORTE

2.1.8.1. CONSERVAÇÃO DA MASSA - EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

Do princípio de conservação da massa de qualquer sistema fechado, seja ele físico ou químico, é de que nenhuma matéria se cria ou se destrói. A conservação da massa de um volume de controle VC é dada pela equação a seguir.

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{CS} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (11)$$

A equação diferencial geral para a conservação da massa, conhecida também como equação da continuidade.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (12)$$

Em particular, para coordenadas cartesianas a equação da continuidade é apresentada na sequência.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

2.1.8.2. CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

A expressão geral para conservação do momentum linear quando aplicada a um volume de controle.

$$\sum \vec{F} = \int_{VC} \rho \vec{g} dV + \int_{CS} \sigma_{ij} \vec{n} dA = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) dV + \int_{CS} (\rho \vec{v}) \vec{v} \cdot \vec{n} dA \quad (14)$$

onde σ_{ij} é o tensor de tensão de Cauchy dado por:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

A equação diferencial geral para conservação do momentum, conhecida como equação de Cauchy.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \vec{v}(\rho \vec{v} \cdot \vec{v}) = \rho \vec{g} + \vec{v} \sigma_{ij} \quad (15)$$

2.1.8.3. EQUAÇÃO DE NAVIER-STOKES

A equação de Navier-Stokes para escoamento incompressível com viscosidade constante.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \mu\nabla^2\vec{V} \quad (16)$$

Esta equação pode ser expandida para coordenadas cartesianas da seguinte forma.

Componente x da equação de Navier-Stokes incompressível.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (17)$$

Componente y da equação de Navier-Stokes incompressível.

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (18)$$

Componente z da equação de Navier-Stokes incompressível.

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (19)$$

2.1.9. SOFTWARES DE SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA

A partir do século XXI, o avanço de processamento dos computadores, aliado às facilidades trazidas pelas simulações fluidodinâmicas, fizeram com que o mercado de softwares CFD crescesse e se aperfeiçoasse no decorrer dos anos. Inúmeras empresas desenvolveram ferramentas que prometem resolver problemas de dinâmica dos fluidos com maior velocidade e precisão (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A ANSYS CFX e ANSYS FLUENT são exemplos de ferramentas CFD de alto desempenho presentes no mercado, essas ferramentas são capazes de simular aplicações de fluidodinâmica e escoamentos multifásicos de forma rápida e precisa (ESSS, 2019).

Além desses dois exemplos outras ferramentas como a STAR-CD desenvolvida pela CD-Adapco e a PHOENICS desenvolvida pela CHAM prometem simulações envolvendo escoamento multifásico, processos com reações químicas, transferência de calor, aerodinâmica, análise de eficiência de equipamentos, climatização, entre outros.

Outra ferramenta presente no mercado é o Discovery Live. Essa ferramenta desenvolvida pela ANSYS faz uma abordagem diferente na forma de interpretar os problemas de dinâmica dos fluidos computacional. O software oferece um ambiente de simulação interativo com ferramentas CAD e CAE integradas. Com o Discovery Live é possível realizar alterações na geometria sem que a simulação seja suspensa possibilitando que os resultados sejam visualizados imediatamente após estas alterações. Isso é possível pois todo o processamento é realizado pela memória gráfica, que possui milhares de processadores rodando em paralelo (HENDRICKSON, 2020).

O Quadro 1 lista as características atendidas por alguns softwares de simulação fluidodinâmica do mercado.

Quadro 1 – Comparativo de softwares CFD

Software	Características				
	Simulação de escoamento de fluidos	Simulação de transferência de calor	Modelagem de fluidos supersônicos	Integração entre ferramentas CAD e CAE	Processamento realizado por memória gráfica
ANSYS CFX	✓	✓	✓	✗	✗
ANSYS FLUENT	✓	✓	✓	✗	✗
STAR-CD	✓	✓	✓	✗	✗
PHOENICS	✓	✓	✓	✗	✗
FLOW3D	✓	✓	✓	✗	✗
DISCOVERY LIVE	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autoria própria

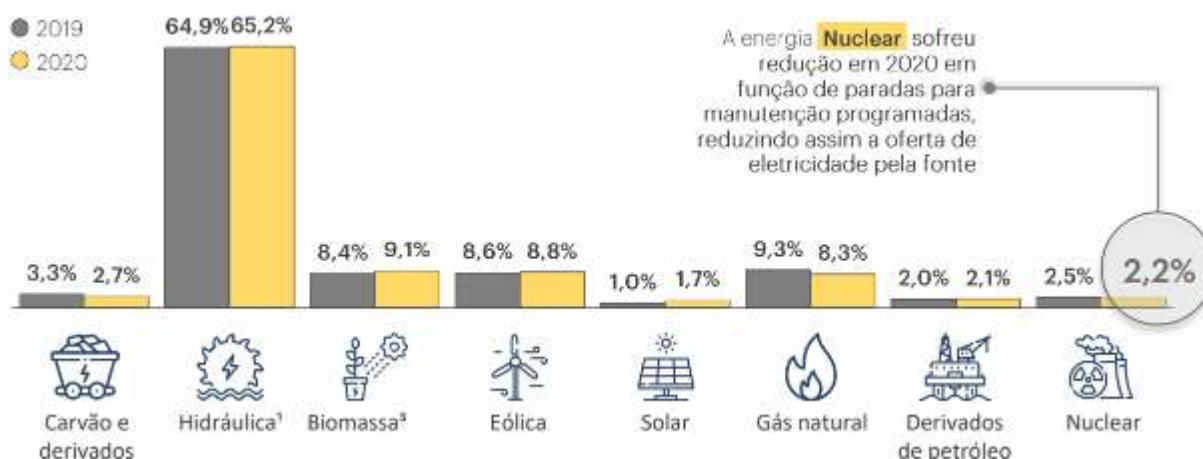
Do Quadro 1 comparativo apresentado, é possível verificar que a integração entre ferramentas CAD e CAE e o processamento realizado por memória gráfica ainda é uma limitação na maioria dos softwares CFD e neste quesito o ANSYS Discovery Live se destaca com tal funcionalidade. Tendo em vista as vantagens e facilidades apresentadas, o presente trabalho utilizará esta ferramenta para realizar as simulações fluidodinâmicas necessárias.

2.2. UNIDADES GERADORAS DE ENERGIA ELÉTRICA

2.2.1. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2021, a energia elétrica no Brasil é majoritariamente obtida da energia hidráulica, sendo esta, responsável por gerar aproximadamente dois terços da energia elétrica consumida no país. Esse fato se deve a dois fatores principais: (1) a disponibilidade de água no território brasileiro e (2) presença de desníveis no relevo, sejam eles naturais ou construídos. A fim de ilustrar a utilização da energia elétrica no país, a Figura 10 apresenta a matriz energética brasileira referente ao ano de 2020.

Figura 10 – Matriz energética brasileira de 2020



Fonte: (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2021)

A energia hidráulica é obtida pelo aproveitamento da energia potencial gravitacional da massa de água de rios e/ou lagos sujeitos a desníveis. Em resumo, a energia potencial da queda de água é convertida na forma de energia mecânica através da movimentação de uma turbina hidráulica que é acoplada por um eixo em um gerador elétrico que é capaz de transformar a energia mecânica em energia elétrica. A potência hidráulica depende diretamente da altura do desnível e da vazão d'água (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2021).

$$P_{hidráulica} = \rho Q H g \quad (20)$$

Onde,

$P_{hidráulica}$ = Potência hidráulica [W];

ρ = Densidade da água $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$;

Q = Vazão volumétrica $\left[\frac{m^3}{s}\right]$;

H = Altura de queda [m];

g = Aceleração gravitacional $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.

As unidades geradoras de energia elétrica podem ser classificadas em três categorias de acordo com seu potencial hidráulico e extensão do seu reservatório de água (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2020). As categorias são:

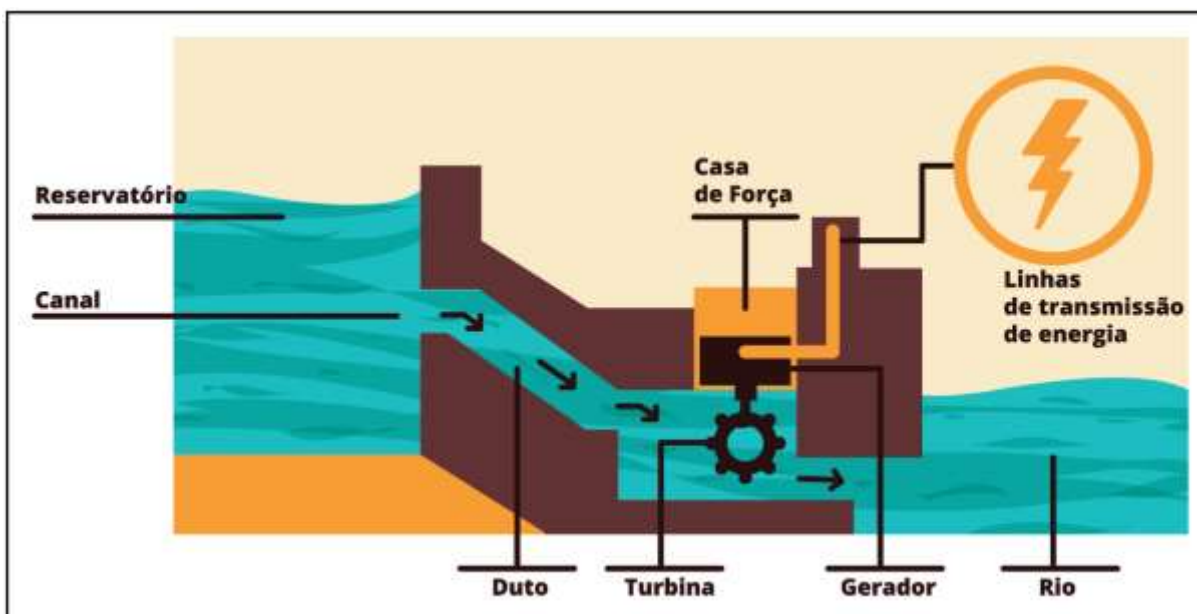
- Central Geradora Hidrelétrica (CGH): Unidade geradora de energia elétrica com potencial hidráulico igual ou inferior a 5 MW.
- Pequena Central Hidrelétrica (PCH): Usina hidrelétrica de pequeno porte, tendo capacidade superior a 5 MW e inferior a 30 MW com reservatório de até três quilômetros quadrados.
- Usina Hidrelétrica (UHE): Usina hidrelétrica de grande porte com potencial hidráulico superior a 30 MW e com grandes reservatórios.

O Brasil conta com 704 CGH's e 425 PCH's em operação que juntas somam 5.991 MW de potência. Quando comparadas com outras fontes de energia, ocupam o 4º lugar no ranking de potência outorgada ficando atrás de energia eólica (15.099 MW), termoeletricas (41.954 MW) e usinas hidrelétricas (102.532 MW) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PCH'S E CGH'S - ABRAPCH, 2019).

2.2.2. ESTRUTURA DE UNIDADES HIDRÁULICAS GERADORAS DE ENERGIA

A estrutura de CGH's, PCH's e UHE's seguem o mesmo princípio construtivo, porém em diferentes escalas. Estruturalmente são compostas por um reservatório de água em um nível superior, a água deste nível chega até a casa de força através de um conduto forçado alimentando uma turbina hidráulica. Após passar pela turbina da casa de força, a água é devolvida ao curso do rio. A Figura 11 a seguir exemplifica a estrutura de uma unidade geradora hídrica.

Figura 11 – Perfil esquemático de uma usina hidrelétrica



Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PCH'S E CGH'S - ABRAPCH, 2019)

As Figuras 12 e 13 a seguir ilustram a usina hidrelétrica de Itaipu em vista do nível superior e inferior respectivamente sendo (1) tomada d'água dos condutos forçados, (2) tomada d'água dos vertedouros, (3) nível superior, (4) nível inferior, (5) barragem, (6) condutos forçados e casa de força.

Figura 12 – Vista do nível superior da usina hidrelétrica de Itaipu

Fonte: (ITAIPU BINACIONAL, 2017)

Figura 13 – Vista do nível inferior da usina hidrelétrica de Itaipu

Fonte: (ITAIPU BINACIONAL, 2017)

A seguir, serão discutidos de forma mais abrangente os componentes presentes nesse tipo de estrutura.

2.2.2.1. BARRAGEM HIDRELÉTRICA

As barragens são estruturas construídas transversalmente a rios e tem como intuito formar reservatórios de água e regular a vazão do rio. Cabe a essas construções também, prover o desnível necessário para movimentação das turbinas das unidades geradoras de energia (ELETROBRAS, [s.d.]).

O reservatório gerado por esse tipo de construção tem múltiplos fins, entre eles: geração de energia, irrigação, regulação do nível do rio para navegação, abastecimento de água, mitigação de inundações e lazer (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009).

2.2.2.2. TOMADA D'ÁGUA

Nas barragens existe um sistema que possibilita a passagem de água entre o nível superior e inferior. Esse sistema é chamado de tomada d'água e é responsável por permitir a passagem de água para os condutos forçados e vertedouros. Na tomada d'água que precede os condutos existem grades que impossibilitam a entrada de resíduos (como troncos, folhas, lama e peixes) na turbina hidráulica. Além da grade, existem também comportas que cessam a passagem de água quando manutenções são necessárias (CONEXÃO TOCANTINS, 2011). A Figura 14 a seguir ilustra a tomada d'água da UHE Estreito.

Figura 14 – Sistema de tomada d'água



Fonte: (CONEXÃO TOCANTINS, 2011)

2.2.2.3. VERTEDOUROS

As barragens contam com uma estrutura de controle de nível do reservatório chamadas de vertedouros ou extravasores. Essas estruturas são capazes de descarregar a água excedente provenientes de cheias e chuvas extremas evitando que o nível d'água atinja a crista do reservatório ou barragem. O fluxo de água dos vertedouros é controlado por comportas, vide Figura 15, (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009).

Figura 15 – Sistema de vertedouro



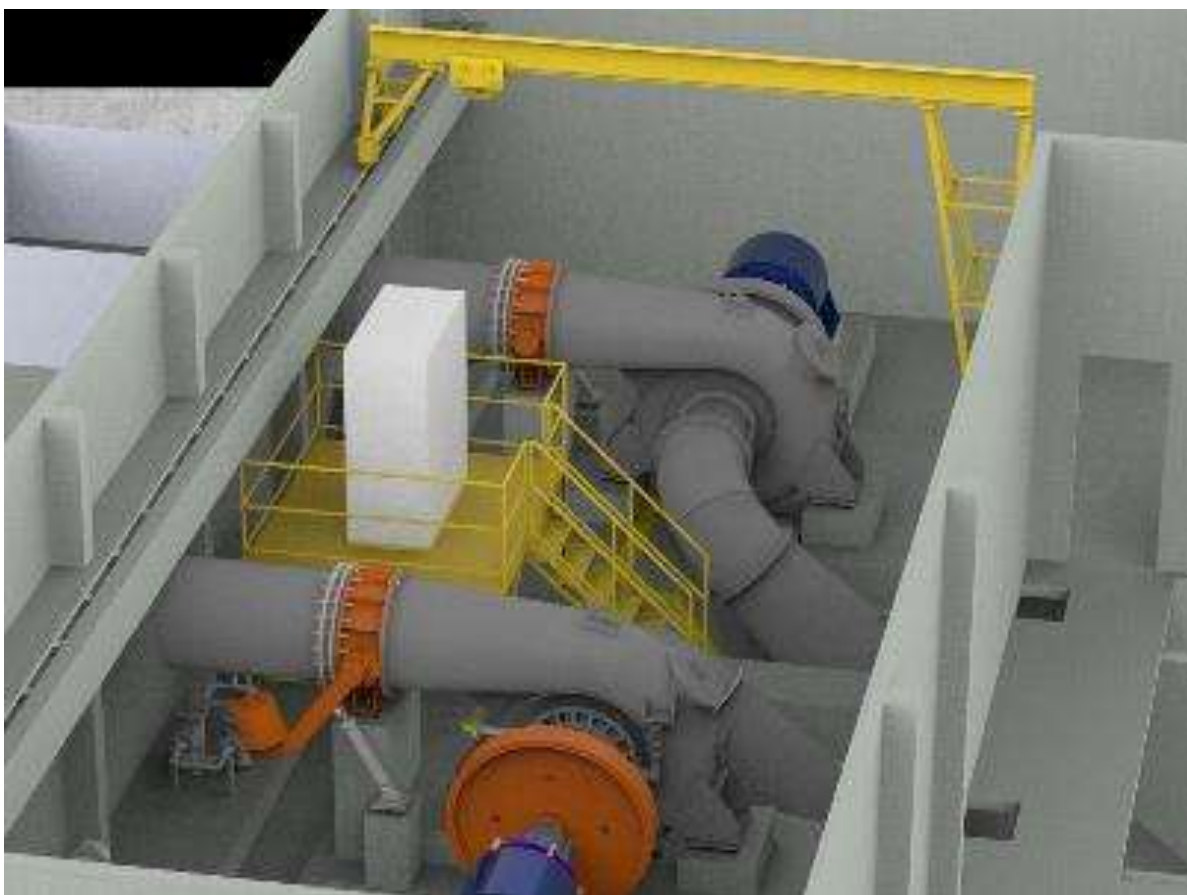
Fonte: (FERNANDES, 2020)

2.2.2.4. CASA DE FORÇA

A casa de força consiste em uma construção que pode ser abrigada, semiabrigada, desabrigada ou subterrânea, onde estão instalados os equipamentos eletromecânicos responsáveis pela geração de energia. Esta construção conta com gerador(es) elétrico(s), turbina(s) hidráulica(s) e pode conter sistema de filtragem e circulação de água, sistema de resfriamento e circulação de óleo e painéis elétricos. Além disso, nessas construções existem pontes e/ou pórticos rolantes utilizados nas montagens e manutenções da unidade (PEREIRA,

2015). A Figura 16 a seguir ilustra a casa de força de uma unidade hidráulica de geração de energia.

Figura 16 – Casa de força



Fonte: Autoria própria

2.2.3. TURBINA FRANCIS

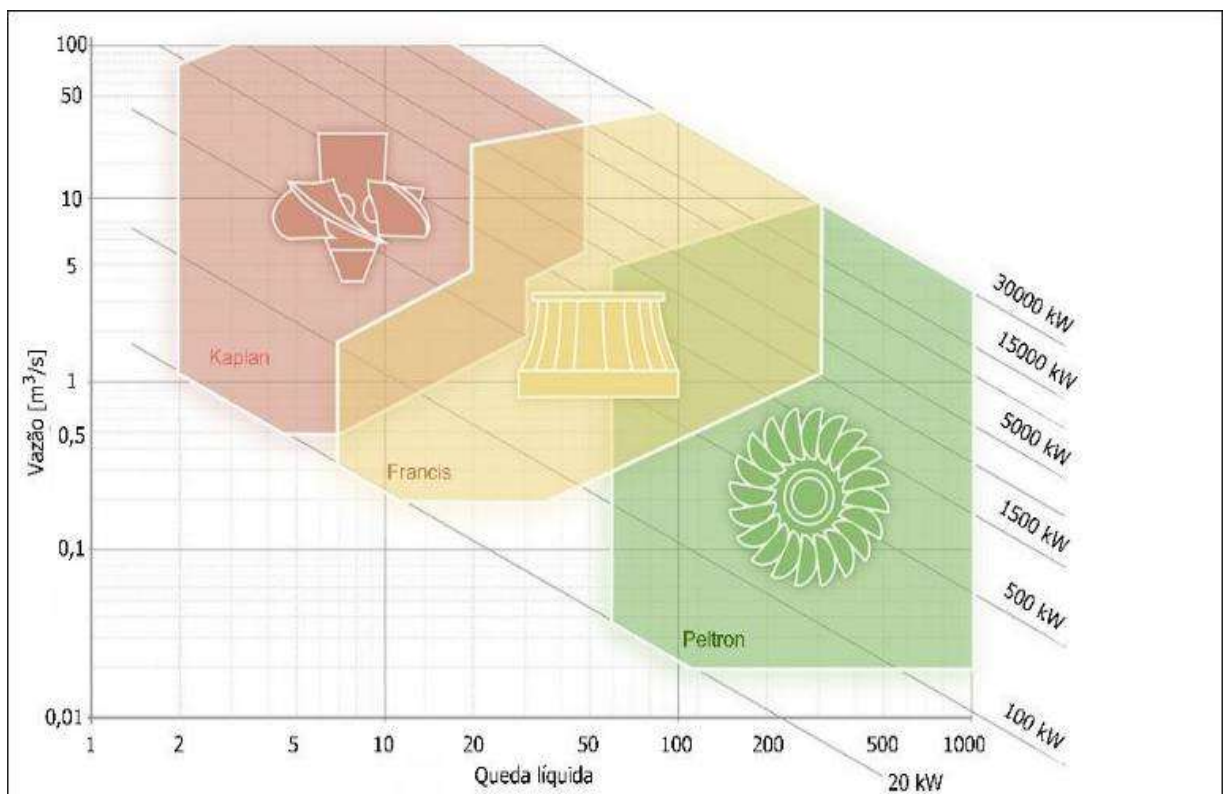
Em essência, as turbinas hidráulicas convertem a energia hidráulica (combinação da energia cinética proveniente da vazão d'água e a energia potencial resultante da pressão d'água) em energia mecânica (torque no eixo da turbina) (PEREIRA, 2015). Conceitualmente, as turbinas hidráulicas podem ser classificadas em duas categorias:

- (1) Turbinas de ação: Não trabalham dentro da água e por isso operam com pressão próxima da atmosférica, assim, quando ocorre o escoamento pelo rotor não há variação da pressão estática. Essas turbinas convertem toda a energia hidráulica em energia cinética. São exemplos desse tipo de equipamento a turbina Peltron e turbina Michell-Banki (PEREIRA, 2015; SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009).

- (2) Turbinas de reação: Os rotores dessas máquinas trabalham inteiramente mergulhados na água, por isso, quando ocorre o escoamento pelo rotor existe a variação da pressão estática gerando uma contrapressão no lado da saída da água. Alguns exemplos dessas máquinas são as turbinas Hélice, Kaplan e Francis (PEREIRA, 2015; SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009).

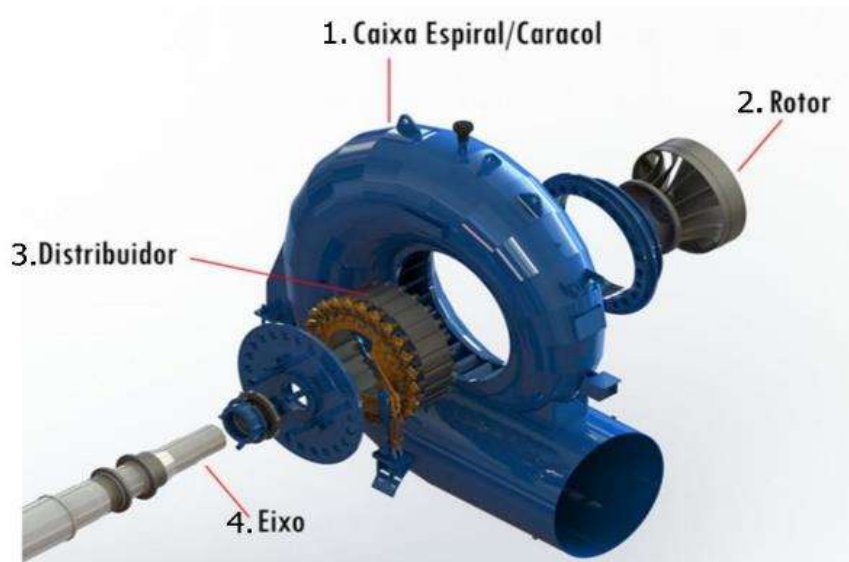
Em um projeto hidráulico, a escolha de uma turbina ideal se baseia no ponto de melhor eficiência entre carga e vazão. O gráfico da Figura 17 apresenta a relação de altura de queda líquida [m] e vazão para diferentes potências e tipos de turbina.

Figura 17 – Diagrama queda líquida x vazão para seleção de turbina



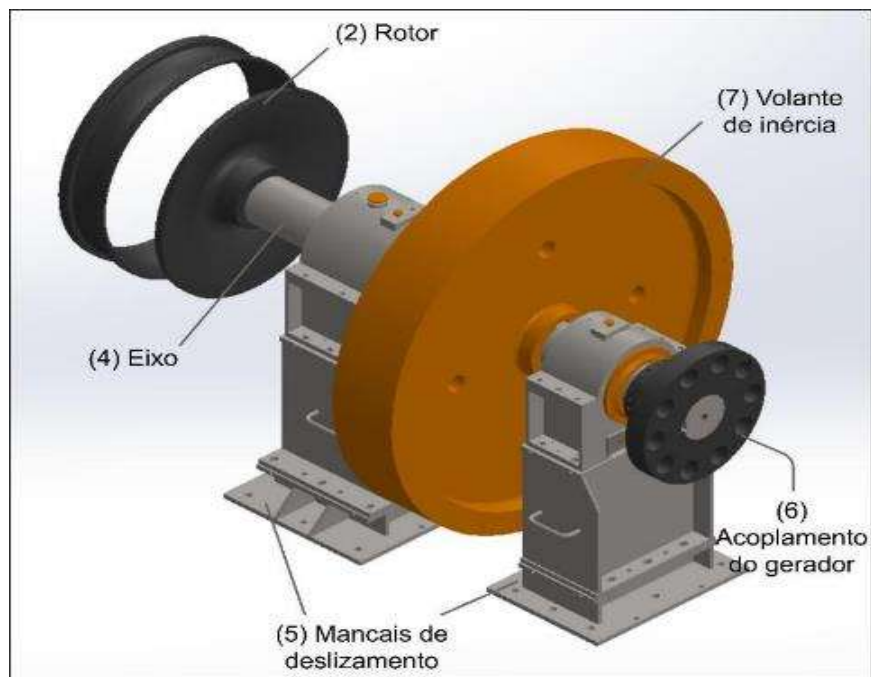
Fonte: (BOCK, 2018)

No intervalo entre 10 e 300 metros de queda líquida, as turbinas do tipo Francis são as mais utilizadas. Nesses equipamentos, a água entra na caixa espiral (1) e é guiada na direção do rotor (2) através de dois conjuntos de pás do distribuidor (3). Então, a energia da água é absorvida pelo rotor da turbina gerando torque no eixo (4). O eixo da turbina é conectado a um gerador onde é possível converter a energia mecânica em energia elétrica (PEREIRA, 2015). A Figura 18 ilustra a estrutura em vista explodida de uma turbina Francis.

Figura 18 – Vista explodida de turbina Francis

Fonte: Adaptado (BOCK, 2018)

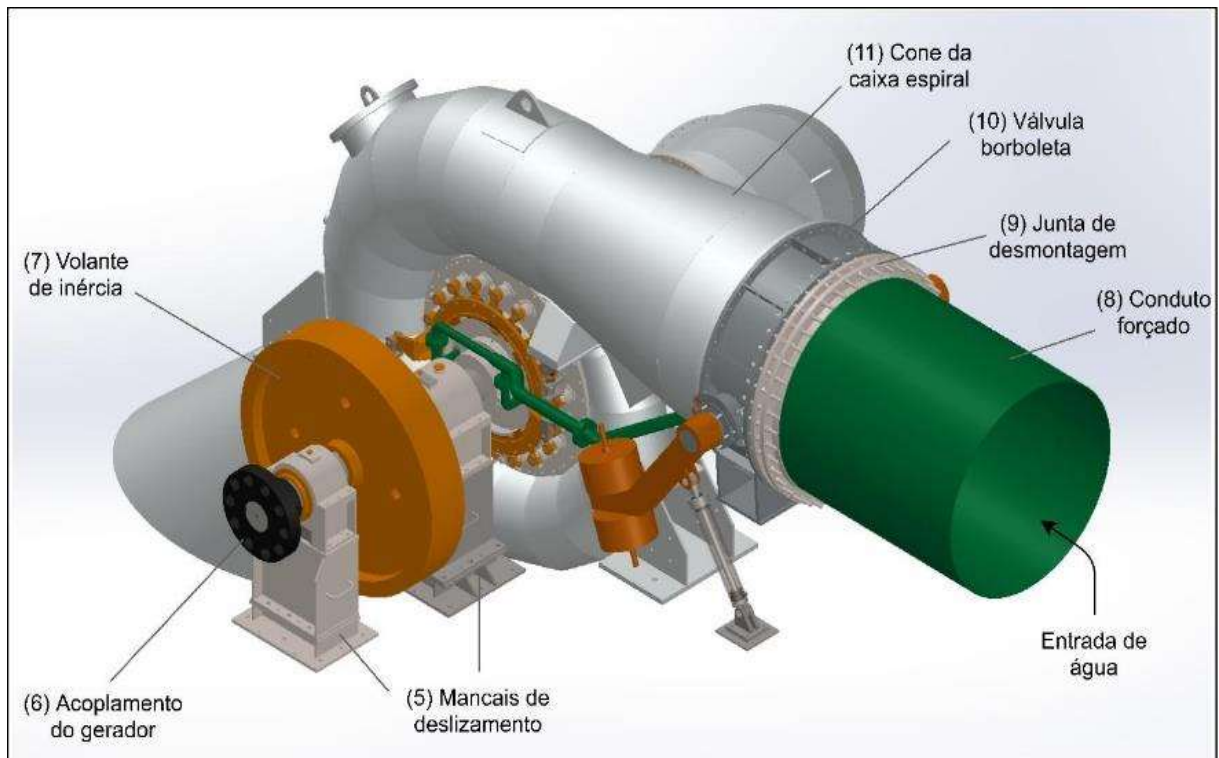
O eixo da turbina tem como função principal transmitir a rotação mecânica do rotor da turbina para o gerador (PEREIRA, 2015). No entanto, para que isso seja possível, são montados no eixo outros dois equipamentos: acoplamento do gerador (6) e volante de inércia (7). O conjunto montado é sustentado por mancais de rolamento (5) – Figura 19.

Figura 19 – Linha de eixo

Fonte: Autoria própria

Além dos equipamentos ilustrados nas Figuras 18 e 19, outros equipamentos são fundamentais na construção de uma turbina Francis. Esses serão apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Representação de montagem de turbina Francis



Fonte: Autoria própria

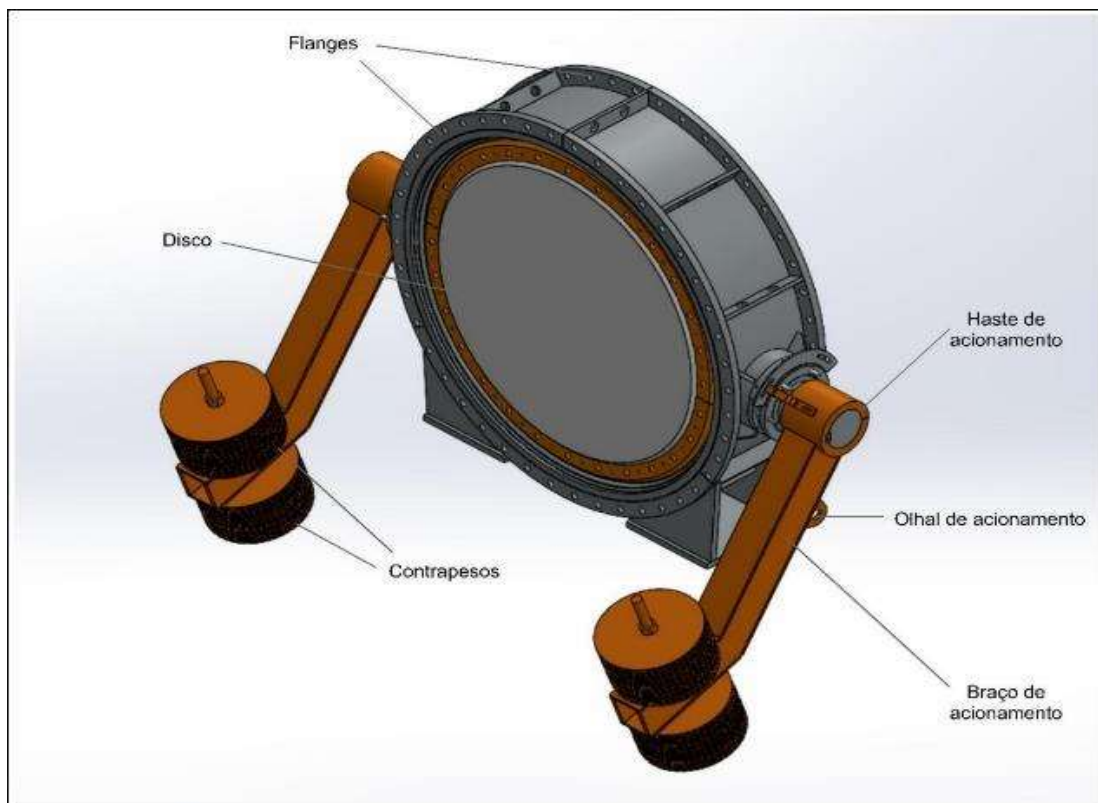
Na sequência será realizada uma breve descrição dos elementos apresentados na Figura 21.

- Mancais de rolamento (5): São componentes responsáveis por suportar os esforços axiais e radiais que o eixo é submetido, sem deixar de permitir a rotação do mesmo. A região dos mancais em contato com o eixo é frequentemente construída de metal patente, liga com base em estanho ou chumbo que apresenta boa capacidade de carga, baixo desgaste, boa relação custo-benefício e bom comportamento trabalhando com quantidade insuficiente de lubrificante (RIBEIRO; CÂMARA, 2020).
- Acoplamento do gerador (6): Trata-se de um elemento de máquina que permite a união entre eixo da turbina e eixo do gerador fazendo-os funcionar como um único eixo.
- Volante de inércia (7): Este componente é acoplado ao eixo e tem função de conservar a energia do conjunto. Sua velocidade de rotação armazena a energia cinética que posteriormente é convertida em energia elétrica. A energia cinética

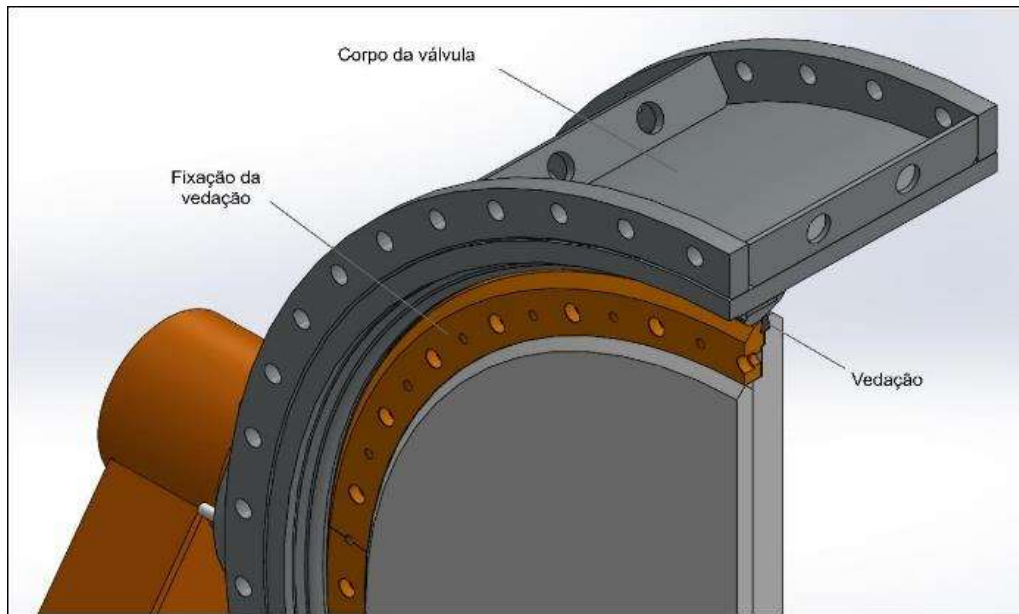
está diretamente relacionada ao momento de inércia e velocidade angular do componente (COSTA, 2017).

- Conduto forçado (8): São tubulações que conduzem o escoamento entre a tomada d'água e a turbina. Este escoamento pode ser laminar ou turbulento (conforme Equação 3) (PEREIRA, 2015).
- Junta de desmontagem (9): Tipo de junta utilizada próxima a registros e válvulas. Possui alguns tirantes que podem ser retraídos axialmente permitindo a remoção dos elementos subsequentes.
- Válvula borboleta (10): Equipamento utilizado para regular ou isolar a vazão entre conduto forçado e turbina. A utilização deste é o tipo de válvula vem se tornando cada vez mais comum, em virtude de algumas vantagens que a mesma oferece, das quais podemos citar:
 - Exigência de espaço pequeno;
 - Facilidade de operação;
 - Abertura e fechamento rápido;
 - Estrutura simples (conforme Figuras 21 e 22).

Figura 21 – Válvula borboleta



Fonte: Autoria própria

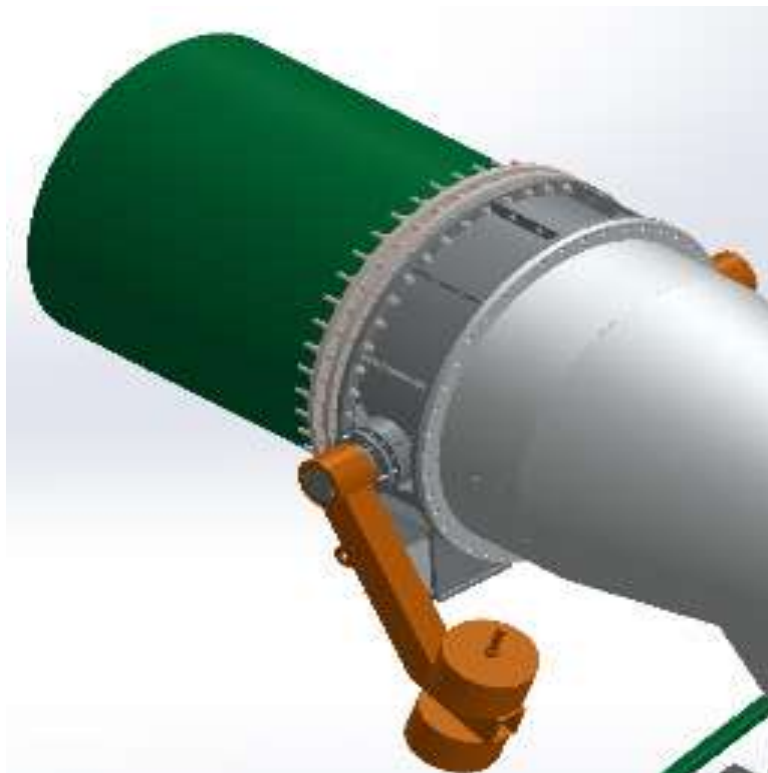
Figura 22 – Válvula borboleta em corte

Fonte: Autoria própria

- Cone da caixa espiral (11): Transição localizada entre a válvula borboleta e a caixa espiral. Esta apresenta redução de diâmetro fazendo acelerar o fluido que escoar no seu interior.

Uma análise fluidodinâmica consistente requer um escoamento bem desenvolvido. E, para que isso seja possível, os componentes que antecedem e sucedem a válvula borboleta devem estar presentes na simulação. Por isso, além da válvula borboleta, farão parte das simulações deste trabalho: trecho do conduto forçado, junta de desmontagem e cone da caixa espiral – Figura 23.

Figura 23 – Conjunto da válvula borboleta



Fonte: Autoria própria

3. ASPECTOS METODOLÓGICOS

A metodologia científica pode ser definida segundo Gerhardt (2009, p. 11) como “o estudo sistemático e lógico dos métodos empregados nas ciências, seus fundamentos, sua validade e sua relação com as teorias científicas. Em geral, o método científico compreende basicamente um conjunto de dados iniciais e um sistema de operações ordenadas adequado para a formulação de conclusões, de acordo com certos objetivos predeterminados”. (GERHARDT; SILVEIRA, 2009)

Para garantir que uma pesquisa seja reconhecida como relevante no âmbito acadêmico e na sociedade em geral, ela deve demonstrar que foi rigorosamente desenvolvida e que é passível de debate e verificação. Neste âmbito, um método de pesquisa consolidado se torna necessário para obter êxito em estudos (LACERDA et al., 2013).

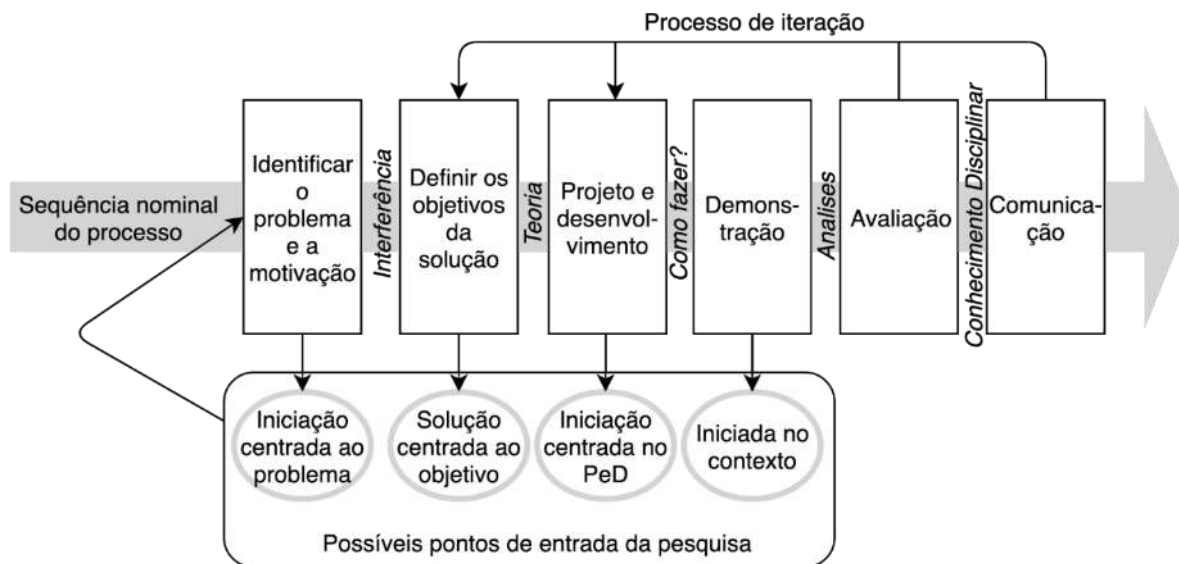
Os padrões ISO, por exemplo, foram desenvolvidos de acordo com as necessidades de mercado e baseados na opinião de especialistas, acadêmicos e instituições do mundo todo. Esse padrão se consolidou através de um processo iterativo desde a proposta até a publicação do padrão mais relevante (BARAFORT et al., 2018).

Nos últimos anos, a literatura sobre a metodologia DSR (do inglês *Design Science Research*) vem aumentando muito, sendo impulsionada pela necessidade da realização de pesquisas úteis e inovadoras e ao mesmo tempo exigentes. Esta metodologia se destaca também por lidar bem com problemas complexos e contextualizados (PIMENTEL; FILIPPO; SANTORO, 2019).

A metodologia DSR tem enfoque no desenvolvimento de um artefato. Este artefato é projetado para resolver um problema (objetivo) num dado contexto sociotécnico influenciado pelo ambiente em que opera. Basicamente este artefato pode ser qualquer coisa que seja projetada para alcançar um objetivo (BARAFORT et al., 2018; PIMENTEL; FILIPPO; SANTORO, 2019).

As etapas específicas do método DSR são ilustradas pela Figura 24 a seguir.

Figura 24 – Etapas específicas do método DSR



Fonte: Adaptação (PIMENTEL; FILIPPO; SANTORO, 2019)

A Tabela 1 a seguir ilustra a metodologia DSR que será aplicado no presente trabalho. O quadro está configurado em um formato cujo a primeira coluna lista as seis atividades que compõem a DSR. A coluna dois descreve detalhadamente cada uma das atividades e terceira coluna a base de conhecimento com as diferentes atividades.

Tabela 1 – Método DSR

Atividades DSRM	Descrição da atividade	Base de conhecimento
Identificação do problema e motivação	Qual é o problema? Definir o problema de pesquisa e justificar a importância da solução	Entenda a relevância do problema, suas soluções atuais e suas fraquezas.
Definição dos objetivos da solução	Como o problema deve ser resolvido? Além de objetivos gerais, como viabilidade e desempenho, quais são os critérios específicos que uma solução para o problema definido na etapa um deve ser atendida?	Conhecimento do que é possível e do que é factível. Conhecimento de métodos, tecnologias e teorias que podem ajudar com a definição dos objetivos.
Design e desenvolvimento	Crie um artefato que resolva o problema. Crie construções, modelos, métodos ou instanciações na qual uma contribuição de pesquisa está incorporada.	Aplicação de métodos, tecnologias e teorias para criar um artefato que resolva o problema.
Demonstração	Demonstre o uso do artefato. Prove que o artefato funciona resolvendo uma ou mais instâncias do problema.	Conhecimento de como usar o artefato para resolver o problema.

Avaliação	Quão bem o artefato funciona? Observe e meça o quão bem o artefato suporta uma solução para o problema comparando os objetivos com resultados observados.	Conhecimento de escalas relevantes e técnicas de avaliação.
Comunicação	Comunique o problema, a sua solução, sua utilidade e eficácia da solução para pesquisadores e públicos relevantes.	Conhecimento da cultura disciplinar.

Fonte: Adaptação (GEERTS, 2011)

A boa integração da base de conhecimento melhora a DSR pois assim os pesquisadores devem evidenciar a escolha das ferramentas de conhecimento forçando a utilização das mais eficazes. A base de conhecimento fornece as matérias-primas a partir das quais a pesquisa é realizada. Ou seja, são todas as ferramentas de conhecimento, teorias fundamentais, estruturas, instrumentos e modelos (GEERTS, 2011).

3.1. IDENTIFICAÇÃO DA OPORTUNIDADE DE PESQUISA E MOTIVAÇÃO

O ciclo da metodologia DSR se inicia pela identificação da oportunidade de pesquisa. Nesta etapa, define-se como deve ser encontrada a oportunidade de pesquisa e busca-se justificar a importância do artefato criado para resolvê-la. A busca por informações acerca da oportunidade é evidenciada como um modo de entender o problema (RODRIGUES, 2018).

A oportunidade de pesquisa pode possuir diversas áreas, seja em novos desenvolvimentos na indústria ou na identificação de problemas dentro de uma área específica. Os tipos de oportunidades que são relevantes nesta metodologia são aqueles que tendem a ser resolvidos com foco em sua abordagem diferente dos problemas que são resolvidos por meio de explicação (VAISHNAVI; KUECHLER; PETTER, 2012).

Durante a busca por informações, é factível realizar a pesquisa denominada de estado da arte. Este tipo de pesquisa tem caráter bibliográfico com intuito principal de mapear a produção acadêmica em diferentes campos do conhecimento. Para realizar tal, deve-se utilizar fontes de pesquisa de referência como acervos de faculdades e universidades e publicações de revistas e jornais acadêmicos (FERREIRA, 2002).

3.2. DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DA SOLUÇÃO

Esta fase da DSR está relacionada com a compreensão da forma como se encontrará a solução da oportunidade de pesquisa. Por isso, é importante que seja realizado o levantamento do conhecimento através de uma minuciosa revisão bibliográfica. Esta revisão deve conter tanto o conhecimento de ciências científica como o conhecimento baseado na pesquisa técnica (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JÚNIOR, 2015).

Nesta etapa da metodologia DSR, deve ser definido o tipo de artefato que será criado, seja ele constructo, modelo, método ou instanciação. A Tabela 2 a seguir apresenta a descrição de cada tipo de artefato.

Tabela 2 – Tipos de artefato

Tipos de artefato	Descrição
Constructos	Os constructos constituem uma conceituação utilizada para descrever os problemas dentro do domínio e para especificar as respectivas soluções. Conceituações são extremamente importantes em ambas as ciências, natural e de design. Elas definem os termos usados para descrever e pensar sobre as tarefas.
Modelos	Um modelo é um conjunto de proposições que expressam as relações entre os constructos. Em atividades de design, modelos representam situações com o problema e solução. Ele pode ser visto como uma descrição, ou seja, como uma representação de como as coisas são.
Métodos	Um método é um conjunto de passos (um algoritmo ou orientação) usado para executar uma tarefa. Métodos baseiam-se em um conjunto de constructos subjacentes (linguagem) e uma representação (modelo) em um espaço de solução.
Instanciações	Uma instanciação é a concretização de um artefato em seu ambiente. Instanciações operacionalizam constructos, modelos e métodos. No entanto, uma instanciação pode, na prática, preceder a articulação completa de seus constructos, modelos e métodos. Instanciações demonstram a viabilidade e a eficácia dos modelos e métodos que elas contemplam.

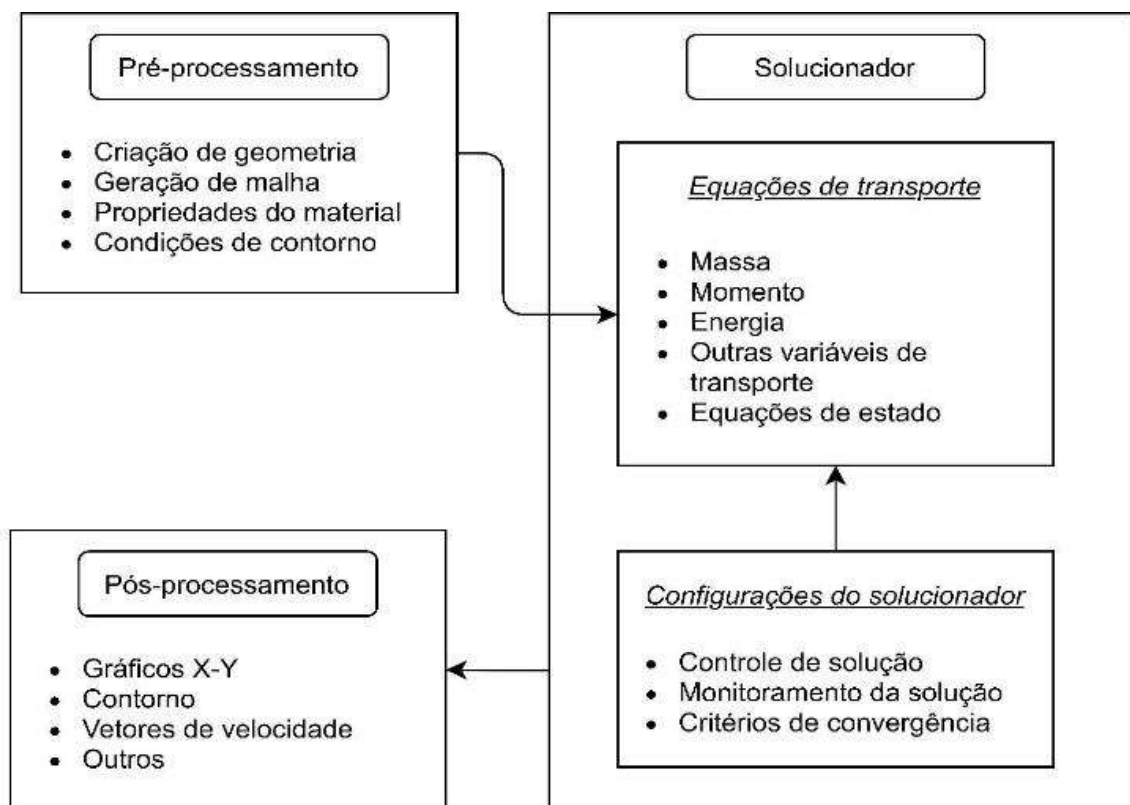
Fonte: Adaptado (LACERDA et al., 2013)

Os modelos são altamente aplicados em simulações computacionais e são especialmente indicados em casos com transformações constantes e complexas (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JÚNIOR, 2015). Alinhado com esta realidade, este trabalho busca criar um modelo otimizado de válvula borboleta para turbina Francis.

3.3. CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO

A resolução de problemas utilizando CFD costumam ser estruturadas em torno de algoritmos alimentados com parâmetros através de uma interface gráfica e após o processamento, os resultados são entregues ao usuário. Esse algoritmo fornece uma análise CFD completa, composta por três estágios principais: pré-processamento, solucionador e pós-processamento (TU; YEOH; LIU, 2013). A Figura 25 apresenta uma estrutura que ilustra a conectividade dos três estágios citados.

Figura 25 - Interconectividade dos três estágios principais em uma análise de CFD



Fonte: Adaptado (TU; YEOH; LIU, 2013) p. 31.

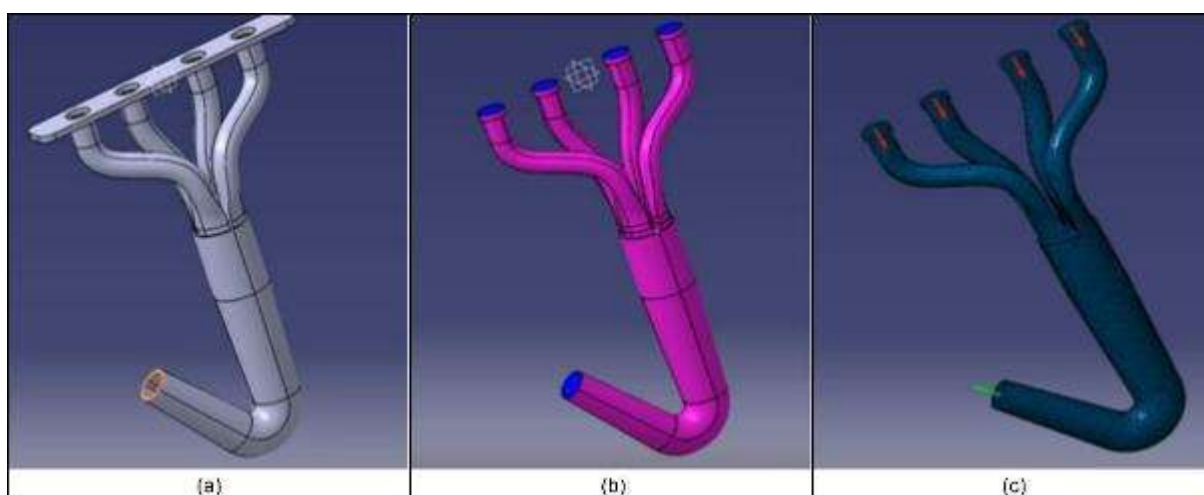
3.3.1. PRÉ-PROCESSAMENTO

Neste tópico serão abordadas as condições de pré-processamento que consistem nos dados de entrada que alimentam o algoritmo solucionador na análise CFD.

3.3.1.1. CRIAÇÃO DA GEOMETRIA

O primeiro passo em uma análise CFD é a modelagem em CAD da geometria a ser analisada e a partir da geometria modelada cria-se uma região de escoamento no domínio computacional. A Figura 26 representa esse processo sendo (a) a modelagem em CAD, (b) a região de escoamento no domínio computacional e (c) a geração de malha.

Figura 26 - Fases de uma análise CFD



Fonte: Autoria própria

3.3.1.2. GERAÇÃO DE MALHA

O segundo passo consiste na subdivisão da região de escoamento em várias subdivisões menores para resolver a física do escoamento dentro da geometria do domínio que foi criada. Esta subdivisão em regiões (ou células) é chamada de geração de malha e o problema da mecânica dos fluidos é resolvido numericamente nessas subdivisões (TU; YEOH; LIU, 2013).

A precisão de uma solução no CFD está relacionada ao número de células da malha. Quanto maior for este número, mais precisa será a solução, no entanto, o aumento do número de células gera um aumento significativo no tempo de cálculo aumentando por consequência os custos da simulação. Portanto, a maior parte do tempo gasto em um projeto de CFD é geralmente dedicado a gerar uma malha apropriada para geometria do domínio (TU; YEOH; LIU, 2013).

Os códigos de CFD são executados utilizando malhas estruturadas, malhas não estruturadas ou malhas híbridas. As malhas estruturadas consistem em células planares com quatro lados em 2D ou células volumétricas com seis faces em 3D. Já as malhas não estruturadas em geral usam triângulos e quadriláteros em 2D ou tetraedros e hexaedros em 3D. A malha híbrida é aquela que combina regiões de malhas estruturadas e não estruturadas. A Figura 27 a seguir representa um exemplo de malha híbrida (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Figura 27 - Malha híbrida com duas malhas estruturadas e uma não estruturada



Fonte: (ÇENGEL; CIMBALA, 2015) p. 887.

3.3.1.3. PROPRIEDADES FÍSICAS DO FLUIDO

As propriedades físicas do fluido têm grande impacto nos resultados da simulação. Neste passo são definidos parâmetros do escoamento como estado (transiente ou estacionário), tipo do fluido (compressível ou incompressível), viscosidade do fluido (viscoso ou não-viscoso), regime de escoamento (laminar ou turbulento) e tipo de escoamento (interno ou externo) (TU; YEOH; LIU, 2013).

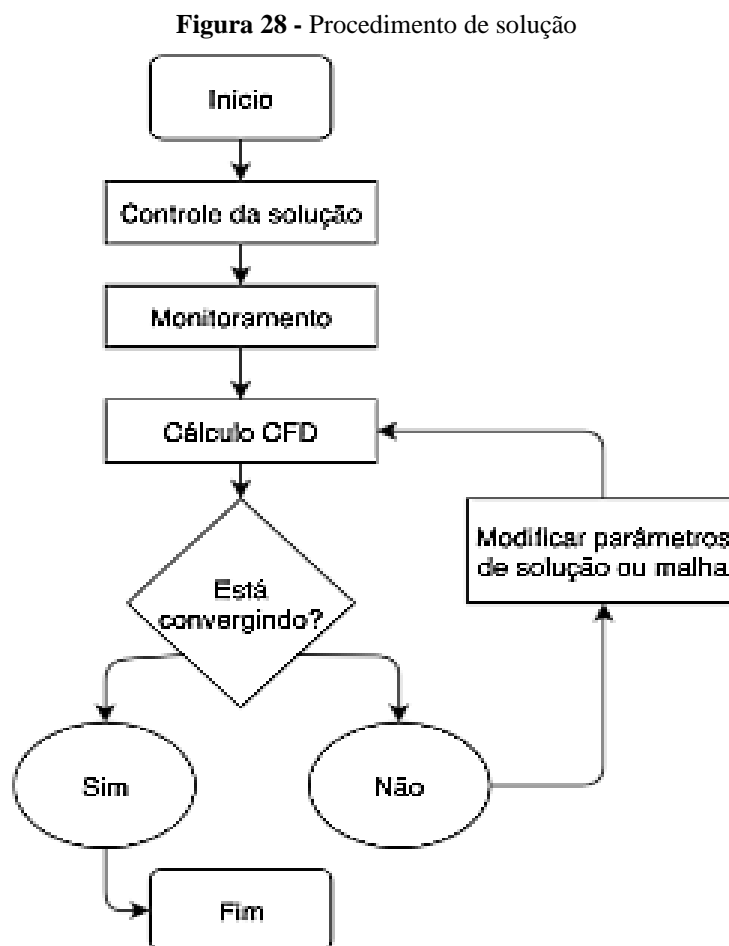
3.3.1.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO

No pré-processamento é necessário definir as condições de contorno apropriadas que imitam a representação física real do escoamento de fluido especificando os limites admissíveis. Algumas dessas especificações são os limites de entrada e saída do fluido dentro no domínio do escoamento e as paredes sólidas que delimitam a geometria do escoamento ou paredes circundantes de possíveis obstáculos (TU; YEOH; LIU, 2013).

Os códigos CFD geralmente permitem entradas e saídas de valores de pressão, temperatura, densidade, velocidade e vazão mássica sendo possível definir também fontes e sumidouros de massa. (TU; YEOH; LIU, 2013)

3.3.2. SOLUCIONADOR

A resolução de problemas de fluidodinâmica está atrelada a aplicação das quatro leis básicas de conservação (massa, energia, momentum linear e momentum angular) a um volume de controle de um sistema fluido infinitesimal. Nas ferramentas CFD, as derivadas das equações de conservação são aproximadas por relações algébricas e resolvidas por um software matemático. Este software é chamado de solucionador (TU; YEOH; LIU, 2013). O processo de solução está representado na Figura 28.



Fonte: Adaptado (TU; YEOH; LIU, 2013) p. 46.

A primeira etapa do solucionador envolve as operações de início e controle de solução enquanto a segunda etapa é composta pela interligação entre as outras três (que são elas: monitoramento, cálculo CFD e verificação de convergência) (TU; YEOH; LIU, 2013). Essas duas etapas serão discutidas a seguir.

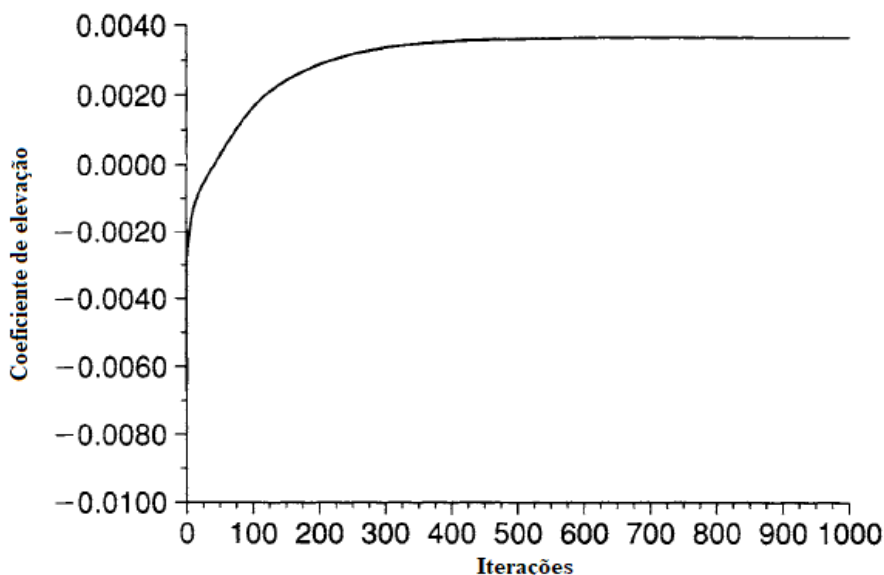
3.3.2.1. CONTROLE DA SOLUÇÃO

Os escoamentos de fluidos geralmente são complexos e não-lineares e por isso para serem resolvidos é necessária uma abordagem com solução iterativa. Os parâmetros de transporte do fluido como pressão, temperatura e velocidade podem ser puramente arbitrados, porém escolhas ruins de valores para esses parâmetros podem implicar em um número grande de iterações para alcançar a convergência ou até mesmo fazer com que esses valores tendam a valores impróprios com divergências. Por isso um estudo prévio é necessário (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

A obtenção de parâmetros apropriados em soluções é regida por esquemas de discretização. Alguns desses esquemas de interpolação mais comuns são: interpolação de primeira ordem do tipo *upwind*, de segunda ordem do tipo *upwind*, aproximação central de segunda ordem e interpolação quadrática (TU; YEOH; LIU, 2013).

3.3.2.2. MONITORAMENTO DE CONVERGÊNCIA

Após a escolha do esquema de discretização, o algoritmo de solução do CFD faz as iterações modificando os parâmetros de soluções buscando a convergência. Um exemplo de monitoramento de convergência está representado na Figura 29 que representa o monitoramento de convergência de um coeficiente de elevação. O número de iterações cresce até o limite pré-determinado de 1000 iterações enquanto o coeficiente converge para um valor solução. (TU; YEOH; LIU, 2013)

Figura 29 - Monitoramento de convergência de coeficiente de elevação

Fonte: Adaptado (TU; YEOH; LIU, 2013) p. 51.

3.4. DEMONSTRAÇÃO

Na etapa de demonstração, o investigador deve observar e obter dados do comportamento do artefato de frente com a hipótese de solução do problema apresentada, observando os resultados de forma crítica, partindo de seus conhecimentos prévios para avaliar se o artefato atendeu aos requisitos da pesquisa, e identificar em quais fases do projeto existem possibilidades de melhoria, e quais etapas cumpriram com os requisitos (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JÚNIOR, 2015).

Devem também ser identificados os limites do artefato e as situações nas quais ele é aplicável, para que ao formalizar a conclusão na fase de avaliação, o artefato desenvolvido possa ser generalizado para uma classe de problemas, o que permite que o método possa ser replicado em contextos semelhantes (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JÚNIOR, 2015).

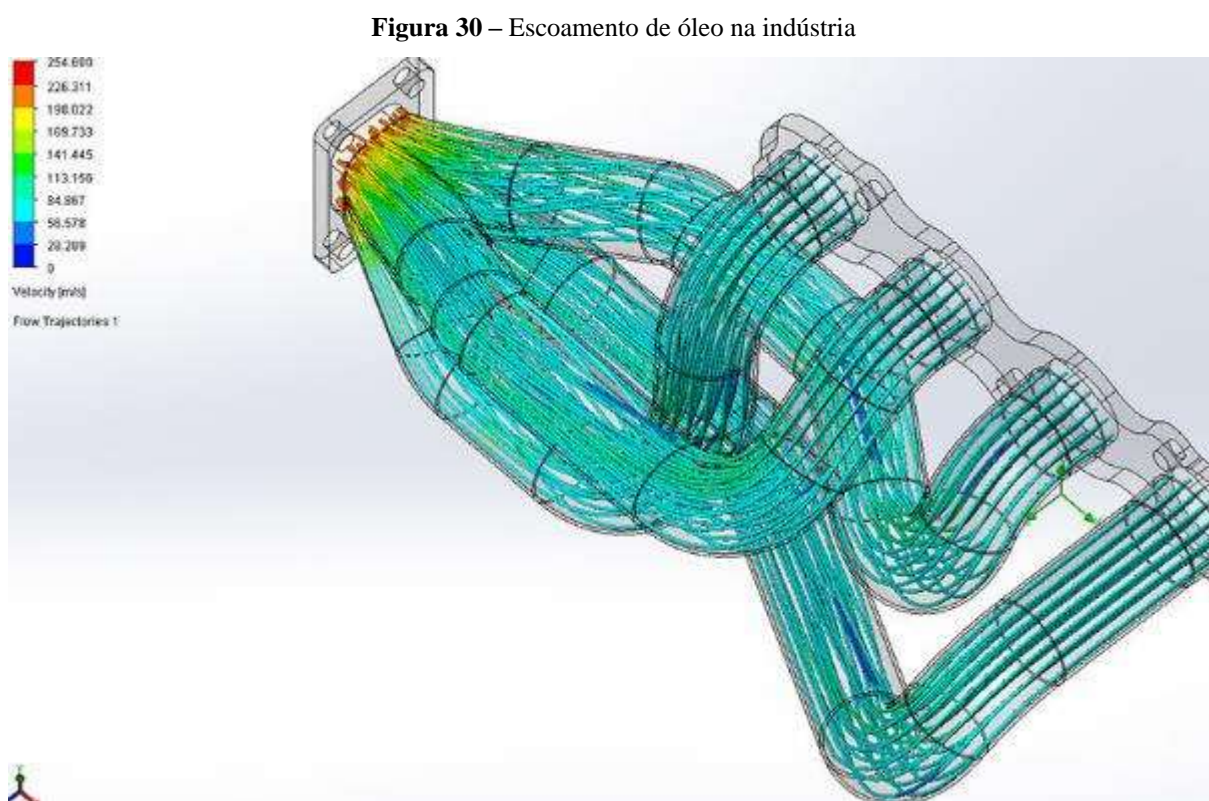
Nesta seção serão abordados os resultados da simulação em suas diferentes formas de visualização. Os resultados podem ser expressos por imagens gráficas coloridas, animações ou gráficos de pontos, vetores ou contornos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Os gráficos bidimensionais costumam representar a variação de uma variável de transporte dependente com outra variável independente. Normalmente são utilizados como dados quantitativos a fim de comparar os resultados da análise com dados experimentais. Tem

pontos facilmente identificáveis facilitando na apresentação de pontos de perfis de velocidade ou para definir pressão em pontos específicos (TU; YEOH; LIU, 2013).

Já os gráficos vetoriais fornecem os meios pelos quais uma quantidade vetorial é exibida em pontos com a orientação indicando direção e o tamanho do vetor indicando a magnitude (TU; YEOH; LIU, 2013).

Os gráficos de contorno são uma das representações gráficas de dados mais encontradas nas simulações CFD sendo a variação das cores o indicativo da variação das propriedades. A Figura 30 representa um exemplo de escoamento de óleo na indústria (TU; YEOH; LIU, 2013).



Fonte: (IMAGINATIONEERING DESIGN SOLUTIONS, 2021)

Já a animação consiste no resultado apresentado em movimento construindo uma representação fiel e dinâmica do resultado. Ela é capaz de ilustrar o comportamento e aspectos físicos da dinâmica dos fluidos dando vida ao fluxo de fluido e dessa forma tem papel fundamental na melhoria do sistema analisado (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

3.5. AVALIAÇÃO E COMUNICAÇÃO

Durante o processo de pesquisa, conhecimentos serão gerados, dentre eles serão identificadas limitações que devem ser explicitadas para orientação e apoio a trabalhos futuros. Os resultados e conclusões da pesquisa deverão ser formalizados, juntamente com a descrição do processo de tomada de decisão exigidas durante todo o processo de desenvolvimento da pesquisa (RODRIGUES, 2018).

Para que o conhecimento e o artefato generalizado definidos possam ser difundidos para os interessados na temática, é essencial que os resultados sejam amplamente divulgados, tanto no meio acadêmico quanto no meio industrial, seja por meio de publicações em revistas do setor, apresentação do projeto em congressos, realização de seminários, ou outros meios de comunicação formal (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JÚNIOR, 2015).

Para produções acadêmicas como deste trabalho, a comunicação ocorre durante a apresentação do mesmo para especialistas da área científica e técnica. A monografia publicada na biblioteca de trabalhos acadêmicos também é uma forma de comunicação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão abordados os principais resultados desta pesquisa. Para realizar tal, foram selecionados artigos relevantes na área de interesse da pesquisa, no intuito de verificar as tendências da utilização de análises fluidodinâmicas computacionais em melhorias e otimizações de equipamentos hidromecânicos. Este levantamento faz parte da primeira etapa da metodologia DSR e está apresentado nos tópicos de introdução e justificativa.

Já a segunda etapa do método, que trata da definição dos objetivos da solução está contida na fundamentação teórica (Capítulo 2) onde são apresentados os conceitos de mecânica dos fluidos, dinâmica dos fluidos computacional e discute-se sobre a estrutura das unidades geradoras de energia.

A terceira etapa da metodologia DSR tem como objetivo apresentar a aplicação do método proposto para criação de um artefato do tipo modelo. Conforme abordado nos aspectos metodológicos deste trabalho, a metodologia DSR permite interações entre suas etapas, e para que seja possível apresentar estas iterações, definiu-se a subdivisão deste tópico em 3 subtópicos.

O primeiro subtópico apresentará o design, desenvolvimento, demonstração e avaliação do objeto de estudo em sua configuração inicial. Na etapa de avaliação da versão inicial, serão analisados os desvios de expectativas e propostas modificações que serão apresentadas no subtópico 2. Já o subtópico 3 apresentará a aplicação do método no objeto de estudo modificado.

4.1. GEOMETRIA INICIAL

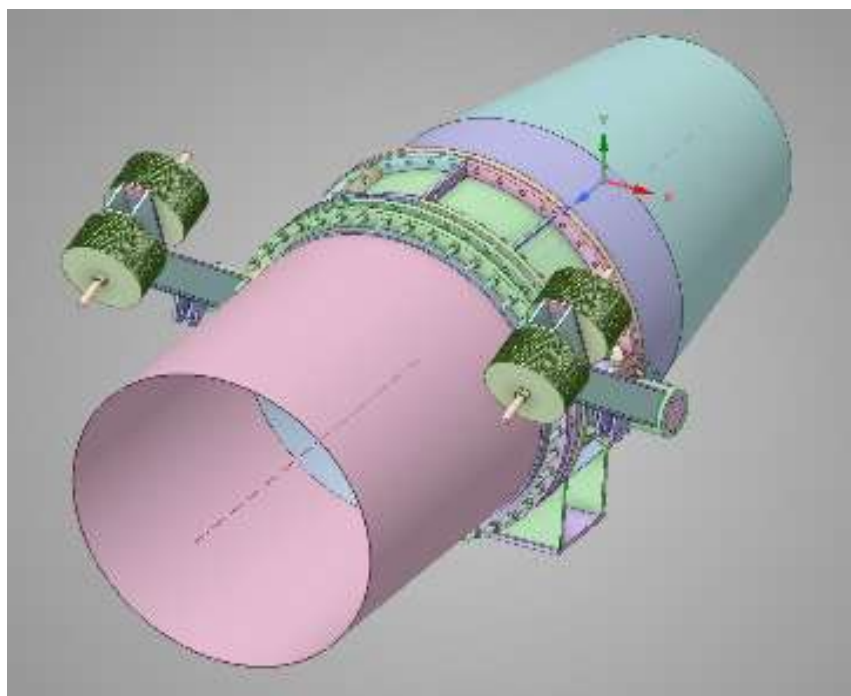
4.1.1. CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO

O subtópico 3.3 apresentou as etapas de simulação fluidodinâmica conforme exposto no livro *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach* – obra dos autores Jiyuan Tu, Guan Heng Yeoh e Chaoqun Liu. Nesta seção, o método será aplicado na configuração inicial da válvula borboleta.

4.1.1.1. CRIAÇÃO DA GEOMETRIA

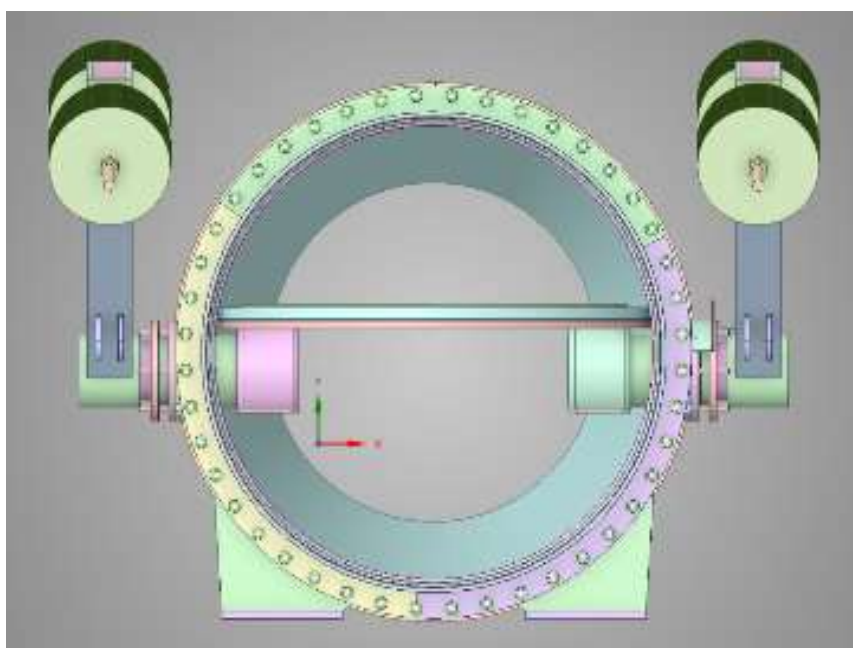
Nesta etapa, a geometria a ser simulada foi importada para o ANSYS Discovery Live conforme Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Vista isométrica da geometria importada



Fonte: Autoria própria

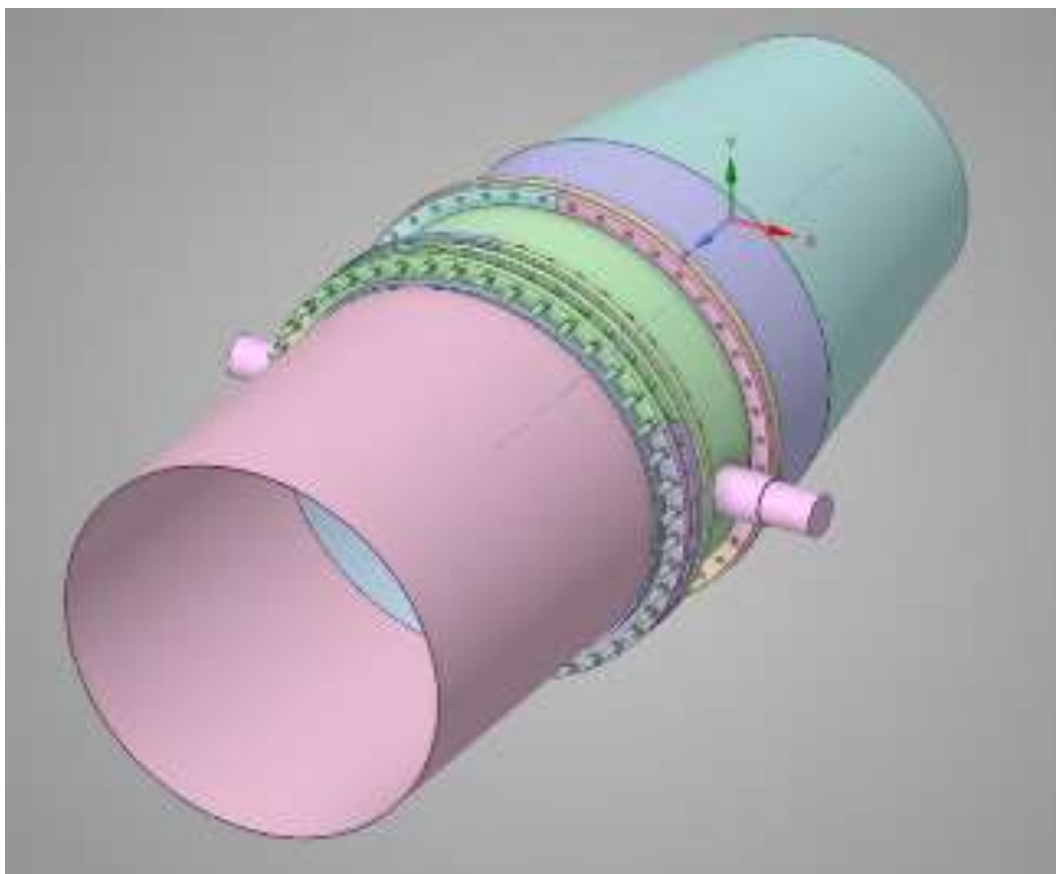
Figura 32 – Vista frontal da geometria



Fonte: Autoria própria

A partir da geometria importada, foi possível realizar a simplificação da mesma. Esta etapa contemplou a remoção de elementos com pouca ou nenhuma importância no desenvolvimento do escoamento. Por isso, foram removidos alguns elementos como: bases, contrapesos, buchas e o sistema de acionamento da válvula borboleta conforme apresentado na Figura 33.

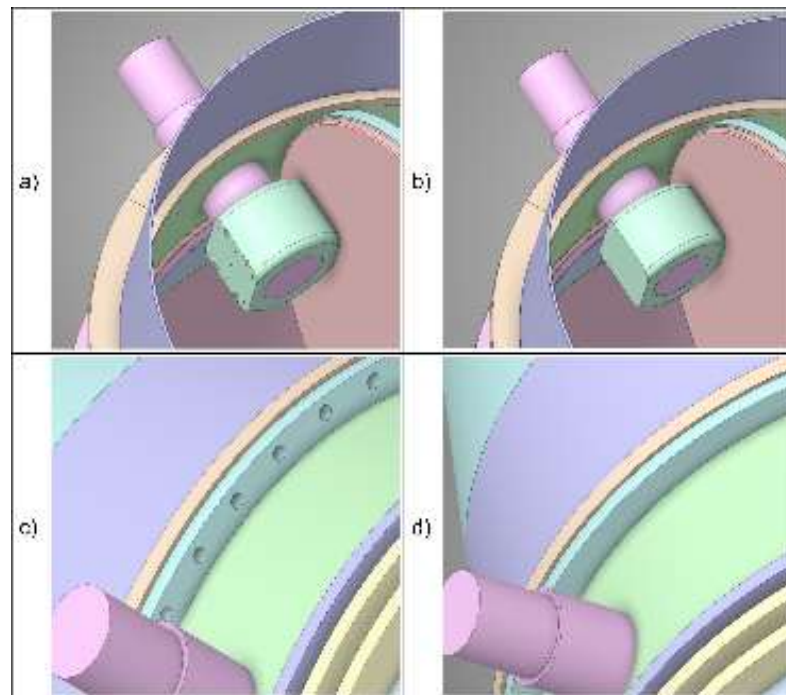
Figura 33 – Geometria com remoção de elementos



Fonte: Autoria própria

Então, foram removidas porcas e parafusos presentes entre flanges e no sistema de acionamento do equipamento. Na sequência, os furos, rasgos de chavetas e alguns entalhes foram preenchidos finalizando a etapa de simplificação. A Figura 34 abaixo exemplifica os preenchimentos citados.

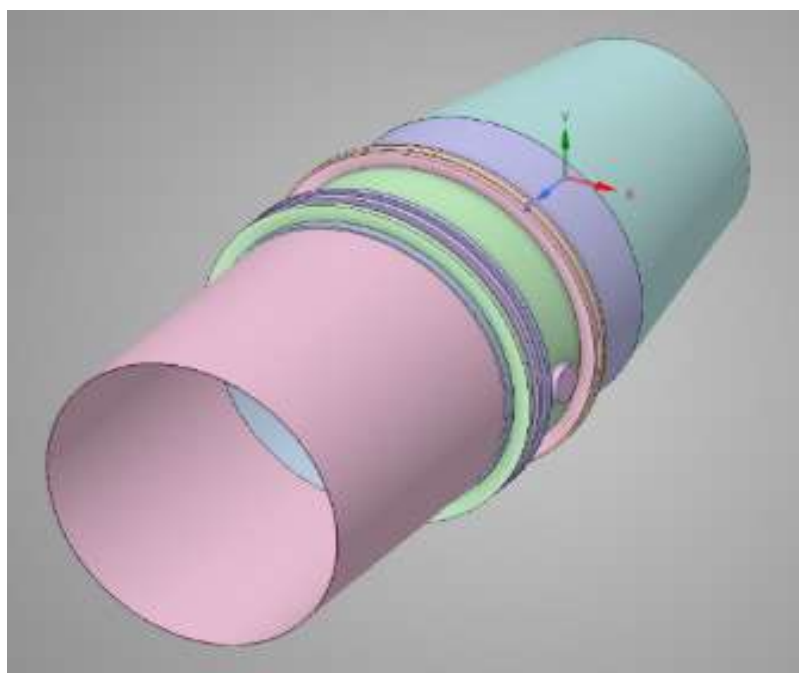
Figura 34 – Geometria do: a) sistema de acionamento antes da simplificação, b) sistema de acionamento simplificado, c) flange antes da simplificação, d) flange simplificado



Fonte: Autoria própria

Após a supressão de elementos e simplificação da geometria, o equipamento apresentado na Figura 35 pôde ter a região de escoamento em domínio computacional gerada.

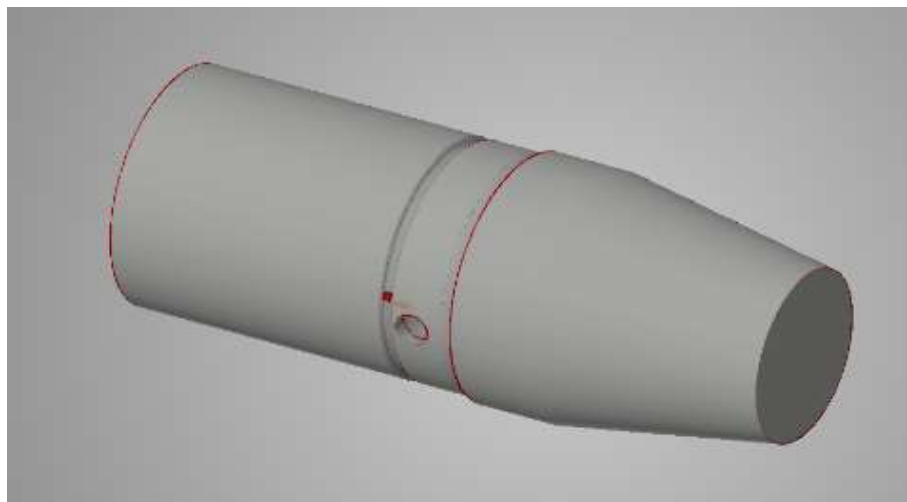
Figura 35 – Geometria simplificada



Fonte: Autoria própria

A Figura 36 ilustra a região de escoamento em domínio computacional. Esta região foi extraída ao indicar as faces de entrada e saída do fluido. A mesma consiste no caminho percorrido pelo fluido dentro do equipamento.

Figura 36 – Região de escoamento em domínio computacional



Fonte: Autoria própria

A simplificação da geometria como procedimento anterior a criação da região de escoamento é importante, pois, ao eliminar furos, chanfros, arredondamentos e elementos sem importância no desenvolvimento do escoamento, reduz-se a complexidade da região fluida, possibilitando a criação de uma malha mais fiel e reduzindo os custos computacionais de simulação.

4.1.1.2. GERAÇÃO DE MALHA

A malha utilizada nesta análise foi gerada automaticamente através da combinação de elementos tetraédricos e hexaédricos. Esta combinação de dois diferentes tipos de elementos foi necessária para garantir boa qualidade de malha e reduzir o tempo de simulação. Nos entornos da região da válvula borboleta, os elementos predominantes foram os tetraédricos pois estes possibilitam gerar malha em geometrias mais complexas, contudo, o número de elementos e tempo de simulação são maiores. Já nos entornos do conduto forçado e cone da caixa espiral, onde a complexidade da geometria é menor, os elementos gerados foram majoritariamente hexaédricos que apresentam menor complexidade e tempo de simulação. A malha gerada foi a de maior fidelidade fornecida pelo software, com o tamanho de elementos igual a 20,00 mm, ou seja, a distância entre os vértices desses elementos não foi maior que 20,00 mm.

4.1.1.3. PROPRIEDADE FÍSICAS DO FLUIDO

O fluido da simulação foi água em temperatura de 20° C conforme propriedades físicas apresentadas no Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 – Propriedades físicas da água

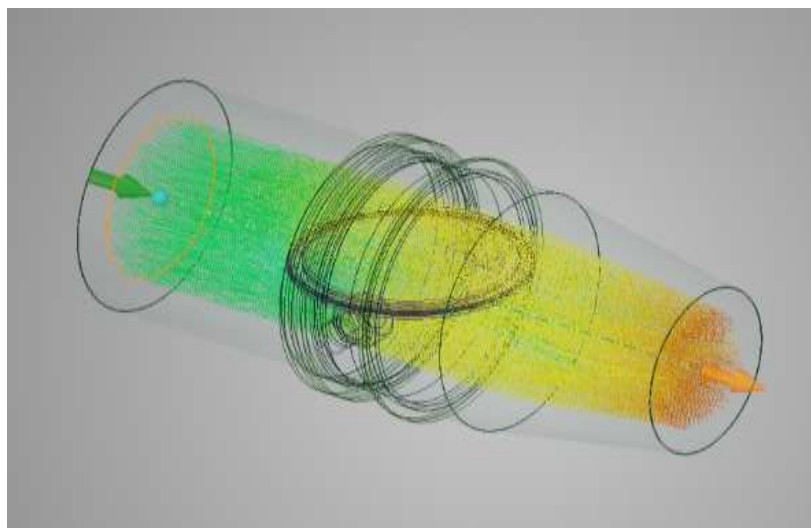
Fase	Líquida
Densidade	998,20 $\frac{kg}{m^3}$
Viscosidade	0,001 Pa.S
Condutividade térmica	0,58 $\frac{W}{m.K}$
Calor específico	4.198 $\frac{J}{kg.K}$
Coefficiente de expansão térmica	2,07 x 10 ⁴ K ⁻¹

Fonte: Autoria própria

4.1.1.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO

As regiões de entrada e saída do fluido são as faces indicadas pelas setas na Figura 37. A seta na cor verde aponta a face de entrada de água enquanto a seta na cor laranja aponta a face da saída de água.

Figura 37 – Entrada e saída de água



Fonte: Autoria própria

Outros dados de entrada importantes para esta simulação fluidodinâmica são a velocidade de entrada do fluido, que neste estudo é igual à $2,72 \frac{m}{s}$ e a pressão de entrada que é igual à 0,39 MPa (equivalente a 39,80 metros de altura bruta de queda).

Após alimentar o software com as informações de pré-processamento, foi possível realizar a análise diferencial do volume de controle em regime transiente.

4.1.1.5. CONTROLE DE SOLUÇÃO

No controle de solução, o usuário pode definir algumas características da análise com o intuito de facilitar a visualização dos resultados. Estas características serão listadas a seguir:

- Características das linhas de corrente, como o número de linhas e a largura das mesmas.
- Ajuste do tamanho e transparência das partículas que representam o escoamento. Pode-se filtrar a visualização de forma que as de velocidade maior sejam apresentadas em cores quentes enquanto as de velocidade menor em cores frias.
- Os vetores apresentam o campo de velocidades do escoamento. O ajuste da largura, comprimento e número de vetores é necessária para facilitar a visualização destes elementos.

4.1.1.6. MONITORAMENTO DE CONVERGÊNCIA

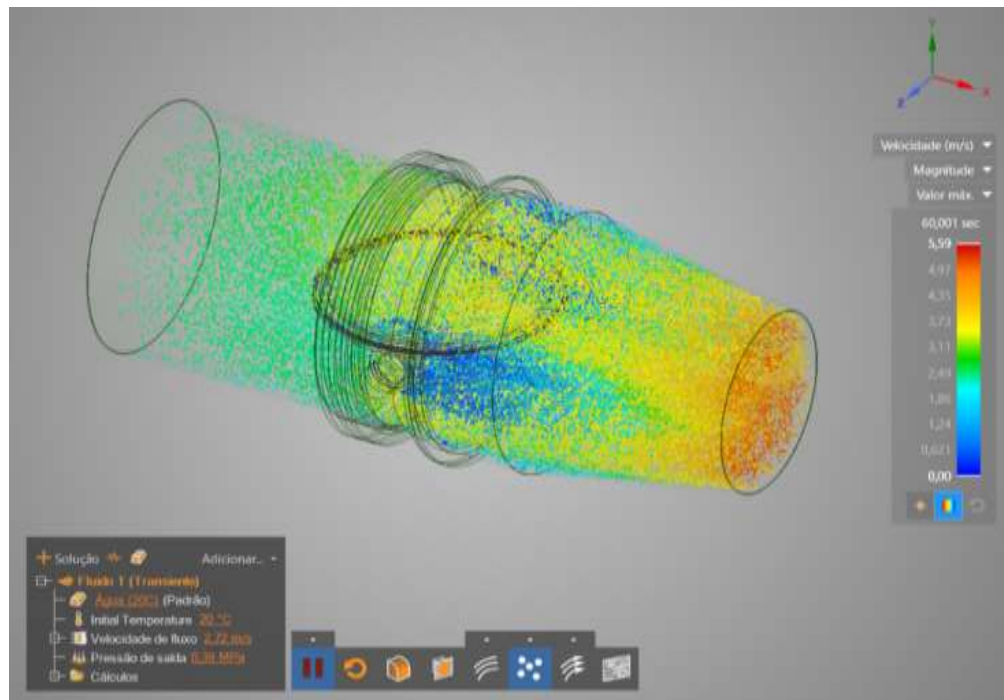
A duração da simulação foi definida em 60 segundos. Esse período foi arbitrado para que o escoamento do fluido pudesse se desenvolver plenamente. A simulação de 60 segundos resultou em 2223 iterações.

4.1.2. DEMONSTRAÇÃO

A entrada dos dados de pré-processamento no software, aliado aos ajustes no controle da solução, permitem que a ferramenta CFD apresente os resultados da simulação do modelo. Conforme abordado no subtópico 3.4., a etapa de demonstração do método DSR contempla estes resultados de simulação apresentados como dados de pós-processamento (imagens gráficas, animações e gráficos). A imagem gráfica que será apresentada a seguir consiste na

representação do escoamento do fluido em forma de partículas, sendo possível verificar a velocidades das mesmas conforme a variação de cores – Figura 38.

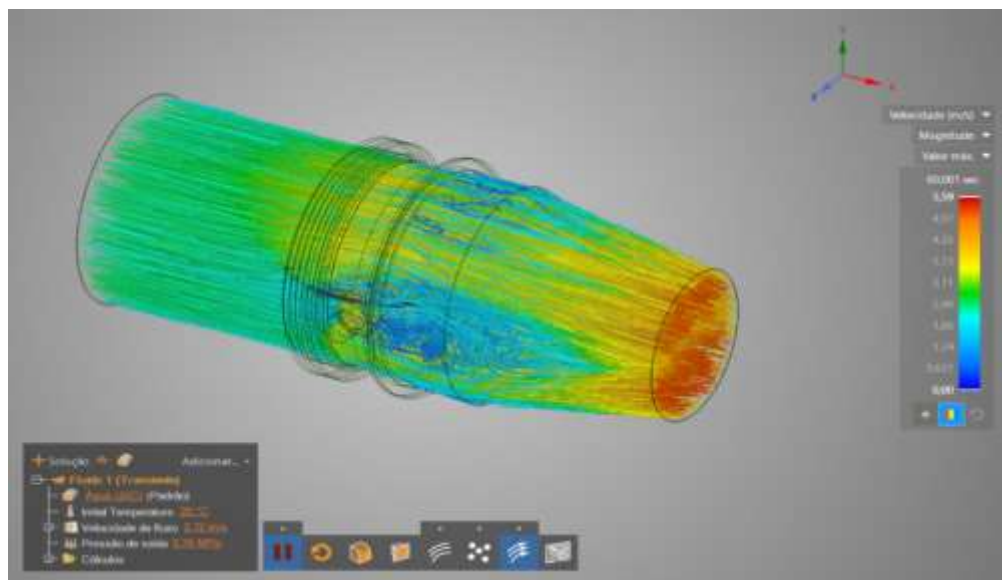
Figura 38 – Escoamento em forma de partículas



Fonte: (Autoria própria)

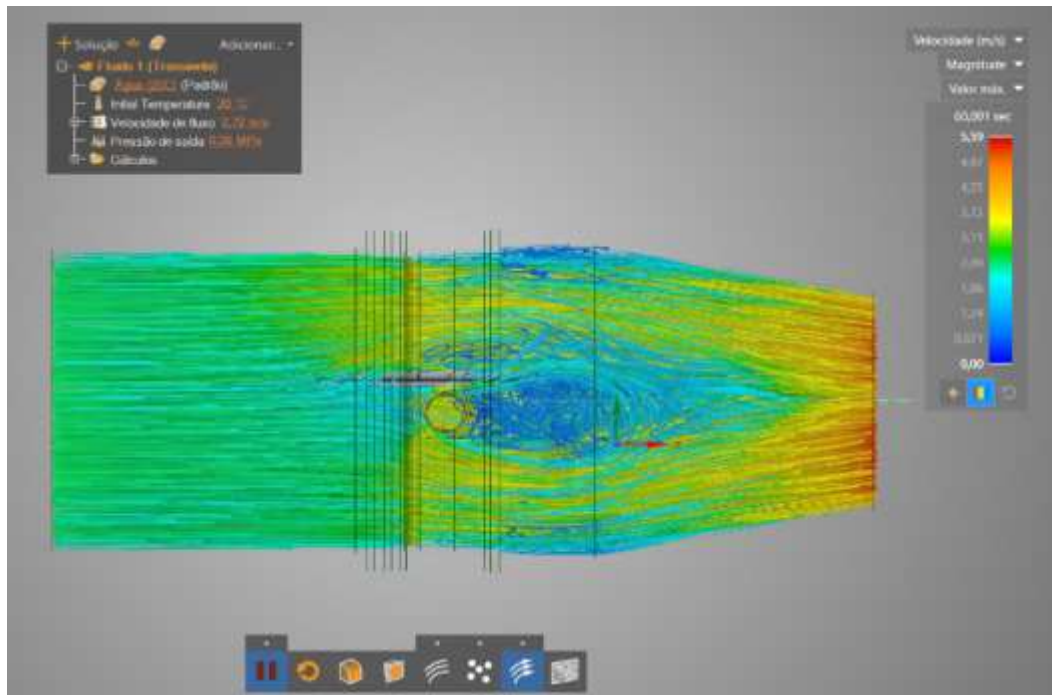
Já as Figuras 39, 40 e 41 retratam o campo de velocidades em forma vetorial sendo possível verificar regiões de recirculação e o surgimento da turbulência.

Figura 39 – Vista isométrica do campo de velocidades do escoamento



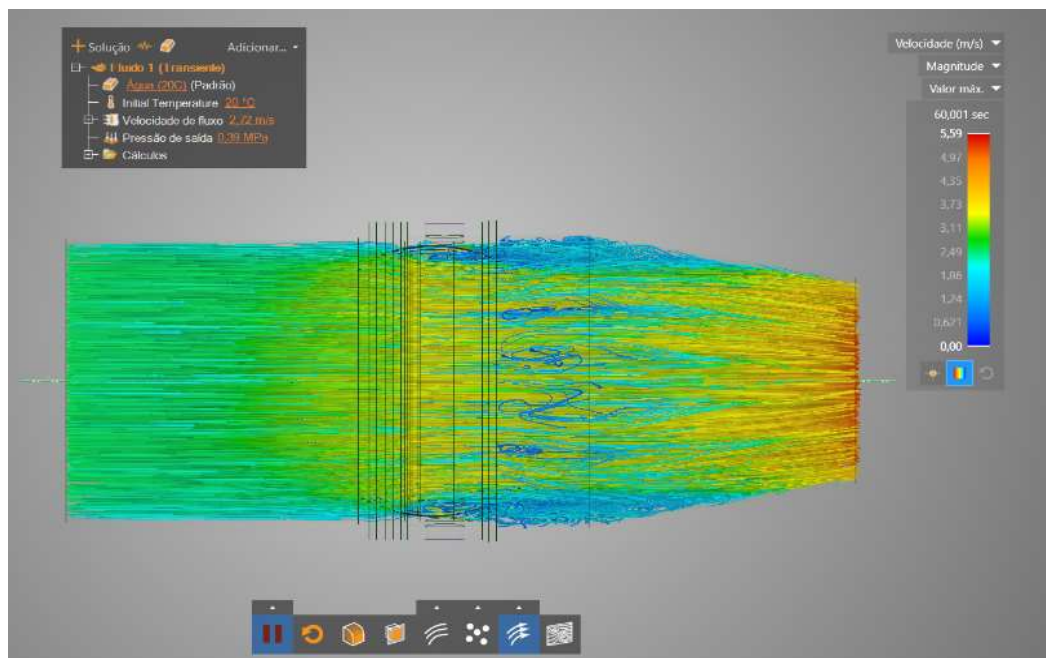
Fonte: Autoria própria

Figura 40 – Vista lateral do campo de velocidades do escoamento



Fonte: Autoria própria

Figura 41 – Vista superior do campo de velocidades do escoamento

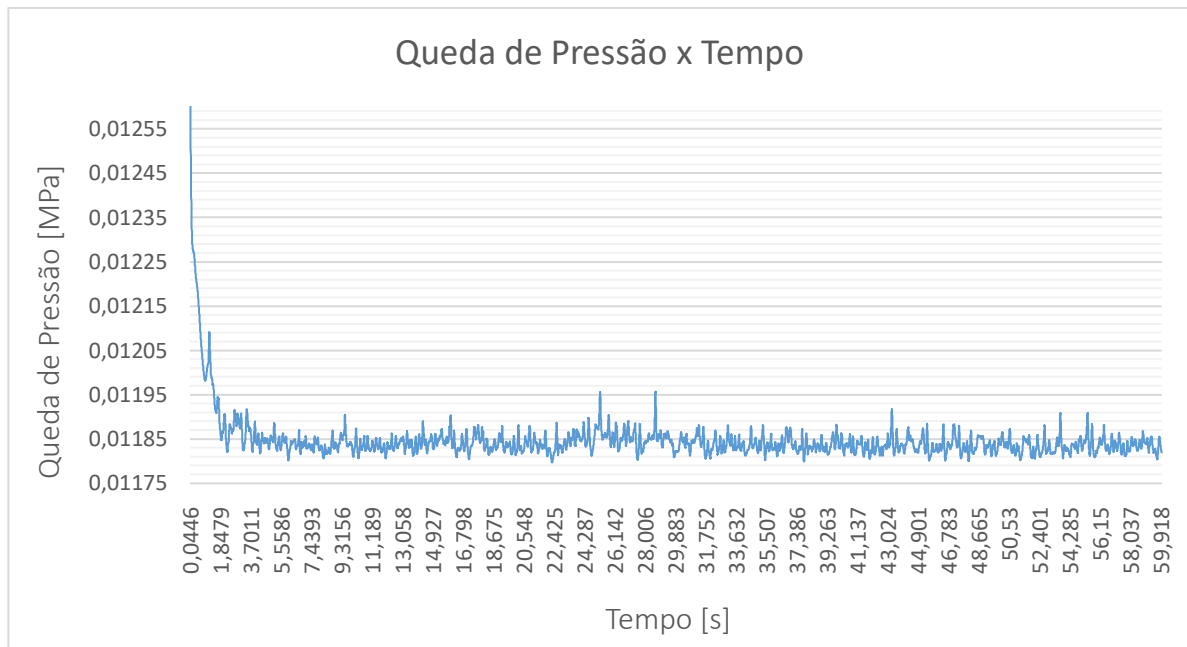


Fonte: Autoria própria

O escoamento pela válvula borboleta gera queda de pressão conforme apresentado na Figura 42 a seguir. Ao analisar os dados apresentados no gráfico, é possível verificar uma redução acentuada da queda de pressão durante o período inicial da simulação, isso se deve

pelo fato do escoamento ainda não se encontrar plenamente desenvolvido neste período. A partir de 3,00 segundos de simulação, alcança-se o patamar de estabilização que se mantém até o fim da simulação. Neste patamar, a queda de pressão média é de 0,01185 MPa.

Figura 42 – Gráfico Queda de pressão (MPa) x Tempo (s)



Fonte: Autoria própria

4.1.3. AVALIAÇÃO

Ao analisar o escoamento em forma de partículas (Figura 38) é possível observar que este não apresentou velocidade constante. No entanto, evidenciou padrões de velocidades que serão discutidos a seguir:

- Na região do conduto forçado, a velocidade das partículas oscilou pouco. Ao analisar o gradiente de cores é possível verificar que majoritariamente a velocidade nesta região manteve-se entre 2,49 m/s e 3,11 m/s. Esta consideração só não é válida para as proximidades da parede do conduto, nessas regiões a velocidade tende zero.
- A região da válvula borboleta apresentou uma grande oscilação na velocidade das partículas. Isto pode ser justificado pela presença de um obstáculo durante o desenvolvimento do escoamento. Este obstáculo trata-se do conjunto formado por disco, cubo e eixo da válvula borboleta. Quando a válvula está totalmente aberta, o escoamento ocorre por estes elementos. Ao analisar esta região, vale ressaltar a desaceleração crítica que ocorre enquanto o fluido escoar nos entornos do cubo da válvula.

- Na região do cone da caixa espiral, a velocidade das partículas apresenta duas características relevantes. A primeira trata-se da aceleração apresentada no desenvolvimento do escoamento pelo cone, isso se deve pela redução da área de seção transversal do mesmo e é justificado pelo princípio da conservação da massa (Equação 10). A segunda característica é o perfil de velocidades formado nesta região com a velocidade próxima da camada limite igual a zero.

Nas Figuras 39, 40 e 41 o escoamento é apresentado em forma vetorial. Nesta configuração, além de analisar a velocidade do fluido, é possível verificar o comportamento do mesmo. A seguir serão realizadas ponderações sobre as imagens gráficas citadas.

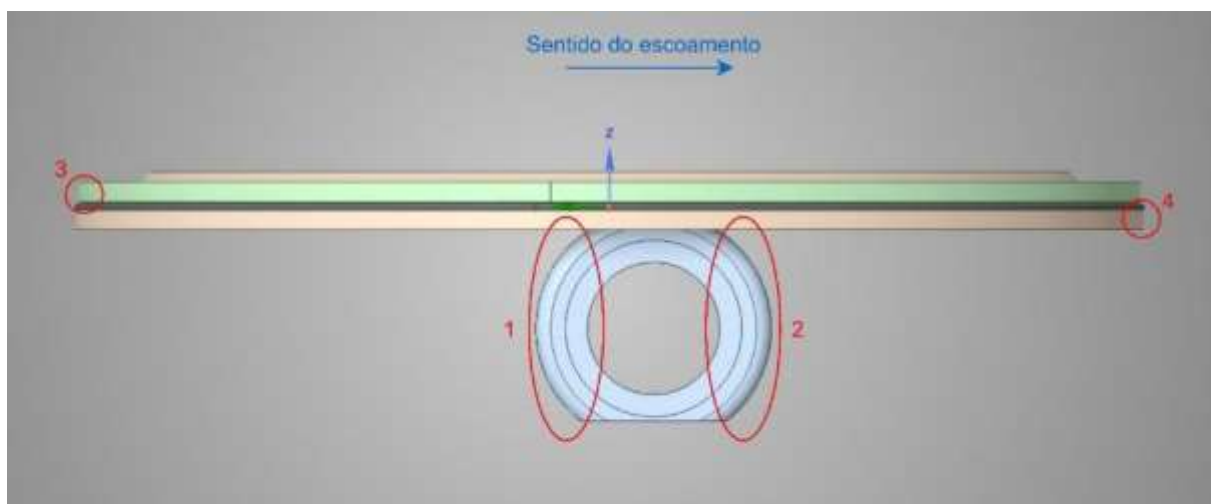
- Na Figura 40 constata-se que a desaceleração nos entornos do cubo da válvula borboleta se dá pela formação de uma região de recirculação que gera grande perturbação no escoamento.
- Na Figura 41 também é possível verificar regiões de recirculação, que podem ser justificadas pelo fato que existe um ressalto na transição da válvula borboleta para o cone da caixa espiral. Além do desarranjo do escoamento, este ressalto causa queda de pressão devido a variação da área de seção transversal. O item 2 do Anexo A ilustra este tipo de queda.

Além da queda por expansão já citada, outras quedas podem ser identificadas neste escoamento. São elas: queda devido à camada limite e queda ocasionada pela presença de obstáculos no desenvolvimento do escoamento. O gráfico apresentado na Figura 42 ilustra a queda de pressão total durante o escoamento. O valor desta queda é de aproximadamente 0,01185 MPa (1,21 metros de coluna d'água). Nessas condições, a potência hidráulica com válvula borboleta inicial pode ser conforme Equação 20.

$$P_{hidráulica, inicial} = 997,00 \left[\frac{kg}{m^3} \right] 4,81 \left[\frac{m^3}{s} \right] 39,80 [m] 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] = 1872,37 kW$$

4.2. MODIFICAÇÕES NA GEOMETRIA

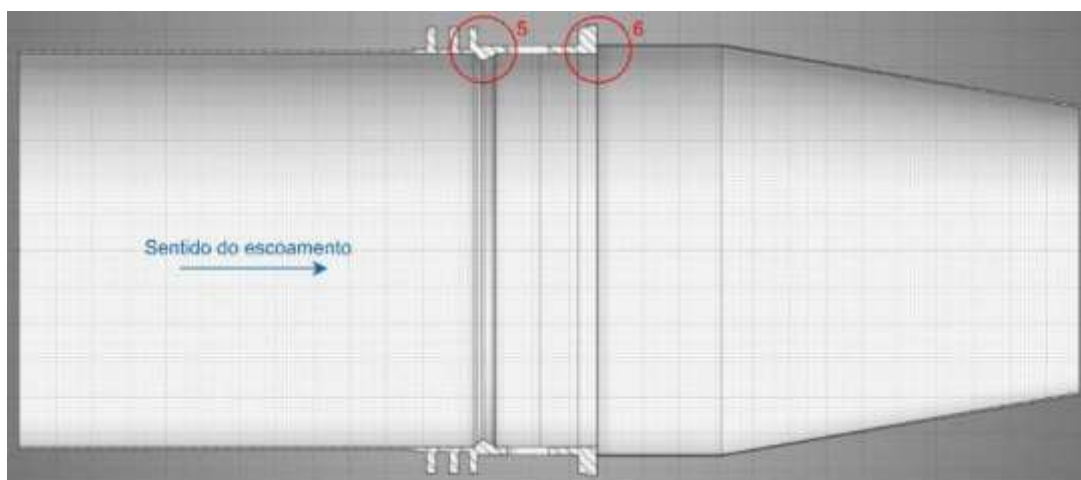
Conforme abordado na seção anterior, no campo de velocidades apresentado nas Figuras 39, 40 e 41, é possível verificar regiões de recirculação nas proximidades dos cubos da válvula borboleta. Os pontos 1 e 2 da Figura 43 a seguir indicam essas regiões críticas.

Figura 43 – Disco, fixação da vedação e cubo da válvula borboleta

Fonte: Autoria própria

Além disso, sobre a superfície do disco, regiões de recirculação também estão presentes. Isso se deve ao perfil pouco fluidodinâmico do disco e fixação da vedação. Os pontos 3 e 4 da Figura 43 apontam esse perfil.

Analisando o escoamento interno pelo corpo da válvula borboleta, os pontos 5 e 6 da Figura 44 são considerados relevantes, pois neles estão presentes ressaltos e rebaixos. A variação de diâmetro no escoamento interno gera perturbações no fluido e queda de pressão.

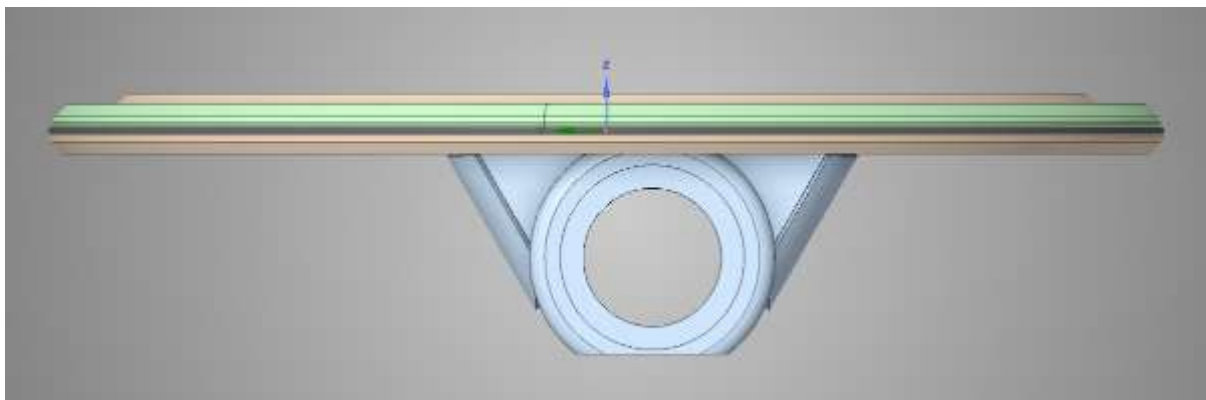
Figura 44 – Perfil de escoamento interno

Fonte: Autoria própria

A fim de reduzir os pontos críticos indicados nas Figuras 43 e 44, algumas modificações na geometria da válvula borboleta foram promovidas.

Nos pontos 1 e 2, o cubo recebeu alguns reforços no intuito promover uma melhoria no escoamento pela região crítica. Esses reforços consistem em chapas cortadas e soldadas nos cubos e corpo da lentilha conforme apresentado na Figura 45.

Figura 45 – Disco, fixação da vedação e cubo modificados

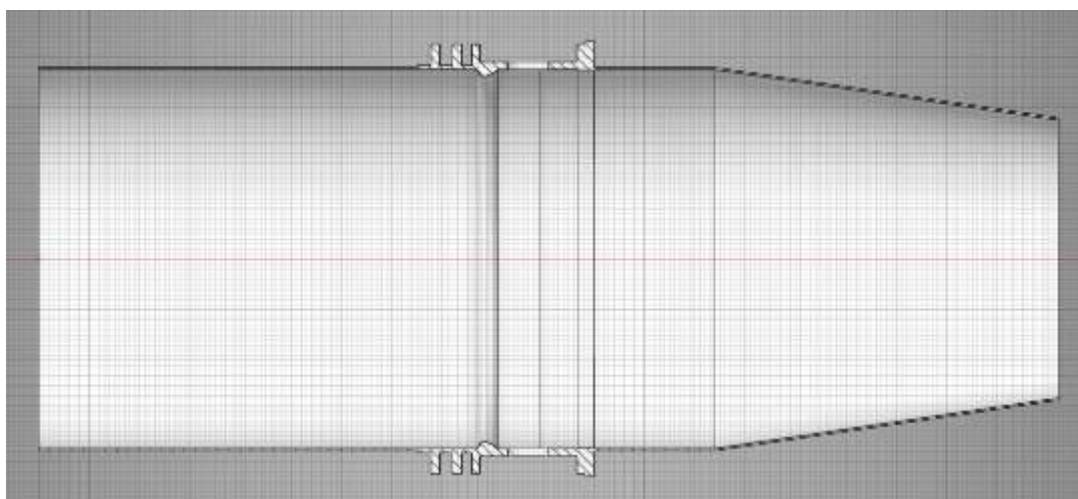


Fonte: Autoria própria

A Figura 45 também apresenta melhorias nos pontos 3 e 4. Esses pontos ganharam chanfros e arredondamentos para que o escoamento acontecesse de forma mais ordenada sobre o disco da válvula.

Conforme Figura 46, o ponto 6 teve o diâmetro do tubo da caixa espiral ajustado para o diâmetro igual ao interno da válvula borboleta evitando assim um ressalto.

Figura 46 – Perfil de escoamento modificado



Fonte: Autoria própria

O ponto 5 permaneceu sem alteração pois possui um rebaixo necessário para vedação da borracha da válvula borboleta.

4.3. GEOMETRIA MODIFICADA

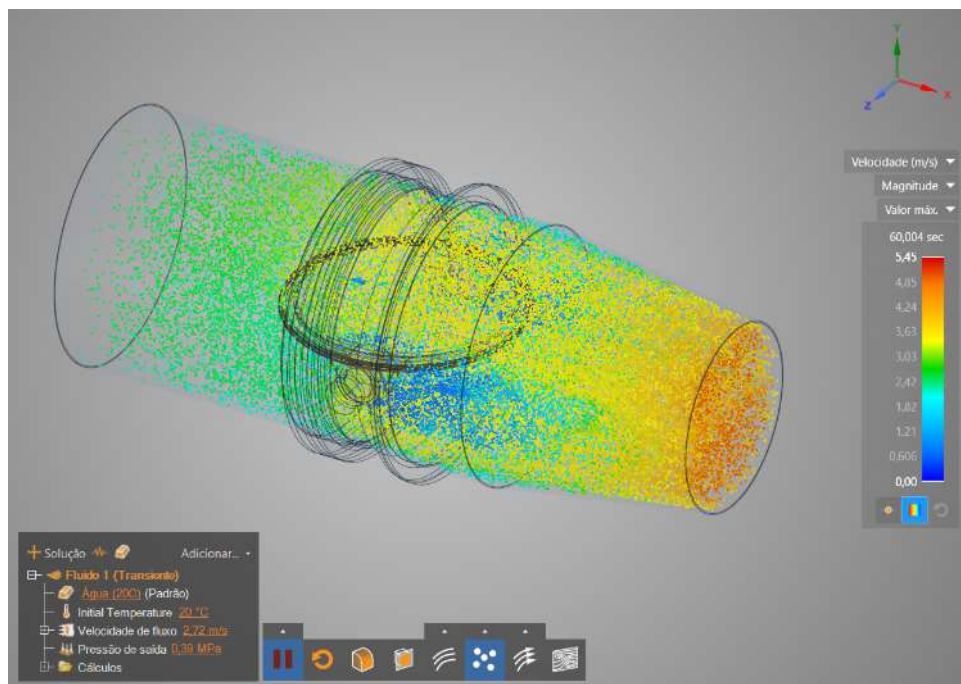
4.3.1. CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO

Nesta seção, o método será aplicado na configuração modificada da válvula borboleta. Esta etapa é análoga ao procedimento executado no tópico 4.1.1., no entanto, a geometria utilizada para simulação segue as modificações apresentadas no subtópico 4.2.

4.3.2. DEMONSTRAÇÃO

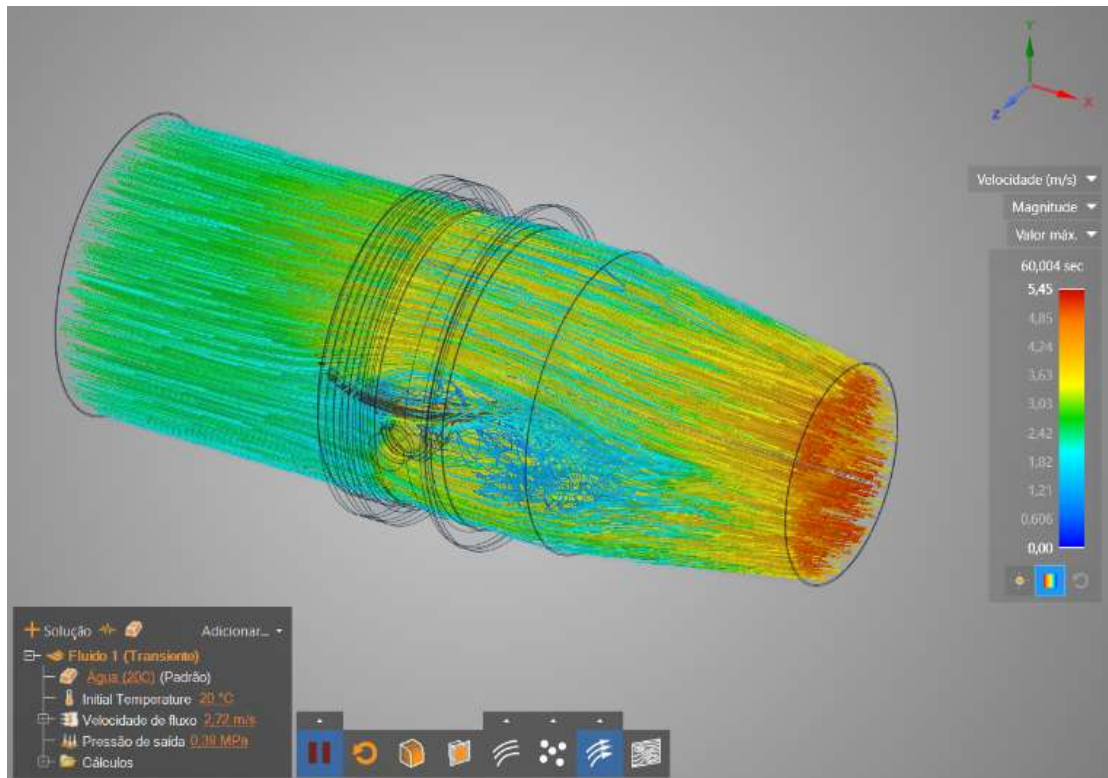
Nesta etapa da metodologia DSR serão apresentados os resultados da simulação como dados de pós-processamento (imagens gráficas, animações e gráficos). A Figura 47 apresentada a seguir trata-se do escoamento do fluido em forma de partículas obtido da simulação fluidodinâmica da válvula borboleta com geometria modificada.

Figura 47 – Escoamento em forma de partículas com geometria modificada

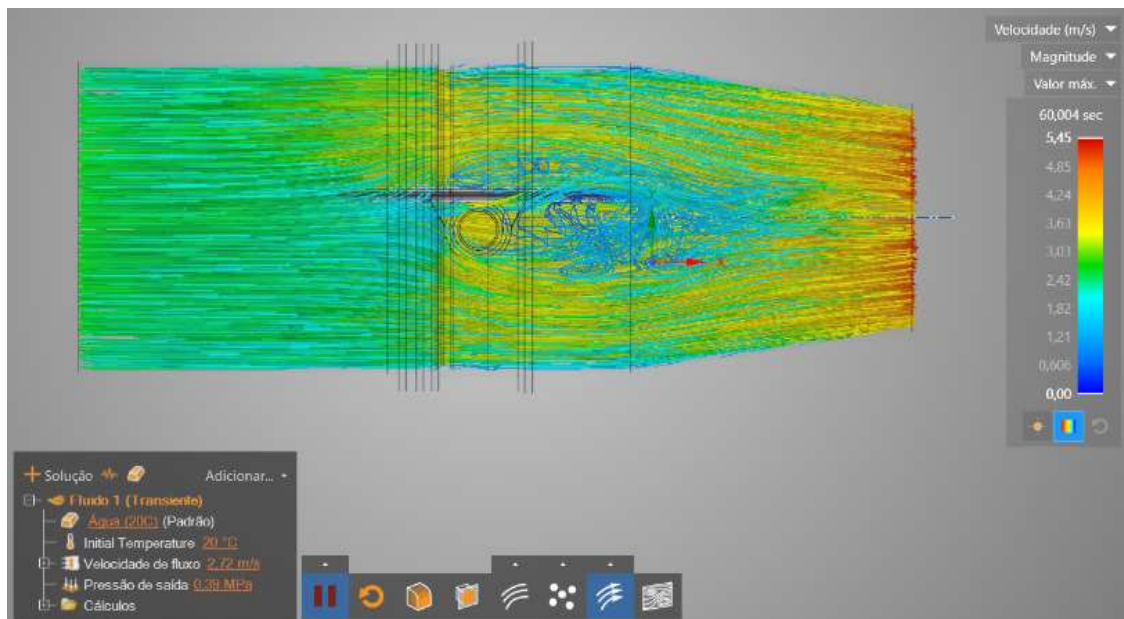


Fonte: Autoria própria

As Figuras 48, 49 e 50 retratam o campo de velocidades em forma vetorial.

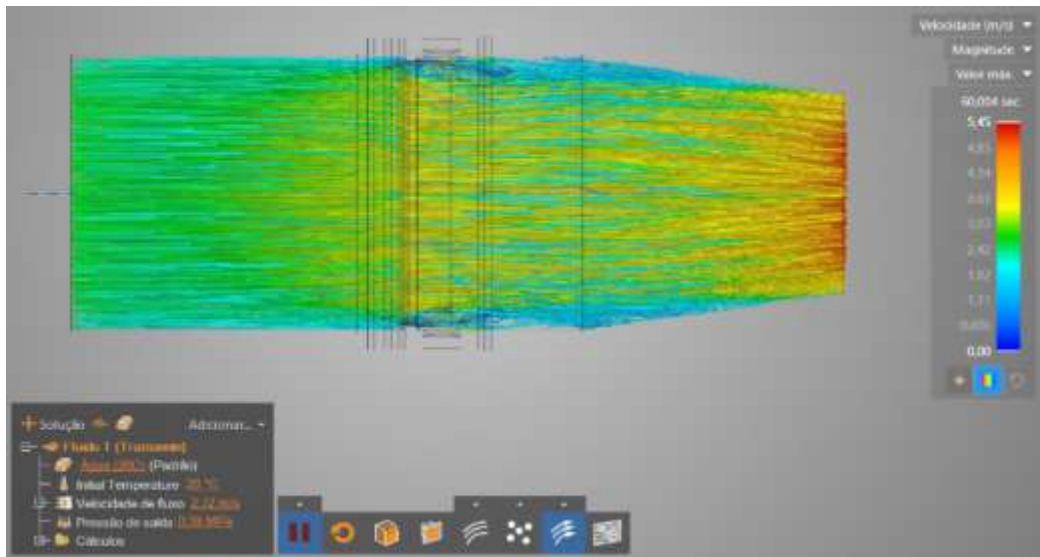
Figura 48 – Vista isométrica do campo de velocidades do escoamento com geometria modificada

Fonte: Autoria própria

Figura 49 - Vista lateral do campo de velocidades do escoamento com geometria modificada

Fonte: Autoria própria

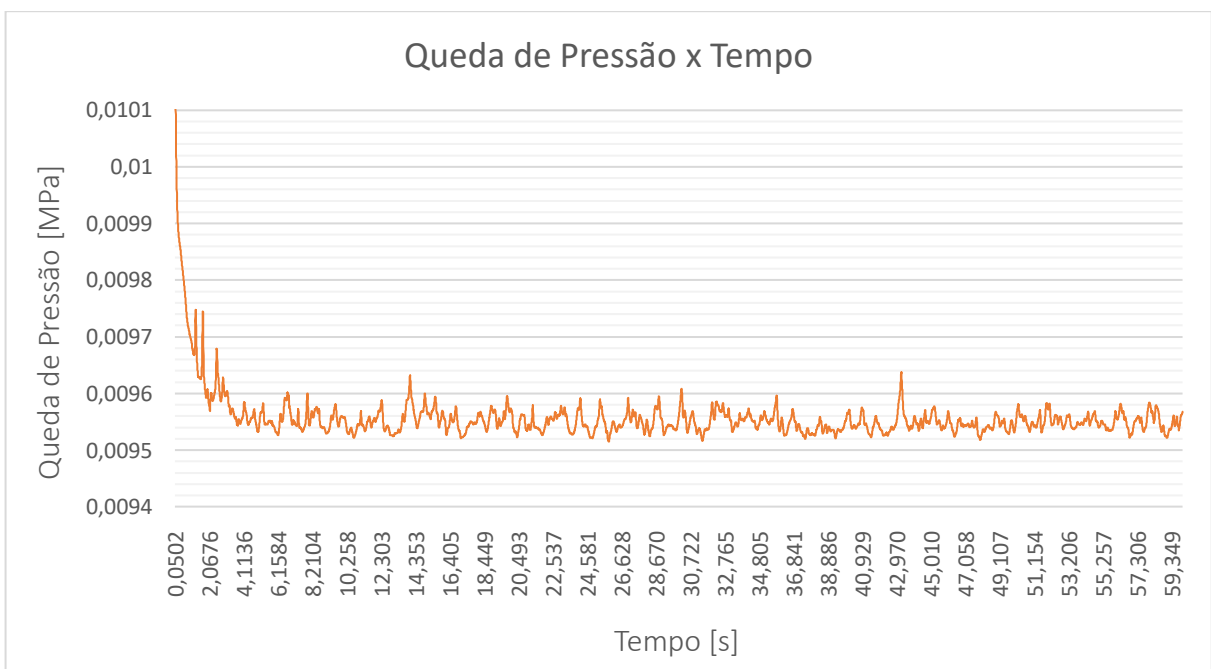
Figura 50 - Vista superior do campo de velocidades do escoamento com geometria modificada



Fonte: Autoria própria

A queda de pressão do escoamento pela válvula borboleta com geometria modificada está presente na Figura 51. Neste gráfico há uma redução acentuada da queda de pressão durante o período inicial da simulação devido ao não desenvolvimento pleno do escoamento. Este desenvolvimento é alcançado a partir de 3,00 segundos de simulação com a queda de pressão estabilizando em 0,0095 MPa.

Figura 51 – Gráfico Queda de pressão (MPa) x Tempo (s) (geometria modificada)



Fonte: Autoria própria

4.3.3. AVALIAÇÃO E COMUNICAÇÃO

A análise da Figura 47 possibilita realizar as seguintes ponderações:

- O gradiente de cores na região do conduto forçado manteve-se entre 2,42 m/s e 3,03 m/s, salvo nas proximidades da parede do conduto, nessas regiões a velocidade se aproximou a zero.
- O princípio da conservação da massa age sobre o cone da caixa espiral resultando em uma aceleração do fluido devido a redução da área de seção transversal do mesmo. O mesmo vale para o princípio de camada limite que resulta em velocidade nas proximidades da parede do equipamento tendendo a zero.

As Figuras 48, 49 e 50 apresentam imagens gráficas do escoamento em forma vetorial. A análise destas permite verificar a redução das regiões de recirculação nas proximidades do cubo da válvula borboleta.

Já a queda de pressão da geometria modificada se aproximou de 0,0955 MPa (0,97 metros de coluna d'água) – Figura 51. Reduzindo cerca de 0,24 metros de coluna d'água em queda de pressão e por consequência aumentando em mesma quantidade a altura de queda nominal. Dessa forma, a potência hidráulica com válvula borboleta modificada pode ser calculada conforme Equação 20.

$$P_{hidráulica.modificada} = 997 \left[\frac{kg}{m^3} \right] 4,81 \left[\frac{m^3}{s} \right] 40,04 [m] 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] = 1883,66 kW$$

Por fim, a comunicação da pesquisa foi alcançada com a publicação de “Análise fluidodinâmica computacional da válvula borboleta de uma turbina Francis” (OSOVSKI, 2021).

5. CONCLUSÃO

Neste tópico será realizada a análise do desenvolvimento do trabalho seguindo o exposto na metodologia. Também serão realizadas ponderações sobre os resultados obtidos e se estes estão alinhados com os objetivos propostos.

No decorrer do trabalho foram apresentados os conceitos de mecânica dos fluidos e as equações de transporte que regem o CFD. Ao realizar a pesquisa de estado da arte sobre a dinâmica dos fluidos computacional, constatou-se diversas publicações em acervos, jornais e revistas acadêmicas que utilizam o CFD como ferramenta capaz de minimizar o tempo empregado e custos de novos projetos, além de alcançar resultados fiéis e com alto nível de detalhes. Atualmente, existe uma grande quantidade de ferramentas computacionais que possibilitam realizar análises fluidodinâmicas e de transferência de calor, neste cenário, o software ANSYS Discovery Live se destaca por possuir ambientes CAD e CAE integrados e processamento em memória gráfica. Estes fatores levaram a escolha desta ferramenta para realizar as análises fluidodinâmicas deste trabalho.

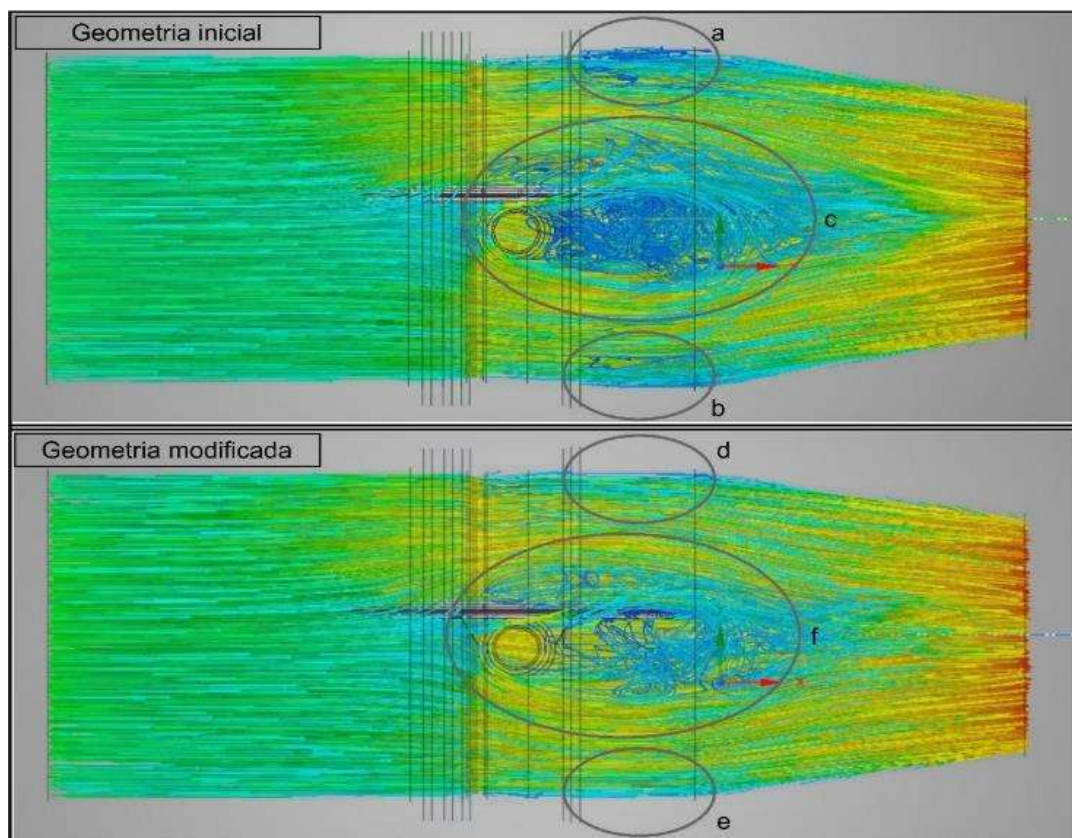
Além do apresentado sobre mecânica dos fluidos e CFD, a revisão teórica abordou sobre as unidades geradoras de energia elétrica apresentando sua estrutura e importância deste tipo de energia para o Brasil. A bibliografia convergiu em apresentar as turbinas hidráulicas, principalmente as do tipo Francis, no intuito de introduzir o objeto de estudo deste trabalho, a válvula borboleta.

A estrutura da metodologia adotada (*Design Science Research*) permitiu a identificação da oportunidade de pesquisa, definição dos objetivos, desenvolvimento e análise de resultados do trabalho. A utilização deste método consolidado aliado a bibliografia de dinâmica dos fluidos computacional possibilitou a criação de um artefato do tipo modelo com objetivo de otimizar a válvula borboleta de uma turbina Francis através de simulações fluidodinâmicas computacionais. Inicialmente a análise foi realizada na geometria inicial da válvula borboleta e com a demonstração e avaliação dos resultados foi possível sugerir modificações da geometria com o intuito de reduzir as regiões de recirculação e minimizar a queda de pressão. Estas modificações foram baseadas na teoria de mecânica dos fluidos e em acordo com o proposto nos objetivos. Na sequência, a geometria modificada passou por simulação fluidodinâmica.

Ao analisar as duas geometrias simuladas, é possível verificar que a modificada apresentou menores regiões de recirculação quando comparada com a geometria inicial. Isto está exemplificado pela Figura 52. Enquanto nas regiões “a” e “b” os vetores indicam a

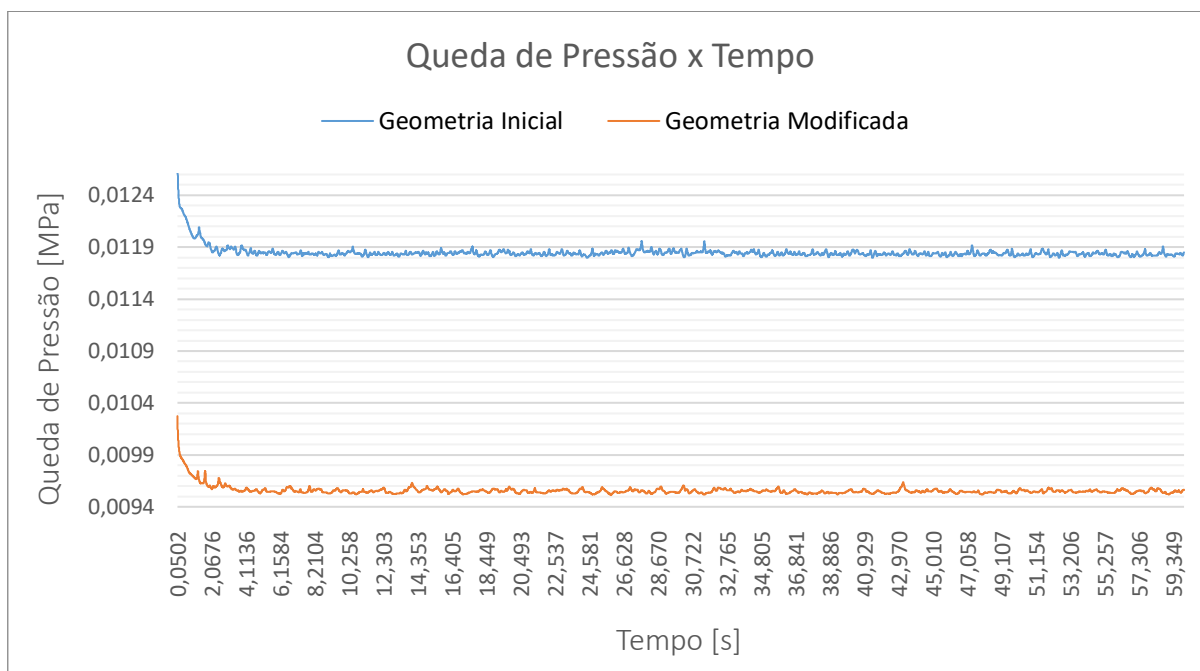
recirculação, nas regiões “d” e “e” o mesmo não acontece. Já ao comparar a região “f” com “c” nota-se uma grande redução da recirculação e menor desaceleração do escoamento. A redução dessas regiões de recirculação permite a diminuição da cavitação no interior do equipamento, reduzindo assim a falhas por erosão.

Figura 52 – Comparativo do campo de velocidades



Fonte: Autoria própria

Ao observar os campos de velocidade das geometrias é possível verificar que na geometria modificada a desaceleração da água é inferior à apresentada na geometria inicial (vide coloração dos vetores – cores mais frias indicam velocidades menores enquanto cores mais quentes indicam maiores velocidades). A redução das desacelerações no escoamento implica em menores quedas de pressão como pode ser verificado no gráfico ilustrado pela Figura 53. Outra redução das quedas de pressão está associada a remoção de um ressalto interno presente na geometria inicial e não mais presente na geometria modificada (vide alterações do tópico 4.2.).

Figura 53 – Gráfico comparativo de queda de pressão

Fonte: Autoria própria

A queda de pressão vista na geometria inicial foi de aproximadamente 0,01185 MPa enquanto na geometria modificada esta queda foi de 0,00955 MPa. Portanto a segunda configuração apresentou queda de pressão 19,40% inferior a primeira. Esta diminuição da queda de pressão resulta em um melhor aproveitamento dos recursos hídricos devido ao aumento intrínseco da potência da turbina visto que uma menor queda de pressão resultará em uma maior altura de queda nominal. Este aumento de potência foi igual a 0,603%.

Este trabalho identificou os cubos da válvula borboleta como regiões críticas do escoamento já que nos estornos destes elementos estão apresentadas as maiores regiões de recirculação e desaceleração. Futuros trabalhos podem realizar o dimensionamento ótimo do eixo e cubo aliados às modificações de geometria propostas neste trabalho. Na sequência, pode-se realizar a análise fluidodinâmica computacional do conjunto.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA No 875, DE 10 DE MARÇO DE 2020. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-normativa-n-875-de-10-de-marco-de-2020-248070610>>. Acesso em: 2 ago. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PCH'S E CGH'S - ABRAPCH. Cenário de PCHs e CGHs no Brasil. Disponível em: <<https://abrapch.org.br/o-setor/cenario-de-pchs-e-cghs-no-brasil/>>.
- BABUCKE, A.; RIST, U.; KLOKER, M. J. Direct Numerical Simulation of a Square-Notched Trailing Edge for Jet-Noise Reduction. n. January, 2008.
- BARAFORT, B. et al. Computer Standards & Interfaces A software artefact to support standard-based process assessment : Evolution of the TIP A ® framework in a design science research project. Computer Standards & Interfaces, v. 60, n. April, p. 37–47, 2018.
- BERMÚDEZ, C. A. et al. Three-dimensional CFD simulation of a large-scale grate-fired biomass furnace. Fuel Processing Technology, v. 198, n. September 2019, p. 106219, 2020.
- BILAL, F. S.; SEDREZ, T. A.; SHIRAZI, S. A. Experimental and CFD investigations of 45 and 90 degrees bends and various elbow curvature radii effects on solid particle erosion. Wear, v. 476, p. 203646, 15 jul. 2021.
- BISTAFA, S. R. Mecânica dos fluidos: noções e aplicações. São Paulo: Blucher, 2018.
- BOCK, M. Tipos de Turbinas Hidráulicas: Conheça os principais modelos. Disponível em: <<https://www.hidroenergia.com.br/blog/tipos-turbinas-hidraulicas/>>. Acesso em: 2 ago. 2021.
- CAPONE, L.; BENHAMADOUICHE, S.; HASSAN, Y. A. Source terms modeling for spacer grids with mixing vanes for CFD simulations in nuclear reactors. v. 126, p. 141–152, 2016.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. Mecânica dos fluidos : fundamentos e aplicações. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.
- CHUNG, H. et al. CFD-CSD coupled analysis of underwater propulsion using a biomimetic fin-and-joint system. Computers and Fluids, v. 172, p. 54–66, 2018.
- CONEXÃO TOCANTINS. Tomada d'água da UHE Estreito é concluída e montagem de turbinas segue em ritmo avançado.
- COSTA, G. S. Viabilização da aplicação volante de inércia de alta velocidade em locomotivas. p. 1–42, 2017.
- CREATIVE. Creative Solutions. Disponível em: <www.creative-solutions.eng.br>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. Design Science Research: Método de Pesquisa para Avanço da Ciência e Tecnologia. 1. ed. Porto Alegre: [s.n.].

DUEÑAS-PAMPLONA, J. et al. A comprehensive comparison of various patient-specific CFD models of the left atrium for atrial fibrillation patients. *Computers in Biology and Medicine*, v. 133, p. 104423, 1 jun. 2021.

ELETROBRAS. Barragem de Hidrelétrica. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Barragem-de-Hidreletrica.aspx>>. Acesso em: 2 ago. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Balanço Energético Nacional 2021, 2021.

ESSS. SOFTWARE ANSYS: Fluidodinâmica. Disponível em: <www.esss.co/ansys/fluidodinamica>.

FERNANDES, R. Vertedouro de Itaipu aberto para ajudar Paraguai e Argentina. Disponível em: <<https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/vertedouro-de-itaipu-aberto-para-ajudar-paraguai-e-argentina/>>. Acesso em: 2 ago. 2021.

FERREIRA, N. S. DE A. As pesquisas denominadas “estado da arte”. *Educação & Sociedade*, v. 23, n. 79, p. 257–272, 2002.

FOX, R. W. et al. *Introdução à mecânica dos fluidos*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

GEERTS, G. L. A design science research methodology and its application to accounting information systems research. *International Journal of Accounting Information Systems*, v. 12, n. 2, p. 142–151, 2011.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. *Métodos de pesquisa*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

HENDRICKSON, J. Ansys Discovery Live: Real-Time Simulation Revolution. v. 3304, n. January, p. 50–53, 2020.

IMAGINATIONEERING DESIGN SOLUTIONS. **Importance of Flow Engineering for Oil and Gas Industry**. Disponível em: <www.imaginationeering.com/importance-of-flow-engineering-for-oil-and-gas-industry/>. Acesso em: 23 ago. 2021.

ITAIPÚ BINACIONAL. *A maior geradora de energia limpa e renovável do planeta*. 2017.

KIRKLEY, J. CFD Is on a Roll. Disponível em: <www.enterpriseai.news/2011/09/07/cfd_is_on_a_roll>. Acesso em: 15 out. 2019.

KOTZ, J. C. et al. *Química geral e reações químicas*. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

LACERDA, D. P. et al. *Design Science Research : método de pesquisa para a engenharia de produção*. p. 741–761, 2013.

LAUBE, F. P. ROTEIRO DE CÁLCULOS DE UM TROCADOR DE CALOR E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS FLUIDOS EM CFD. n. June, 2016.

METU. Middle East Technical University. Disponível em: <www.metu.edu.tr>. Acesso em: 9 out. 2019.

PEREIRA, G. M. projeto de USINAS HIDRELÉTRICAS: passo a passo. 1. ed. São Paulo:

Oficina de Textos, 2015.

PIMENTEL, M.; FILIPPO, D.; SANTORO, F. M. Design Science Research: fazendo pesquisas científicas rigorosas atreladas ao desenvolvimento de artefatos computacionais projetados para a educação. In: Metodologia de Pesquisa Científica em Informática na Educação: Concepção de Pesquisa. 1. ed. Porto Alegre: SBC, 2019.

RAMIREZ, R. et al. CFD characterization and optimization of the cavitation phenomenon in dredging centrifugal pumps. Alexandria Engineering Journal, v. 59, n. 1, p. 291–309, 1 fev. 2020.

RIBEIRO, R. M.; CÂMARA, M. A. Estudo do comportamento tribológico do par liga Babbitt – aço ABNT 1045 quando variadas a espessura e a rugosidade do revestimento. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 2, 2020.

RODRIGUES, D. D. Design Science Research como caminho metodológico para disciplinas e projetos de Design da Informação. 2018.

SAHU, J.; HEAVEY, K. R. Parallel CFD computations of projectile aerodynamics with a flow control mechanism. Computer Standards & Interfaces, 2013.

SERRANO, J. R. et al. Development and verification of an in-flow water condensation model for 3D-CFD simulations of humid air streams mixing. Computers & Fluids, v. 167, p. 158–165, 2018.

SOUZA, Z.; SANTOS, A. H. M.; BORTONI, E. DA C. Centrais Hidrelétricas: Implantação e Comissionamento. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda., 2009.

TEC. Technology Evaluation Centers. Disponível em: <www.technologyevaluation.com>. Acesso em: 15 nov. 2019.

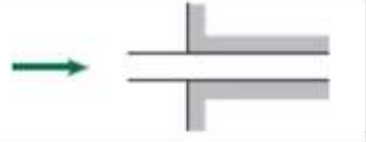

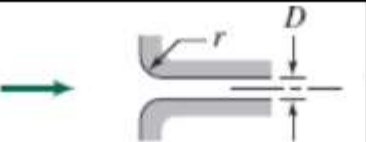
TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. 2. ed. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2013.

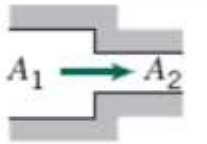
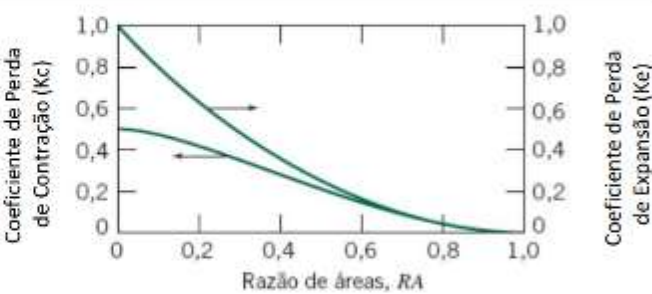
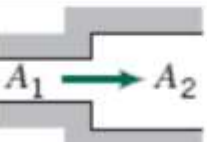
VAISHNAVI, V.; KUECHLER, B.; PETTER, S. Design Science Research In Information Systems. n. 1, p. 1–66, 2012.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2. ed. [s.l.] PEARSON Education, 2007.

WHITE, F. M. Mecânica dos fluidos. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2018.

Anexo A – Coeficientes de perda (K)

1. Entradas e Saídas										
Tipo de Entrada	Representação	Coeficiente de Perda (K)								
Reentrante		0,78								
Borda-viva		0,50								
Arredondado		<table border="1"> <thead> <tr> <th>r/D</th> <th>0,02</th> <th>0,06</th> <th>$\geq 0,15$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>K</td> <td>0,28</td> <td>0,15</td> <td>0,04</td> </tr> </tbody> </table>	r/D	0,02	0,06	$\geq 0,15$	K	0,28	0,15	0,04
r/D	0,02	0,06	$\geq 0,15$							
K	0,28	0,15	0,04							

2. Expansões e Contrações		
Tipo	Representação	Coeficiente de Perda (K)
Contração	 $RA = A_2/A_1$	 $h_{LM} = K_C \frac{V_{méd2}^2}{2}$ $h_{LM} = K_e \frac{V_{méd1}^2}{2}$
Expansão	 $RA = A_1/A_2$	

3. Curvas, válvulas e acessórios		
Tipo	Geometria	Coeficiente de Perda (K)
Cotovelo de 90°	Padrão flangeado	0,30
	Raio longo flangeado	0,20
	Padrão rosqueado	1,50
	Raio longo rosqueado	0,70
	Esquadria	1,30
	Esquadria com paletas	0,20

Cotovelo de 45°	Padrão rosqueado	0,40
	Raio longo flangeado	0,20
Tê, divisório de escoamento	Rosqueado	0,90
	Flangeado	0,20
Tê, ramificação de escoamento	Rosqueado	2,00
	Flangeado	1,00
Válvula globo	Aberto	10,00
Válvula angular	Aberto	5,00
Válvula de gaveta	Aberto	0,20
	75% aberto	1,10
	50% aberto	3,60
	25% aberto	28,80
Válvula de esfera	Aberto	0,50
	1/3 fechado	5,50
	2/3 fechado	200,00
Medidor de água		7,00
Acoplamento		0,08