

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

EDUARDO DE ANDRADE

CARACTERIZAÇÃO DA VELOCIDADE E INTENSIDADE TURBULENTE DO CANAL  
DE ÁGUA CIRCULANTE DA UFSC CAMPUS JOINVILLE

Joinville  
2024

EDUARDO DE ANDRADE

CARACTERIZAÇÃO DA VELOCIDADE E INTENSIDADE TURBULENTA DO CANAL  
DE ÁGUA CIRCULANTE DA UFSC CAMPUS JOINVILLE

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de Bacharel em Curso  
de Engenharia Naval, no Centro Tecnológico  
de Joinville, da Universidade Federal  
de Santa Catarina.

Orientador: Dr. André Luís Condino Fugarra

Joinville  
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

de Andrade, Eduardo

Caracterização da velocidade e intensidade turbulenta do canal de água circulante da UFSC Campus Joinville / Eduardo de Andrade ; orientador, André Luís Condino Fugarra, 2024.

55 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Canal de água circulante. 3. Intensidade turbulenta. I. Luís Condino Fugarra, André. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Naval. III. Título.

EDUARDO DE ANDRADE

CARACTERIZAÇÃO DA VELOCIDADE E INTENSIDADE TURBULENTA DO CANAL  
DE ÁGUA CIRCULANTE DA UFSC CAMPUS JOINVILLE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Curso de Engenharia Naval, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 29 de novembro de 2024.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. André Luís Condino Fugarra/Presidente  
Orientador/Presidente  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Andrea Piga Carboni  
Membro(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng. Aline Leal de Lima Gontarski  
Membro(a)  
Estudante de Doutorado na USP

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, Solange e Aldo, que sempre foram minha maior fonte de inspiração pela dedicação incansável, pelo apoio incondicional e pelos conselhos valiosos que me guiaram ao longo dessa jornada e de toda a minha vida. Vocês se dedicaram profundamente para me ajudar nessa caminhada, e espero poder retribuir um dia, à altura de tudo que fizeram por mim.

À minha avó Marlene e à minha irmã Mayara, que estiveram ao meu lado durante todo esse processo, aconselhando e apoiando em todos os momentos, estendendo o agradecimento a toda minha família.

Ao meu orientador, Dr. André Luís Condino Fugarra, pela amizade, pela inspiração como engenheiro e profissional, pela paciência e por toda a orientação durante esses anos no laboratório. Agradeço também pelo empenho em guiar de forma excepcional o desenvolvimento deste trabalho, sempre com grande profissionalismo e dedicação.

À minha namorada e melhor amiga, Chiara de Souza Benvenuti, que esteve ao meu lado em cada etapa desta caminhada, especialmente nos momentos mais desafiadores. Sou grato por você me apresentar novas perspectivas e visões de mundo, contribuindo para minha evolução pessoal e para uma mudança positiva no meu modo de pensar a vida. Estendo também meu sincero agradecimento à sua família pelo apoio e acolhimento, em especial à Micheline, à Jéssica, ao Jean-Baptiste, à Lyca e ao Pedro.

Aos amigos que a universidade me trouxe, Brian, Caio, Ricardo, Guilherme, Vitor e Maria Clara pela amizade, pelas risadas e pela parceria ao longo desses anos. Vocês tornaram essa jornada mais leve e divertida.

À Petrobras, pelo incentivo ao desenvolvimento das atividades no laboratório e pelo fornecimento da bolsa de pesquisa e extensão, que viabilizaram a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de laboratório, que contribuíram não apenas no trabalho, mas também no caminho da graduação, ajudando a superar desafios e compartilhando conhecimentos. Agradeço especialmente ao Rafael, ao Luiz, ao Gabriel, à Lívia e à Aline.

Ao CALNAV, pela oportunidade de representar o curso durante dois anos, fortalecendo amizades e contribuindo para a comunidade estudantil de forma significativa. Agradeço especialmente às amizades que fiz nessa jornada.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma maneira, fizeram parte desta jornada e que contribuíram para a realização deste trabalho.

*“ Se cheguei até aqui foi porque me apoiei no ombro dos gigantes.”*

Isaac Newton

## RESUMO

Este trabalho apresenta a caracterização do canal de água circulante da UFSC Joinville, com aferição da velocidade e da intensidade turbulenta na seção de teste definida para o estudo. A análise parte da necessidade de medir com precisão essas variáveis, que são fundamentais para a avaliação dos experimentos realizados no canal. A importância dessas medições justifica-se na necessidade de adquirir dados confiáveis para a realização dos experimentos. Os objetivos são desenvolver uma equação que relacione a velocidade do escoamento à rotação do propulsor do canal e determinar a intensidade turbulenta na seção de teste estudada, a partir das aquisições realizadas nos pontos. Para isso, utilizou-se o equipamento Vector da marca Nortek, que emprega o efeito Doppler para medir as velocidades nos eixos x, y e z. O arranjo experimental foi baseado em uma matriz de 5x7 pontos, distribuídos no calado e na boca do canal, respectivamente, permitindo uma caracterização detalhada da seção estudada. Os resultados incluem a formulação de uma equação que relaciona os valores médios da velocidade do escoamento e da intensidade turbulenta à rotação do propulsor do canal para 5, 10, 15 e 20 rotações por minuto, proporcionando uma base sólida para futuras pesquisas.

**Palavra-chave:** canal de água circulante; intensidade turbulenta.

## ABSTRACT

This study presents the characterization of the circulating water channel at UFSC Joinville, with measurements of velocity and turbulence intensity at the defined test section for the study. The analysis stems from the need for precise measurement of these variables, which are essential for evaluating the experiments conducted in the channel. The importance of these measurements lies in the need to acquire reliable data for performing the experiments. The objectives are to develop an equation that relates the flow velocity to the propeller rotation of the channel and to determine the turbulence intensity in the test section studied, based on data acquired at specific points. For this purpose, the Vector equipment from Nortek was used, which employs the Doppler effect to measure velocities along the x, y, and z axes. The experimental setup was based on a 5x7 point matrix, distributed across the draft and the width of the channel, respectively, allowing a detailed characterization of the section studied. The results include the formulation of an equation that relates the average flow velocity and turbulence intensity values to the channel's propeller rotation at 5, 10, 15, and 20 revolutions per minute, providing a solid foundation for future research.

**Keywords:** Circulating water channel; Turbulent intensity.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Canal de água circulante da USP. . . . .	10
Figura 2 – Canal de água circulante da empresa Coanda. . . . .	10
Figura 3 – Medidor doppler de velocidade. . . . .	12
Figura 4 – Esquema de um canal de água circulante com uma bomba centrífuga	13
Figura 5 – Esquema do CWC da universidade de Shanghai. . . . .	14
Figura 6 – Esquema do CWC utilizado para estudos aerodinâmicos. . . . .	15
Figura 7 – Seção de teste do CWC utilizado para estudos aerodinâmicos. . . .	15
Figura 8 – Vector com representação dos componentes. . . . .	16
Figura 9 – Esquema simplificado do funcionamento do medidor doppler de ve- locidade. . . . .	17
Figura 10 – Representação do volume de amostragem e sua localização. . . . .	17
Figura 11 – Sistema de Coordenadas possíveis para o medidor doppler de velo- cidade. . . . .	18
Figura 12 – Canal de água circulante da UFSC Joinville . . . . .	21
Figura 13 – Projeto do canal de água circulante da UFSC Joinville. . . . .	21
Figura 14 – Área de testes do canal de água circulante da UFSC Joinville. . . .	22
Figura 15 – Sistema de propulsão - Vista em corte . . . . .	23
Figura 16 – Sistema de propulsão - Vista explodida . . . . .	23
Figura 17 – Dimensões da área de teste do canal. . . . .	24
Figura 18 – Configuração do medidor doppler de velocidade. . . . .	25
Figura 19 – Configuração avançada do medidor doppler de velocidade. . . . .	25
Figura 20 – Linha do tempo do estudo. . . . .	26
Figura 21 – Seção estudada no canal. . . . .	27
Figura 22 – Sistema de fixação do medidor doppler de velocidade. . . . .	28
Figura 23 – Estrutura em formato U para fixação do medidor doppler de veloci- dade. . . . .	29
Figura 24 – Arranjo de pontos para estudo. . . . .	29
Figura 25 – Testes realizados para definição do tempo de espera. . . . .	31
Figura 26 – Aba de conversão de arquivos e opções selecionadas. . . . .	33
Figura 27 – Gráfico representando o tempo de espera para 5 RPM com 30s . . .	35
Figura 28 – Gráfico representando o tempo de espera para 5 RPM com 60s . . .	36
Figura 29 – Gráfico representando o tempo de espera para 5 RPM com 90s . . .	37
Figura 30 – Gráfico representando o tempo de espera para 20 RPM com 30s . . .	38
Figura 31 – Gráfico representando o tempo de espera para 20 RPM com 60s . . .	38
Figura 32 – Gráfico representando o tempo de espera para 20 RPM com 90s . . .	39

Figura 33 – Gráfico representando o ensaio do tempo de espera para 5RPM com 90s . . . . .	40
Figura 34 – Gráfico representando o ensaio do tempo de espera para 10RPM com 90s . . . . .	41
Figura 35 – Velocidade do escoamento para 5RPM. . . . .	42
Figura 36 – Intensidade turbulenta para 5RPM. . . . .	43
Figura 37 – Intensidade turbulenta para 5RPM. . . . .	43
Figura 38 – Velocidade do escoamento para 10RPM. . . . .	44
Figura 39 – Intensidade turbulenta para 10RPM. . . . .	44
Figura 40 – Intensidade turbulenta para 10RPM. . . . .	45
Figura 41 – Velocidade do escoamento para 15RPM. . . . .	45
Figura 42 – Intensidade turbulenta para 15RPM. . . . .	46
Figura 43 – Intensidade turbulenta para 15RPM. . . . .	46
Figura 44 – Velocidade do escoamento para 20RPM. . . . .	47
Figura 45 – Intensidade turbulenta para 20RPM. . . . .	47
Figura 46 – Intensidade turbulenta para 20RPM. . . . .	48
Figura 47 – Intensidade turbulenta média para cada rotação estudada. . . . .	49
Figura 48 – Velocidade média do escoamento para cada rotação estudada. . . . .	50

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	<b>Objetivo geral</b>	<b>12</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>13</b>
2.1	CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE	13
2.2	MEDIDOR DOPPLER DE VELOCIDADE	16
2.3	INTENSIDADE TURBULENTA	18
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>20</b>
3.1	CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE DO LABORATÓRIO DE INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA DA UFSC JOINVILLE	20
3.2	INSTRUMENTAÇÃO	24
3.3	PROCEDIMENTOS ADOTADOS NA COLETA E ANÁLISE DOS DADOS	26
3.3.1	<b>Definição da seção de estudo e criação da estrutura para o equipamento</b>	<b>27</b>
3.3.2	<b>Primeiro ensaio para a definição de tempo de espera e tempo de aquisição</b>	<b>30</b>
3.3.3	<b>Segundo ensaio para definição do tempo de espera</b>	<b>31</b>
3.3.4	<b>Ensaio principal</b>	<b>32</b>
3.3.5	<b>Tratamento dos dados</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>34</b>
4.1	PRIMEIRO ENSAIO	34
4.2	SEGUNDO ENSAIO	40
4.3	ENSAIO PRINCIPAL	41
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>51</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

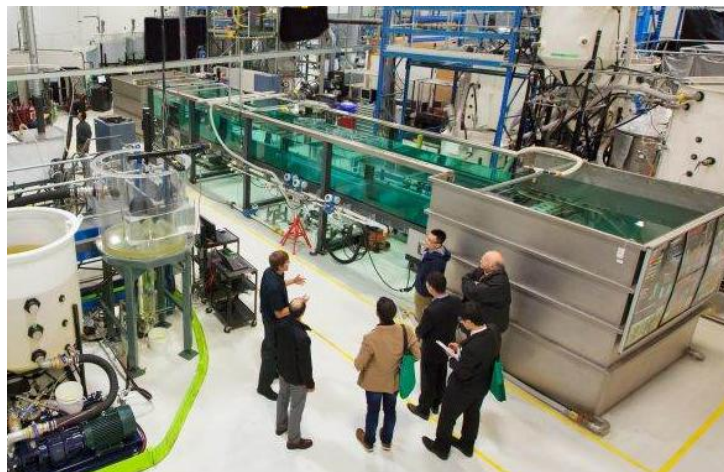
O canal de água circulante, do inglês *Circulating Water Channel (CWC)*, é uma infraestrutura utilizada para simular e estudar o comportamento de estruturas em contato com fluidos em movimento. Através desse sistema, é permitida a circulação contínua de água, criando um ambiente controlado para a realização de experimentos hidrodinâmicos (ASSI et al., 2005). O CWC é utilizado por diversas instituições para pesquisa e desenvolvimento de estudos acadêmicos na área da Engenharia Naval e Oceânica como, por exemplo, a Universidade de São Paulo (USP) e a empresa canadense Coanda Tech Company, de acordo com as Figuras 1 e 2.

Figura 1 – Canal de água circulante da USP.



Fonte: Assi et al. (2005), p. 06.

Figura 2 – Canal de água circulante da empresa Coanda.



Fonte: Coanda (2024).

A caracterização da velocidade e intensidade turbulenta em um canal de água circulante é indispensável para o desenvolvimento de estudos experimentais na estrutura, pois, sem a definição dessas variáveis, faltariam dados determinantes para análises de interação fluido-estrutura. Um dos principais desafios dessa investigação é a exatidão na medida da velocidade e da intensidade turbulenta, pois a precisão desses valores é um fator crítico na análise de vibrações induzidas por vórtices (VIV) em sistemas marítimos, em estudos de propulsão e resistência ao avanço em modelos reduzidos, bem como no desenvolvimento de tecnologias para a produção de energia renovável em correntes marítimas (BUSNARDO, 2015).

A importância de realizar tais medições com precisão justifica-se através da necessidade de obter dados confiáveis que permitam o avanço das pesquisas na área de interação fluido-estrutura. Além disso, a utilização de um canal de água circulante apresenta vantagens em relação aos tanques de reboque, como um menor custo e a possibilidade de realização de testes com precisão por um período de tempo indefinido, o que potencializa a capacidade de realização de estudos prolongados e detalhados, assegurando a qualidade dos dados adquiridos (ASSI et al., 2005).

Visando essa necessidade, neste trabalho será apresentada uma investigação característica do comportamento hidrodinâmico do canal de água circulante do Laboratório de Interação Fluido-Estrutura (LIFE), do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus de Joinville. Pretende-se, dessa forma, equacionar e definir a velocidade média e a intensidade turbulenta média na seção de teste do canal de água circulante, exibindo a distribuição das velocidades nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , além do cálculo da intensidade turbulenta a partir desses dados. As bases teóricas serão fundamentadas em Fox et al. (2006), Assi et al. (2005), Fugarra (2002) e Basse (2017).

A análise envolverá o uso de um medidor doppler de velocidade (Figura 3), que apresenta as velocidades nas três direções do espaço através do efeito Doppler e as medições serão realizadas em diferentes pontos da seção de teste. Os dados obtidos, por sua vez, serão analisados via código de Octave e planilha em formato Excel para calcular a intensidade turbulenta.

Figura 3 – Medidor doppler de velocidade.



Fonte: Nortek (2024).

Os resultados esperados incluem a obtenção de um perfil detalhado da velocidade e intensidade turbulenta no canal, proporcionando uma base sólida para futuras pesquisas e experimentos no LIFE, bem como, caso necessário, a realização de melhorias no canal para aperfeiçoar o escoamento. Além disso, os dados poderão ser utilizados para validar modelos numéricos e otimizar o design de experimentos subsequentes.

## 1.1 OBJETIVOS

Para resolver a problemática da caracterização do canal de água circulante do LIFE da UFSC Joinville, propõem-se os seguintes objetivos.

### 1.1.1 Objetivo geral

Caracterizar a velocidade e intensidade turbulenta do canal de água circulante do LIFE da UFSC Joinville.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir a seção de teste e a matriz de pontos a ser analisado;
- Definir o tempo de espera para estabilização do escoamento e o tempo de aquisição dos dados;
- Analisar os dados obtidos pelo equipamento durante as aquisições;
- Apresentar a equação da velocidade da água em relação ao RPM da propulsão do canal;
- Avaliar os resultados.

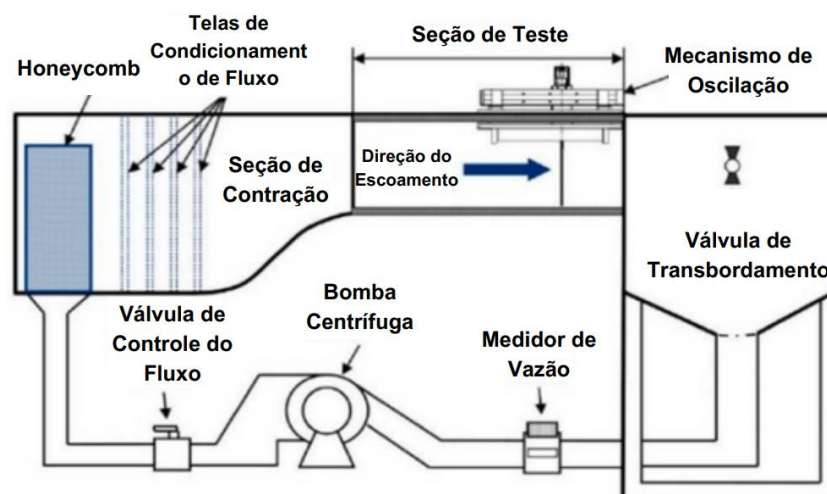
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considerando a necessidade de compreender o comportamento do canal para realização de experimentos, serão abordadas definições relevantes para o entendimento das aplicações e das funcionalidades do equipamento. Primeiramente, será abordada a definição de um canal de água circulante, explorando suas características e aplicações. Em seguida, serão discutidas as características de funcionamento do medidor doppler de velocidade utilizado neste trabalho. Por fim, será definido o conceito de intensidade turbulenta e será descrito o método de cálculo, utilizando as velocidades obtidas através do equipamento.

### 2.1 CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE

O canal de água circulante é uma infraestrutura utilizada em experimentos hidrodinâmicos para simular e analisar o comportamento de estruturas em contato com fluidos em movimento, especialmente em condições controladas. Diferentemente dos túneis de água, porém com o mesmo princípio de funcionamento, o canal de água circulante possui uma superfície livre, conforme ilustrado na Figura 4, permitindo a realização de testes que envolvem a interação de uma estrutura com dois fluidos diferentes, como água e ar (BUSNARDO, 2015).

Figura 4 – Esquema de um canal de água circulante com uma bomba centrífuga



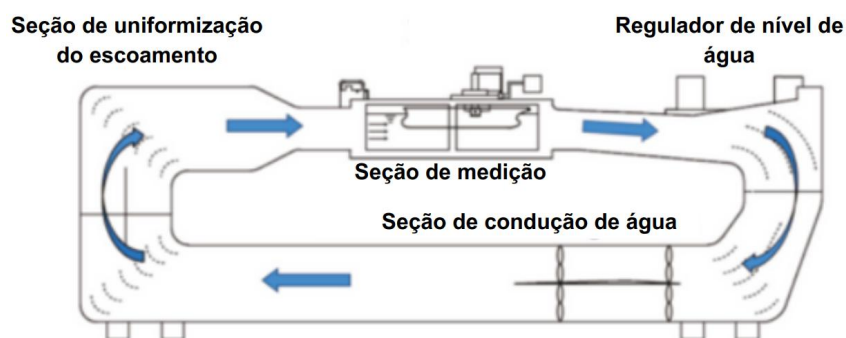
Fonte: Adaptado de Wu et al. (2019), p. 07.

O funcionamento de um canal de água circulante envolve a movimentação controlada da água, geralmente realizada por um sistema motriz composto de hélices ou bombas. Esse sistema gera um escoamento constante e controlado dentro da

seção de testes do canal. A rotação do sistema de propulsão é ajustável, permitindo a simulação de diferentes velocidades de correnteza, fundamentais para a análise de objetos submersos ou semissubmersos, como cascos de embarcações ou estruturas subaquáticas (ZHU et al., 2022).

Essa flexibilidade torna o canal de água circulante uma ferramenta essencial em estudos que visam a otimização do desempenho hidrodinâmico, como a análise do desempenho de propulsores, a investigação de fenômenos como a vibração induzida por vórtices (VIV) e a resistência ao avanço de navios (HAN et al., 2020) de acordo com a representação do CWC da universidade Shanghai Jiao Tong (Figura 5).

Figura 5 – Esquema do CWC da universidade de Shanghai.

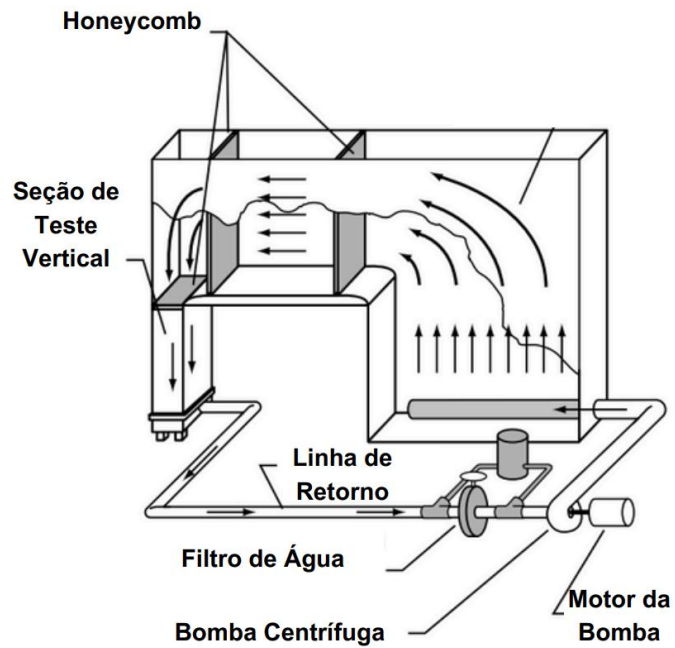


Fonte: Adaptado de Han et al. (2020), p. 355.

Além disso, canais baseados nesse princípio, embora com variações, também são aplicados em estudos aerodinâmicos, como os realizados pela NASA, que adaptam o design para o estudo do escoamento ao redor de aeronaves, como apresentado nas Figuras 6 e 7. Esses canais possuem uma seção de teste vertical, permitindo a análise detalhada de fluxos aerodinâmicos em ambientes controlados (NASA, 1995). Esse tipo de adaptação demonstra a versatilidade do canal de água circulante, ampliando seu uso tanto para experimentos hidrodinâmicos quanto aerodinâmicos, o que proporciona uma plataforma ampla de pesquisa em diferentes campos.

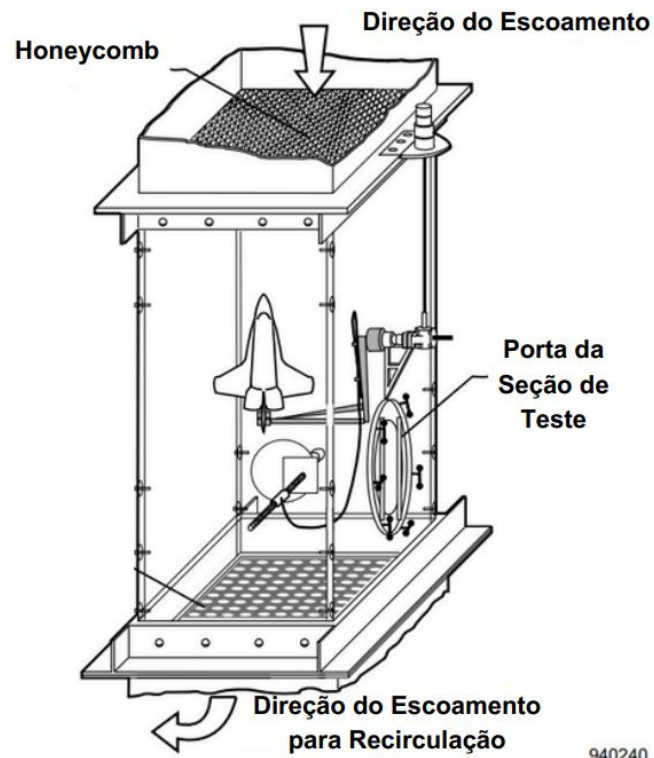


Figura 6 – Esquema do CWC utilizado para estudos aerodinâmicos.



Fonte: Adaptado de NASA (1995), p. 03.

Figura 7 – Seção de teste do CWC utilizado para estudos aerodinâmicos.

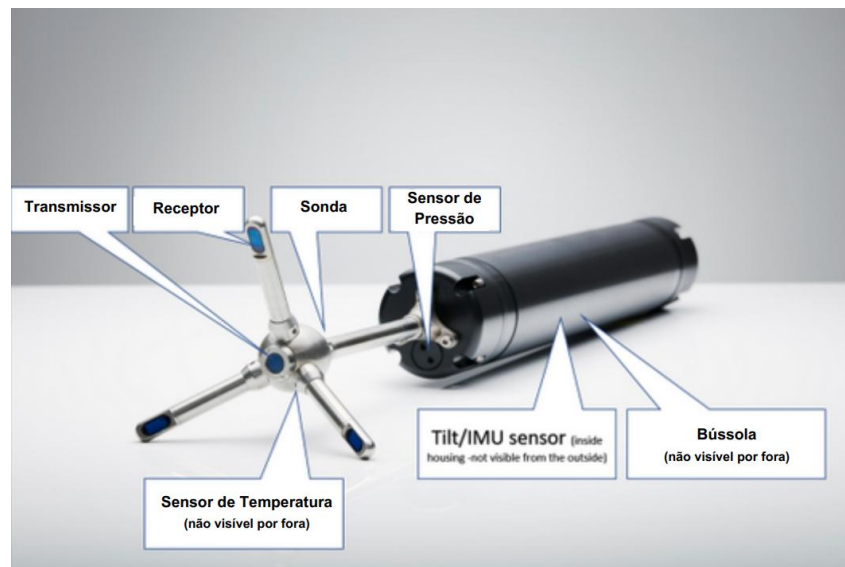


Fonte: Adaptado de NASA (1995), p. 03.

## 2.2 MEDIDOR DOPPLER DE VELOCIDADE

O equipamento Vector, da empresa Nortek, é um instrumento de campo projetado especificamente para medições de alta resolução em mudanças rápidas e em pequena escala da velocidade tridimensional (3D), e é composto por um transdutor, dois receptores, sensor de pressão e sensor de temperatura, como representado na Figura 8. O equipamento contém duas configurações de funcionamento para aquisição dos dados, uma por memória interna e bateria, e outra por conexão via cabo com um computador e fonte de energia. Ele é amplamente utilizado em estudos de turbulência, medições em camadas limites, zonas de surfe (água e ar misturados), em áreas com fluxos muito baixos e fluxos de variação rápida no laboratório ou no oceano (NORTEK, 2022).

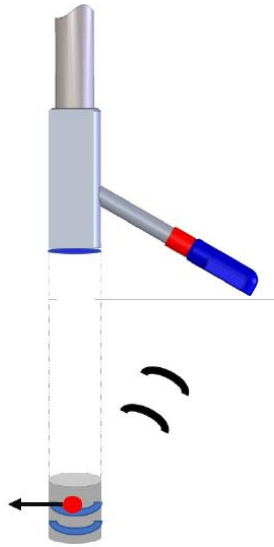
Figura 8 – Vector com representação dos componentes.



Fonte: Adaptado de Nortek (2022), p. 03.

O princípio de funcionamento do equipamento é baseado no efeito Doppler, através do qual o instrumento emite pulsos acústicos na água e detecta o retorno desses sinais, que são refletidos por partículas em suspensão no fluido, como plâncton ou sedimentos. A Figura 9 apresenta um esquema simplificado do funcionamento do sistema. No diagrama, o pulso sonoro emitido pelo transdutor central é representado em azul, a partícula suspensa na água, que reflete o som, é mostrada em vermelho, e o sinal refletido com o deslocamento Doppler é indicado em preto. Esse retorno é detectado pelos braços receptores inclinados, que processam a variação de frequência entre o pulso emitido e o pulso refletido (Doppler shift), para calcular a velocidade do escoamento de água (NORTEK, 2022).

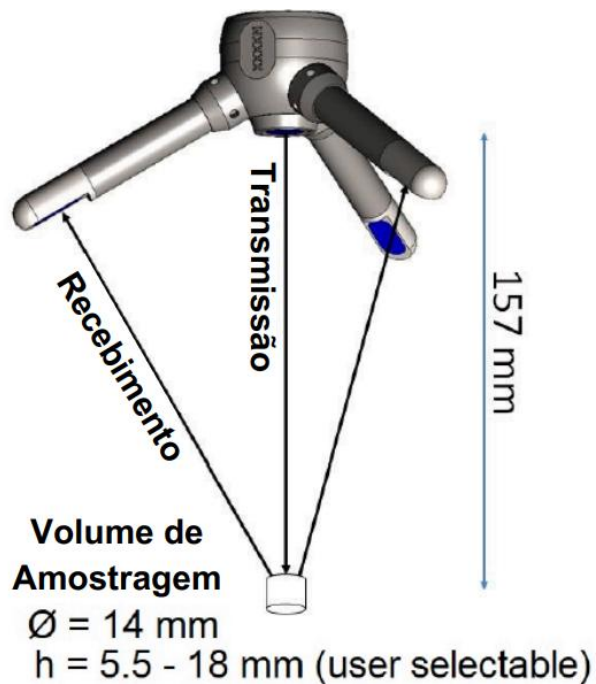
Figura 9 – Esquema simplificado do funcionamento do medidor doppler de velocidade.



Fonte: Nortek (2022), p. 13.

O equipamento utilizado opera com feixes separados para transmissão e recepção, sendo classificado como um sensor bistático. O volume de medição é definido pela interseção dos três receptores inclinados com o transmissor central, localizada a 157 mm do transmissor. O pulso emitido pelo transdutor tem um comprimento ajustável entre 2 e 8 mm, e o tamanho do volume de amostragem pode ser configurado entre 5,5 e 18 mm (NORTEK, 2022). A Figura 10 ilustra esse arranjo.

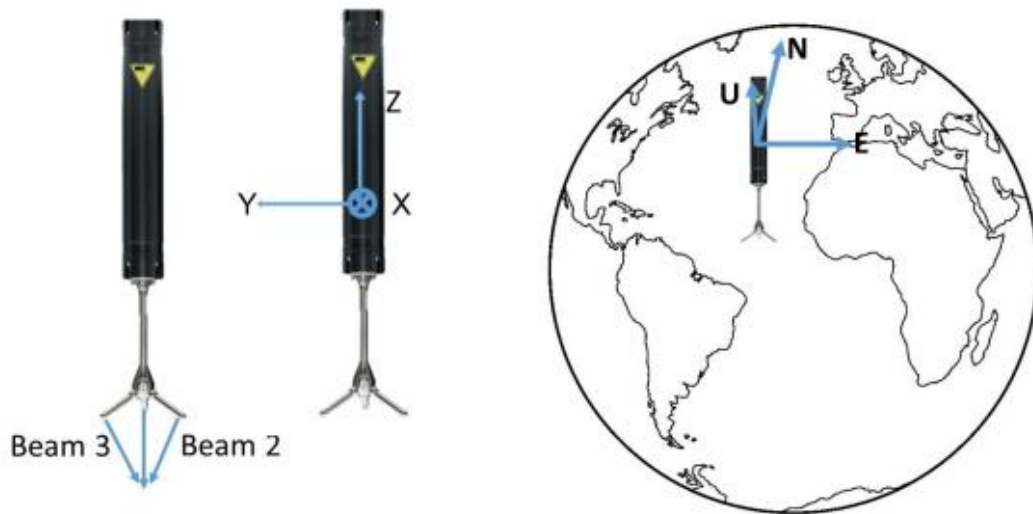
Figura 10 – Representação do volume de amostragem e sua localização.



Fonte: Adaptado de Nortek (2022), p. 19.

Com a utilização do equipamento, percebe-se uma diversa flexibilidade na configuração, permitindo ajustes no tamanho do volume de amostragem. Além disso, o medidor doppler de velocidade pode ser configurado para apresentar os dados em coordenadas XYZ ou ENU (East, North, Up), como representado na Figura 11, com a ajuda de sensores auxiliares como magnetômetros e inclinômetros, que garantem a correção da orientação do instrumento durante as medições (NORTEK, 2022).

Figura 11 – Sistema de Coordenadas possíveis para o medidor doppler de velocidade.



Fonte: Nortek (2022), p. 21.

### 2.3 INTENSIDADE TURBULENTA

A intensidade turbulenta é uma medida essencial para caracterizar o escoamento turbulento, que é marcado por uma distribuição irregular e periodicamente variável das componentes de velocidade e vorticidade ao longo do tempo e do espaço. Esse tipo de escoamento apresenta alta irregularidade espacial e temporal, tridimensionalidade intrínseca, elevada vorticidade, forte difusividade e dissipação, além de comportamento não linear (BAUM, 2004).

Dessa forma, a intensidade turbulenta, representada na Equação 1, reflete o nível de variação das velocidades instantâneas em relação à velocidade média do escoamento, sendo expressa como a razão entre o desvio padrão das flutuações de velocidade e a velocidade média do escoamento, dada normalmente em termos percentuais (CFD ONLINE, 2022).

$$I \equiv \frac{u'}{\bar{U}} \quad (1)$$

De acordo com as Equações 2 e 3,  $u'$  representa a raiz quadrada média das flutuações de velocidade, e  $U$  é a velocidade média do escoamento.

$$u' \equiv \sqrt{\frac{1}{3} (u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)} \quad (2)$$

$$U \equiv \sqrt{(U_x^2 + U_y^2 + U_z^2)} \quad (3)$$

### 3 METODOLOGIA

Com o objetivo de caracterizar o canal de água circulante do LIFE da UFSC Joinville, será apresentada a metodologia para a caracterização da velocidade em relação ao RPM do propulsor e da intensidade turbulenta. Dessa forma, serão detalhadas as etapas e os procedimentos adotados para a formulação da equação que descreve o comportamento da velocidade em relação à rotação do propulsor, além da quantificação da intensidade turbulenta na seção estudada.

#### 3.1 CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE DO LABORATÓRIO DE INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA DA UFSC JOINVILLE

O canal de água circulante utilizado nos ensaios faz parte do Laboratório de Interação Fluido-Estrutura da UFSC Joinville e está representado nas Figura 12 e 13. Essa estrutura é composta por uma área de teste, retratada na Figura 14, que permite a circulação contínua de água, apresentando uma área de contato entre a água e o ar e garantindo condições controladas e representativas para a realização dos experimentos de interação fluido-estrutura.

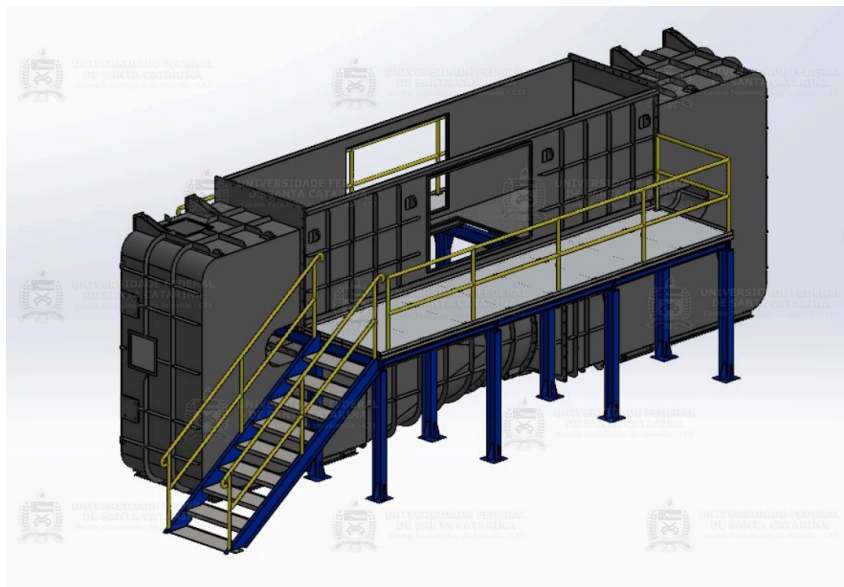
Na Figura 14 é apresentado o sentido do escoamento utilizado nos ensaios; embora o canal permita a circulação nos dois sentidos, optou-se por esse sentido específico, pois no início da seção de teste há uma tela que contribui para a melhoria do escoamento, tornando-o mais uniforme.

Figura 12 – Canal de água circulante da UFSC Joinville



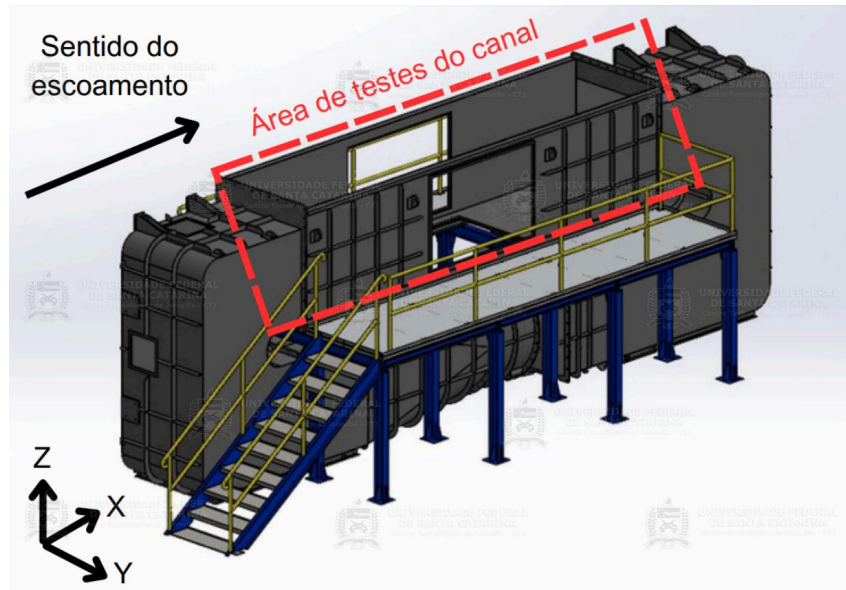
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 13 – Projeto do canal de água circulante da UFSC Joinville.



Fonte: LIFE (2024).

Figura 14 – Área de testes do canal de água circulante da UFSC Joinville.

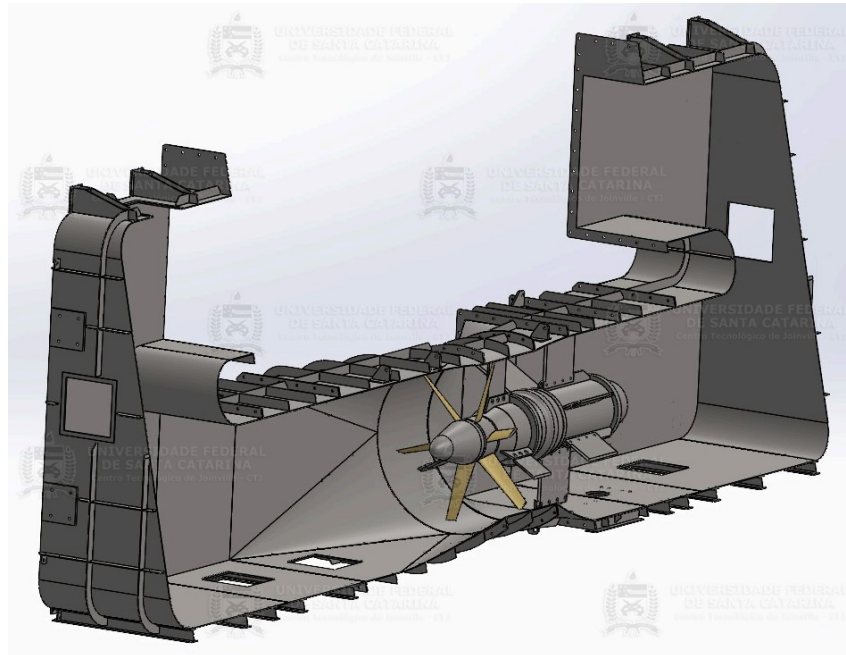


Fonte: Adaptado de LIFE (2024).

A propulsão do canal é gerada por um sistema com um hélice de seis pás, que opera em diferentes rotações por minuto (RPM), permitindo o ajuste preciso da velocidade do escoamento de água. A Figura 15 apresenta a vista de recorte do projeto desse propulsor. Já o controle dessas rotações é realizado por um painel de controle integrado, que oferece a possibilidade de selecionar valores de RPM adequados para diferentes cenários de testes. Além disso, a Figura 16 exhibe a vista explodida do propulsor e da seção de circuito fechado, detalhando seus principais componentes e a estrutura interna que permite a ocorrência do escoamento de água.

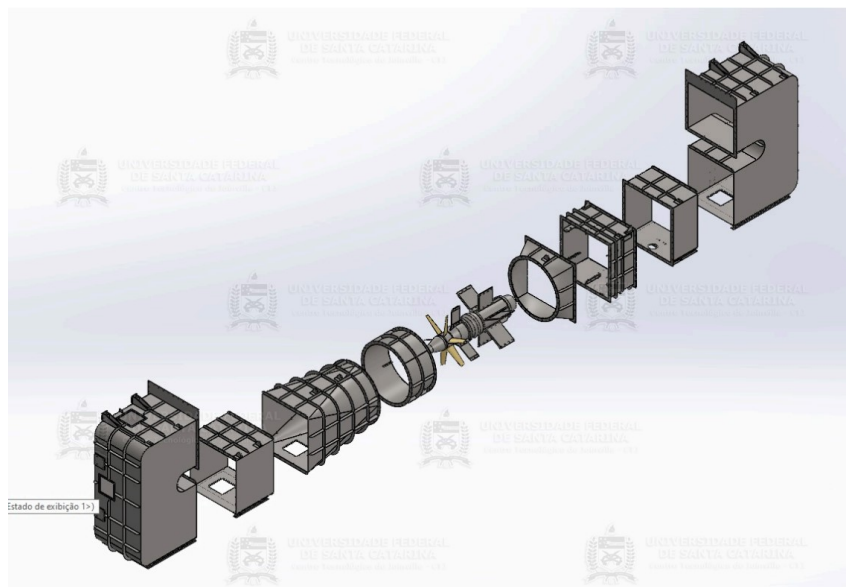


Figura 15 – Sistema de propulsão - Vista em corte



Fonte: LIFE (2024).

Figura 16 – Sistema de propulsão - Vista explodida

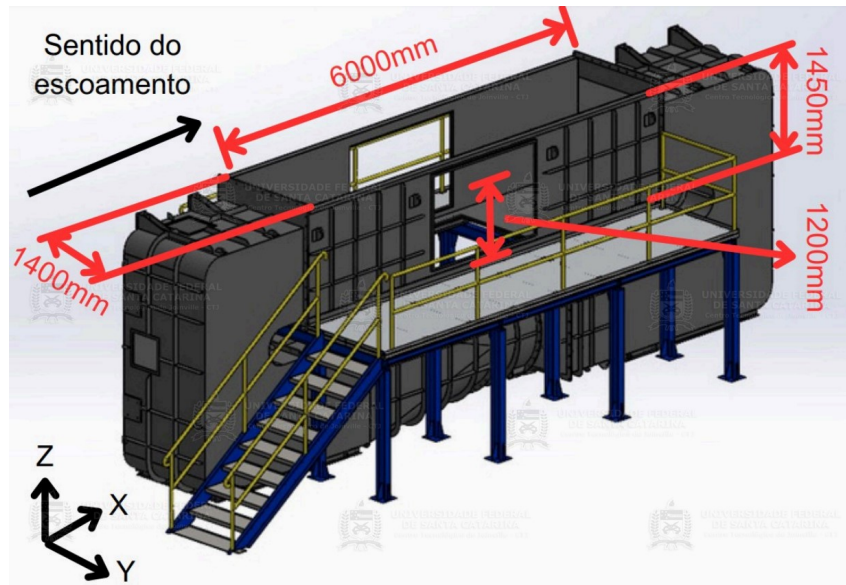


Fonte: LIFE (2024).

A área de testes do canal, ou seja, a parte apresenta a interação ar-água, possui comprimento de 6 metros, boca de 1,4 metros, pontal de 1,45 metros e calado de 1,2 metros, e é representada na Figura 17. Essa estrutura foi projetada para garantir um escoamento uniforme e controlado, o que é crucial para experimentos que exigem alta precisão, como os estudos de interação fluido-estrutura em diversas condições

operacionais. Essas dimensões permitem realizar testes em escalas controladas, assegurando que os resultados sejam aplicáveis a diferentes cenários e tipos de ensaio.

Figura 17 – Dimensões da área de teste do canal.

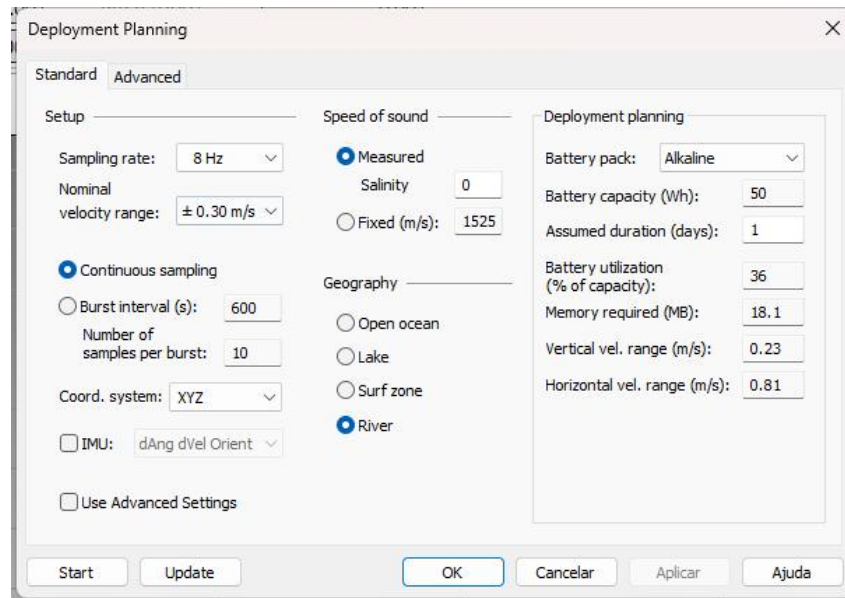


Fonte: Adaptado de LIFE (2024).

### 3.2 INSTRUMENTAÇÃO

Para a caracterização do canal, foi utilizado o equipamento Vector, da empresa Nortek. O dispositivo foi mantido com as configurações padrão de fábrica, com uma taxa de amostragem de 8 Hz e uma faixa de velocidade nominal de 0,30 m/s. Além disso, não foi necessário realizar ajuste para salinidade, pois o canal opera com água doce, e o sistema de coordenadas foi referenciado em XYZ, conforme representado na Figura 18.

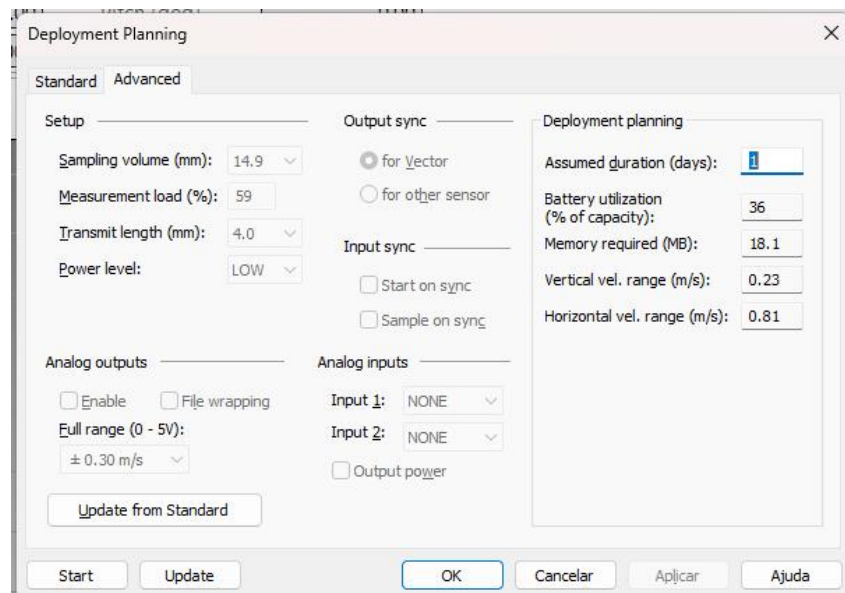
Figura 18 – Configuração do medidor doppler de velocidade.



Fonte: Aatoria própria (2024).

Nas configurações avançadas, não houve alterações nas opções de faixa de volume da amostra, carga de medição ou comprimento de transmissão, mantendo-se todas as definições originais do equipamento. Conforme demonstrado na Figura 19.

Figura 19 – Configuração avançada do medidor doppler de velocidade.

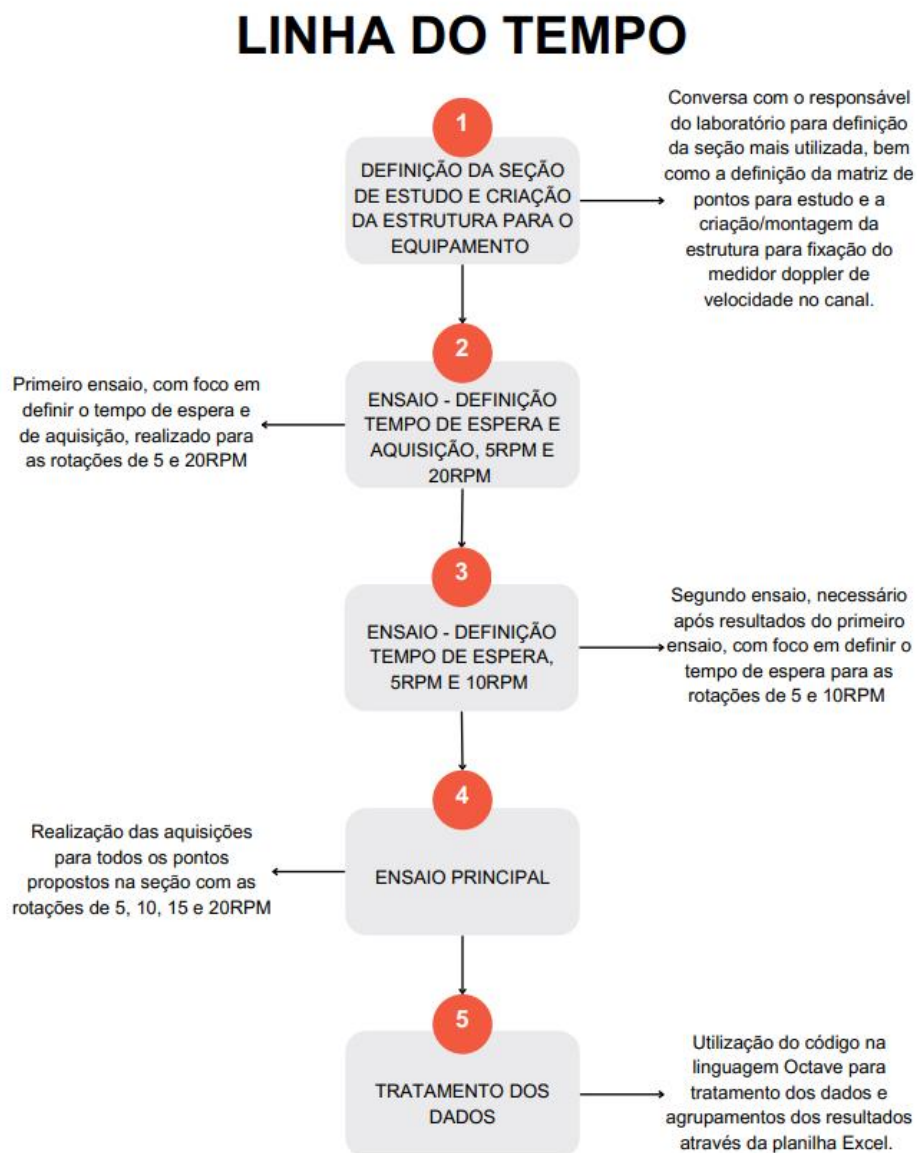


Fonte: Aatoria própria (2024).

### 3.3 PROCEDIMENTOS ADOTADOS NA COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

Os procedimentos adotados na coleta e análise dos dados foram organizados em seis grandes grupos principais. Primeiramente, a definição da seção de estudo e a criação da estrutura para o equipamento, em seguida, o primeiro ensaio para a definição de tempo de espera e tempo de aquisição, após, o segundo ensaio para definição do tempo de espera, o ensaio principal e, por último, o tratamento dos dados. Esses grupos orientaram o desenvolvimento do estudo voltado para a caracterização do canal de água circulante e estão representados na Figura 20.

Figura 20 – Linha do tempo do estudo.

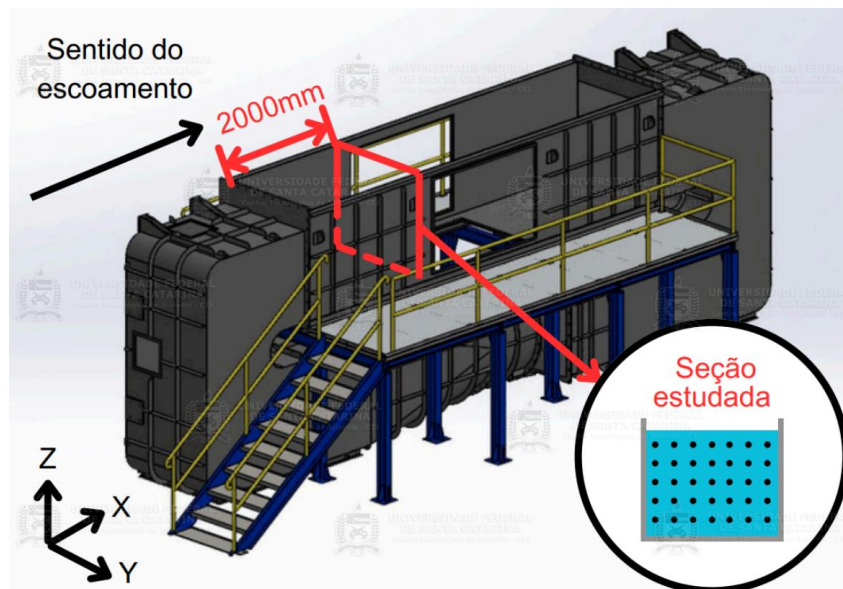


Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.3.1 Definição da seção de estudo e criação da estrutura para o equipamento

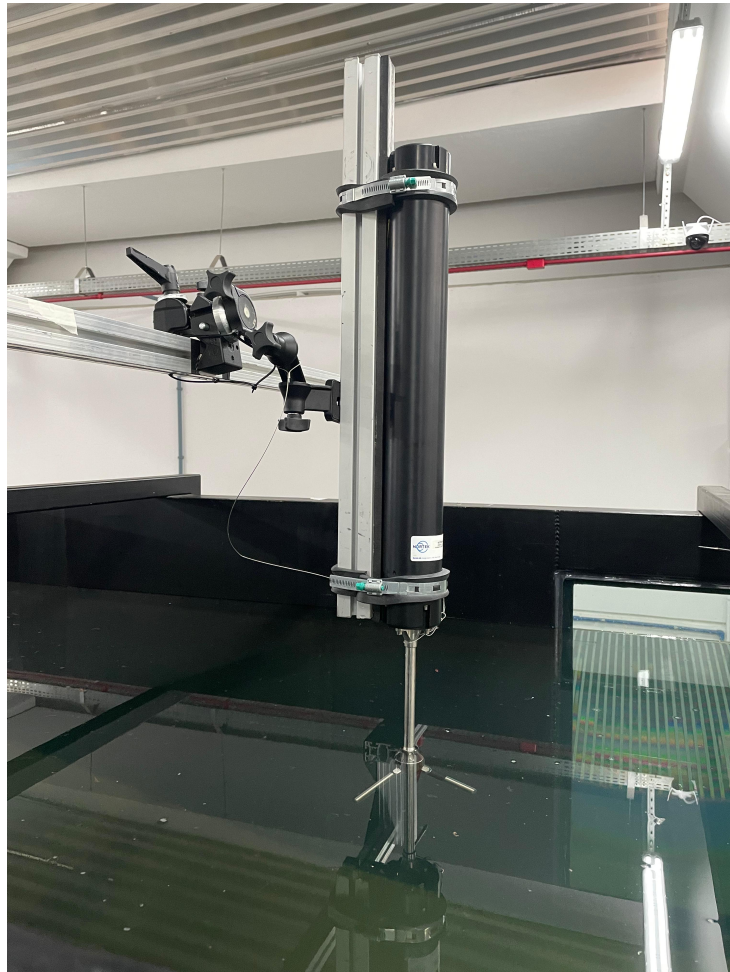
A seção de estudo foi definida em diálogo com o professor responsável pelo laboratório, visando a seção mais frequentemente utilizada nos experimentos do canal. Essa região foi definida a 2 metros a jusante do início da área de teste, conforme retratado na Figura 21. Com base nessa análise, definiu-se o sistema de fixação do medidor doppler de velocidade. A partir disso, o equipamento foi montado em uma barra vertical, equipada com um mecanismo que permite ajuste de rotação nos três eixos: roll (em torno do eixo X), pitch (em torno do eixo y) e yaw (em torno do eixo Z), conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 21 – Seção estudada no canal.



Fonte: Adaptado de LIFE (2024).

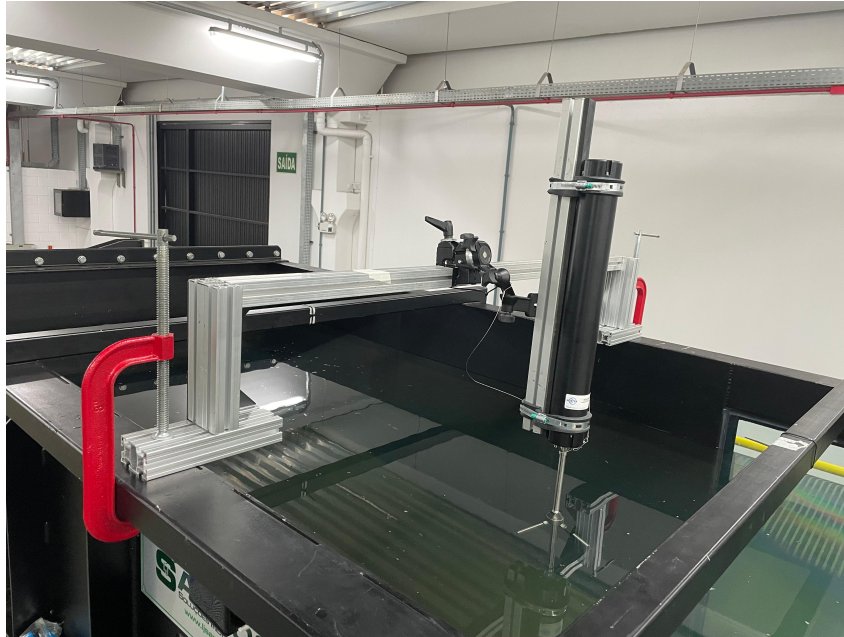
Figura 22 – Sistema de fixação do medidor doppler de velocidade.



Fonte: Autoria própria (2024).

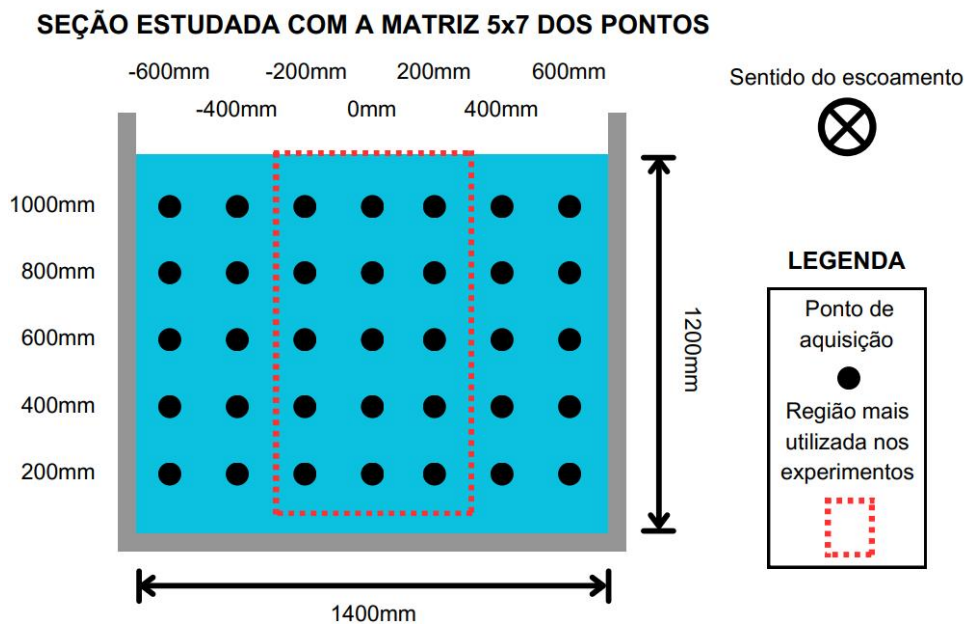
O sistema, da forma que está apresentado, favoreceu os ajustes necessários para manter o equipamento sem ocorrência de trim (inclinação no plano XZ) e banda (inclinação no plano YZ). Além disso, foi acoplado a uma estrutura em formato de U, retratada na Figura 23, possibilitando o deslocamento no eixo y (deslocamento na boca do canal). Este arranjo permitiu a criação de uma matriz de 5x7 pontos, distribuídos ao longo do calado e da boca do canal, conforme Figura 24.

Figura 23 – Estrutura em formato U para fixação do medidor doppler de velocidade.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 24 – Arranjo de pontos para estudo.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 24 detalha os pontos de aquisição e as distâncias propostas para a matriz 5x7, destacando a região mais utilizada nos experimentos do laboratório, que representa a posição em que os experimentos são tradicionalmente realizados, proporcionando dados mais representativos sobre a velocidade e a intensidade turbulenta em que o modelo se encontra.

Após a construção do sistema de fixação, foram definidas as rotações do propulsor a serem estudadas para obtenção das velocidades médias e da intensidade turbulenta em cada ponto proposto. As rotações estudadas são 05, 10, 15 e 20 RPM, visto que esse trabalho é uma primeira análise. Cada valor de RPM foi analisado para determinar a velocidade correspondente e, posteriormente, para definir a equação da relação entre velocidade média do escoamento na direção X em m/s e a rotação do propulsor do motor em RPM, e a intensidade turbulenta média encontrada na seção para cada rotação.

### **3.3.2 Primeiro ensaio para a definição de tempo de espera e tempo de aquisição**

O objetivo do primeiro ensaio foi a realização de testes para determinar o tempo de espera necessário para estabilização da velocidade da água no canal, bem como o tempo de aquisição dos dados. Para isso, o procedimento foi dividido em dois grandes momentos.

Inicialmente, foram realizadas aquisições, no ponto 1x4 da matriz proposta, com o sistema operando a 5 RPM e com um tempo de espera estabelecido de 30 segundos. Em seguida, foram determinados quatro tempos de espera para realização das aquisições, sendo 2min30s, 5min00s, 7min30s e 10min00s a partir do início do movimento da água. O mesmo procedimento foi repetido com tempos de aquisição de 60 e 90 segundos, mantendo a rotação de 5 RPM. Após a conclusão dessas aquisições, a metodologia foi replicada para a rotação de 20 RPM, conforme ilustrado na Figura 25. Esses ensaios possibilitaram a definição do tempo de aquisição em 90 segundos e uma visualização inicial do comportamento do fluido em relação ao tempo de espera.



Figura 25 – Testes realizados para definição do tempo de espera.

5RPM - 30s de Aquisição	20RPM - 30s de Aquisição
Caso 1 - Espera de 2min30s	Caso 13 - Espera de 2min30s
Caso 2 - Espera de 5min00s	Caso 14 - Espera de 5min00s
Caso 3 - Espera de 7min30s	Caso 15 - Espera de 7min30s
Caso 4 - Espera de 10min00s	Caso 16 - Espera de 10min00s

5RPM - 60s de Aquisição	20RPM - 60s de Aquisição
Caso 5 - Espera de 2min30s	Caso 17 - Espera de 2min30s
Caso 6 - Espera de 5min00s	Caso 18 - Espera de 5min00s
Caso 7 - Espera de 7min30s	Caso 19 - Espera de 7min30s
Caso 8 - Espera de 10min00s	Caso 20 - Espera de 10min00s

5RPM - 90s de Aquisição	20RPM - 90s de Aquisição
Caso 9 - Espera de 2min30s	Caso 21 - Espera de 2min30s
Caso 10 - Espera de 5min00s	Caso 22 - Espera de 5min00s
Caso 11 - Espera de 7min30s	Caso 23 - Espera de 7min30s
Caso 12 - Espera de 10min00s	Caso 24 - Espera de 10min00s

Fonte: Autoria própria (2024).

Os resultados obtidos nesse primeiro ensaio não foram suficientes para determinar com precisão o tempo de estabilização do escoamento para a rotação de 5 RPM, já que a velocidade média do escoamento ainda não parecia estabilizada aos 10 minutos de espera.

### 3.3.3 Segundo ensaio para definição do tempo de espera

Em um segundo momento, após a definição do tempo de espera para a rotação de 20 RPM e do tempo de aquisição para todos os ensaios, observou-se a necessidade de realizar um novo ensaio focado na definição do tempo de espera para 5 RPM, já que esse não pode ser definido no primeiro ensaio.

Dessa forma, novas aquisições foram realizadas para 5 RPM, com um tempo de aquisição de 90 segundos, e tempos de espera de 2min30s, 5min00s, 7min30s, 10min00s, 12min30s, 15min00s, 17min30s e 20min00s. O objetivo foi verificar o comportamento da velocidade média do escoamento e identificar o momento de estabilização. Simultaneamente, foram conduzidos testes para 10 RPM, também com tempo de aquisição de 90 segundos e tempos de espera de 2min30s, 5min00s, 7min30s, 10min00s, 12min30s e 15min00s, visando determinar o tempo de espera ideal para essa rotação.

Destaca-se que a verificação em 15 RPM foi considerada opcional, dependendo da comparação entre os tempos de espera de 10 RPM e 5 RPM. Isso porque,

conforme os resultados do primeiro ensaio, a estabilização do escoamento tende a ocorrer mais rapidamente em rotações maiores.

### 3.3.4 Ensaio principal

Após a definição do tempo de espera e do tempo de aquisição dos dados, foi realizadas a coleta dos dados para determinar as velocidades em cada ponto, conforme a matriz 5x7 representada na Figura 24, nas rotações de 5, 10, 15 e 20 RPM, totalizando assim 140 aquisições.

Essa matriz possibilitou a obtenção dos resultados de velocidade nos três eixos (X, Y e Z) em cada um dos pontos. Essas velocidades foram, então, utilizadas para o cálculo da intensidade turbulenta e da velocidade média do escoamento no eixo X, que serão discutidos na seção 3.3.5.

Para realizar as aquisições, inicialmente, o medidor doppler de velocidade foi posicionado no ponto desejado, verificando a distância em relação à parede do canal e a medida do calado correspondente. Conforme explicado na seção 2.2, o volume de amostragem encontra-se distante da tríade do medidor, portanto, foi adotado o centro do volume de estudo como referência para o calado. Após o posicionamento, os graus de liberdade de roll e pitch foram ajustados utilizando um nível eletrônico e confirmados pelo ângulo indicado no programa do equipamento, garantindo a correta orientação do equipamento. Após esses ajustes, foi realizada uma segunda verificação do posicionamento e das orientações, garantindo a precisão do ponto desejado.

Com o equipamento devidamente ajustado, o canal foi ligado e configurado para a rotação de 5 RPM. Seguindo o que foi estabelecido nas seções 3.3.2 e 3.3.3 sobre o tempo de espera para estabilização da velocidade do escoamento e o tempo de aquisição de dados, foi cronometrado um período de 7 minutos e 30 segundos para estabilização do escoamento. Uma vez atingido esse tempo de espera, os dados foram coletados pelo software do medidor durante 90 segundos. Após a conclusão da coleta para 5 RPM, a rotação foi alterada para 10 RPM, repetindo o mesmo procedimento de espera e aquisição. O mesmo procedimento foi realizado para as rotações de 15 RPM e 20 RPM, seguindo os mesmos tempos de espera e aquisição previamente definidos.

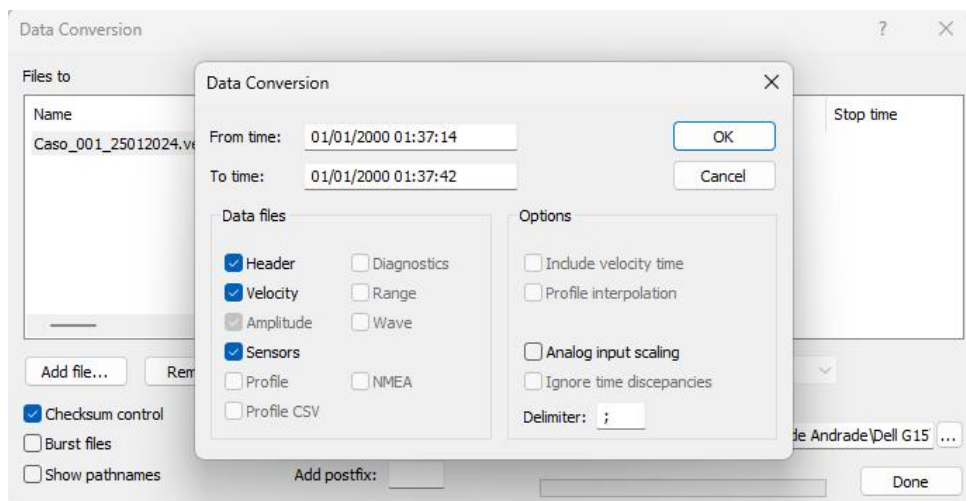
Destaca-se que, devido à necessidade de realizar as 140 aquisições, cada uma com duração aproximada de 10 minutos (incluindo tempo de espera, tempo de aquisição, troca de rotação no painel de controle e movimentação do equipamento para outro ponto), os ensaios não puderam ser realizados no mesmo dia, devido à agenda de permanência do laboratório e de utilização do canal. Por isso, a temperatura da água do canal precisou ser medida para cada aquisição, considerando possíveis variações. Dessa forma, para cada ponto da matriz, todas as aquisições nas rotações de 5, 10, 15 e 20 RPM foram realizadas de forma sequencial. Assim,

os dados para todas as rotações foram obtidos sem a necessidade de mover o vetor, garantindo que os resultados fossem registrados sob as mesmas condições de temperatura.

### 3.3.5 Tratamento dos dados

Após a coleta dos dados pelo software do medidor, foi gerado um arquivo no formato .VEC, que em seguida foi convertido para .DAT dentro do próprio software, mantendo os dados de interesse, conforme o padrão proposto pelo programa, como mostrado na Figura 26. A partir dessa conversão, foi desenvolvido um código em Octave para trabalhar os dados. Esse código foi utilizado para separar e calcular as velocidades médias nos três eixos (X, Y e Z), bem como os respectivos desvios padrão. Além disso, o código também calculou a intensidade turbulenta conforme a equação descrita na seção 2.3.

Figura 26 – Aba de conversão de arquivos e opções selecionadas.



Fonte: Autoria própria (2024).

Esse tratamento forneceu a velocidade média e a intensidade turbulenta em cada ponto analisado. Em seguida, todos os dados foram organizados em uma planilha Excel, registrando as velocidades, os desvios padrão, as intensidades turbulentas e as temperaturas da água durante as aquisições.

Com essas informações, foi possível calcular a velocidade média do escoamento e a intensidade turbulenta média para cada rotação. A partir das velocidades médias obtidas para diferentes rotações por minuto (RPM), foi gerada uma equação linear que relaciona a velocidade média do escoamento com a RPM do hélice no canal, para a seção completa e a região mais utilizada nos experimentos. Essas equações permitiram a definição precisa da velocidade média do escoamento no eixo X para qualquer rotação do canal.

## 4 RESULTADOS

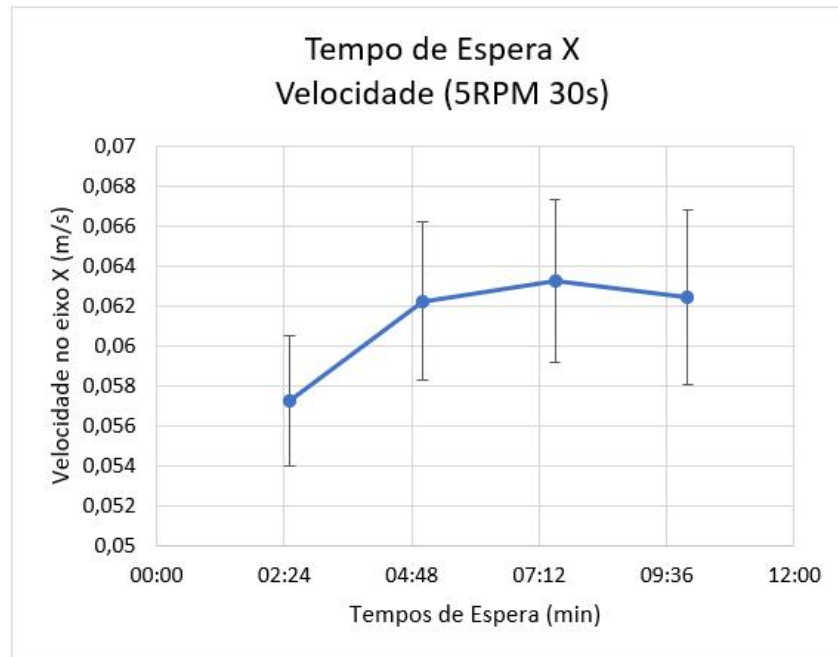
Na apresentação dos resultados, será discutido cada caso analisado no primeiro e segundo ensaio, que resultaram na definição do tempo de espera e do tempo de aquisição para o ensaio principal. Em seguida, serão apresentados os resultados do ensaio principal, que incluem as velocidades e intensidades turbulentas obtidas para cada ponto. Com base nesses resultados, será apresentada, para a seção completa e para a região mais utilizada nos experimentos, a equação linear que descreve a relação entre a velocidade média do escoamento e a rotação do propulsor, além da intensidade turbulenta média para cada rotação estudada.

### 4.1 PRIMEIRO ENSAIO

As primeiras aquisições realizadas com rotações de 5 e 20 RPM, para os tempos de 30, 60 e 90 segundos, são representados nas Figuras 27, 28, 29, 30, 31 e 32. Esses dados permitiram concluir que, para 5 RPM, o tempo de espera necessário para a estabilização do escoamento não foi claramente definido. Ressalta-se que os valores obtidos nesses testes iniciais foram utilizados para uma visualização preliminar e não para os resultados finais. Portanto, novas coletas de dados foram realizadas após a definição dos tempos ideais de espera e de aquisição.

A Figura 27 apresenta a relação entre a velocidade no eixo X (comprimento do canal), em m/s, e o tempo de espera para a rotação de 5 RPM com um tempo de aquisição de 30 segundos. Observa-se que, para a rotação de 5 RPM, o tempo de espera de 2min 30s é insuficiente, conforme apresentado, onde a velocidade aumenta 8,72% ao atingir 5 minutos de espera. No entanto, com 7min 30s, a velocidade apresenta apenas 1,64% de acréscimo, e, em seguida, com 10 minutos de espera, um decréscimo de 1,28%.

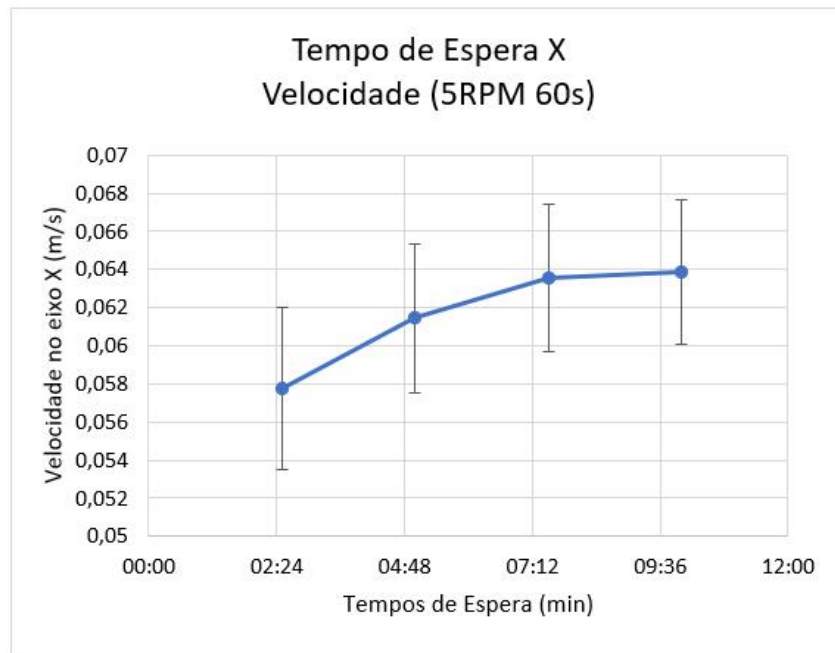
Figura 27 – Gráfico representando o tempo de espera para 5 RPM com 30s



Fonte: Autoria própria (2024).

Já a Figura 28 exibe, para a rotação de 5 RPM e com tempo de aquisição de 60 segundos, que ocorre um acréscimo na velocidade de 5min para 7min30s de 3,50%. No entanto, entre 7min30s e 10min, o aumento é de 0,43%, indicando uma possível estabilização do escoamento ao atingir 7min30s de espera quando utilizado o tempo de aquisição de 60s.

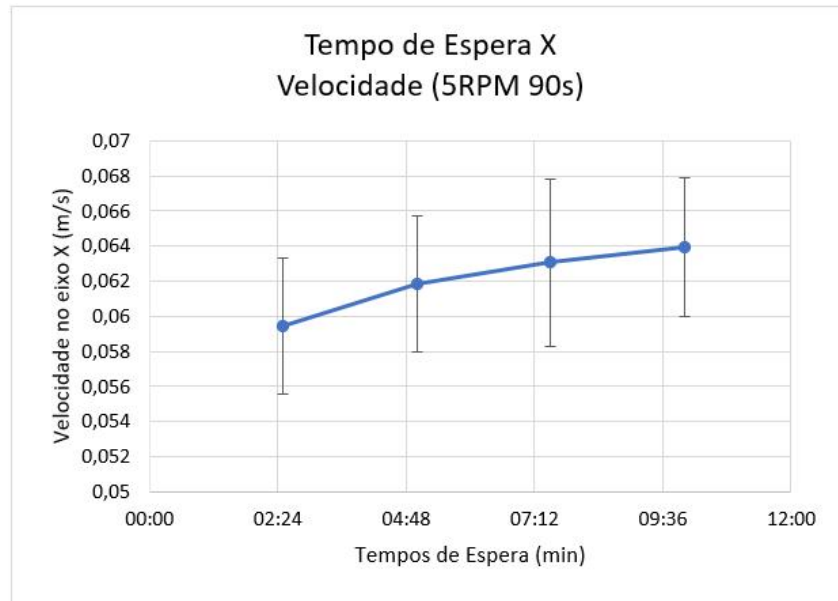
Figura 28 – Gráfico representando o tempo de espera para 5 RPM com 60s



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 29 destaca que, para o tempo de aquisição de 90 segundos, o comportamento é semelhante ao observado com 60 segundos, com a diferença de que o aumento de velocidade entre 7min30s e 10min é de 1,41%. Entretanto, destaca-se que, com o tempo de aquisição de 90 segundos, a amostragem de dados é maior do que com 60 segundos, com isso, esse aumento de 1,41% não permitiu a conclusão sobre o tempo de espera para a rotação de 5RPM. Essa constatação forneceu o argumento para a realização de um novo teste.

Figura 29 – Gráfico representando o tempo de espera para 5 RPM com 90s

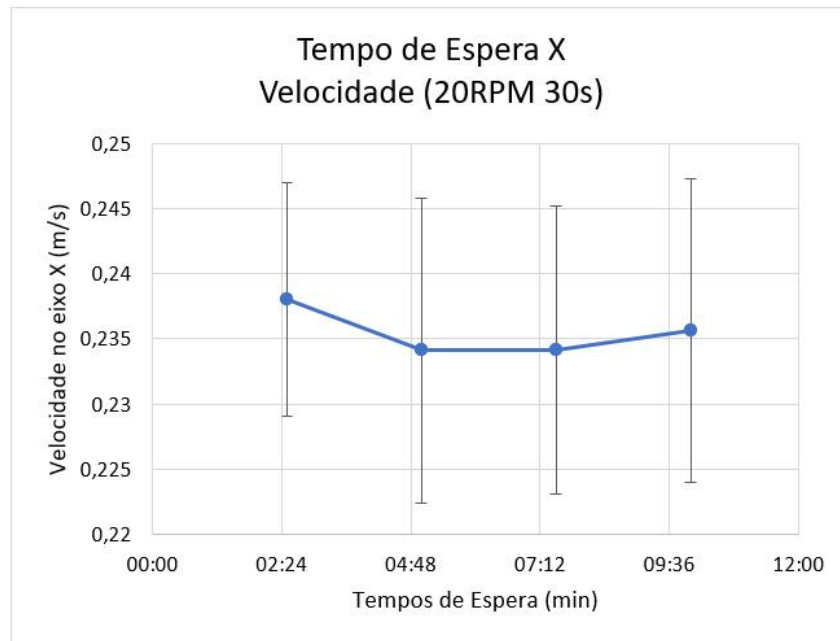


Fonte: Autoria própria (2024).

Para os ensaios realizados com a rotação de 20 RPM, destaca-se que, com um tempo de aquisição de 90 segundos, a velocidade do escoamento apresentou estabilização já no primeiro tempo de espera, ou seja, com 2min30s. No entanto, para os tempos de aquisição de 30 e 60 segundos, foi observada uma pequena variação na velocidade.

A Figura 30 apresenta os resultados obtidos para a rotação de 20 RPM com um tempo de aquisição de 30s. Observa-se que a velocidade do escoamento diminuiu entre o tempo de espera de 2min30s e 5min em 1,64%. Essa redução ocorre porque os ensaios começaram com o escoamento em inércia, ou seja, com velocidade inicial igual a zero. Ao acionar a unidade de propulsão, ocorre um pico de velocidade até que o escoamento atinja a estabilização.

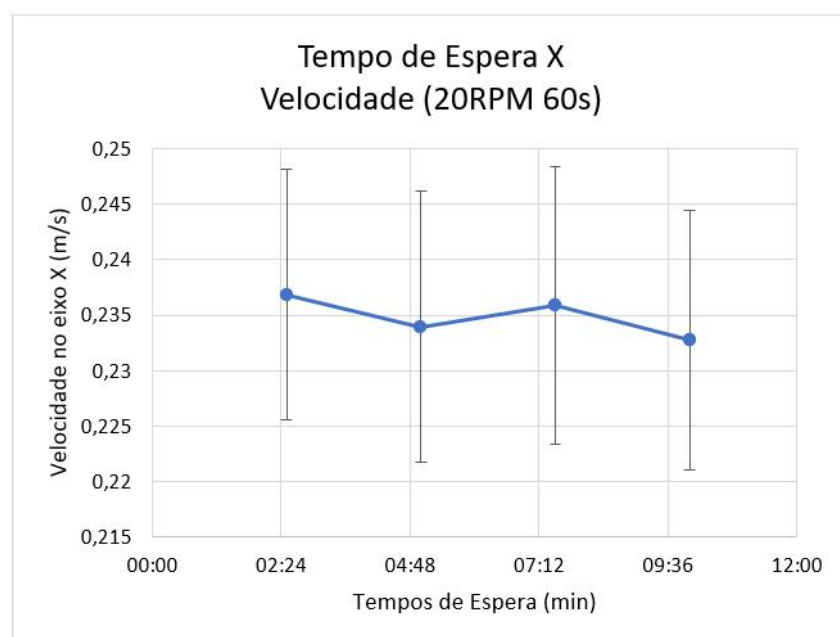
Figura 30 – Gráfico representando o tempo de espera para 20 RPM com 30s



Fonte: Aatoria própria (2024).

Já na Figura 31 que representa a relação da velocidade do escoamento em função do tempo de espera para a rotação de 20 RPM com um tempo de aquisição de 60 segundos, observamos um comportamento semelhante ao do caso com 30 segundos de tempo de aquisição. Novamente, ocorre uma redução de 1,23% da velocidade entre o tempo de espera de 2min30s e o de 5min.

Figura 31 – Gráfico representando o tempo de espera para 20 RPM com 60s

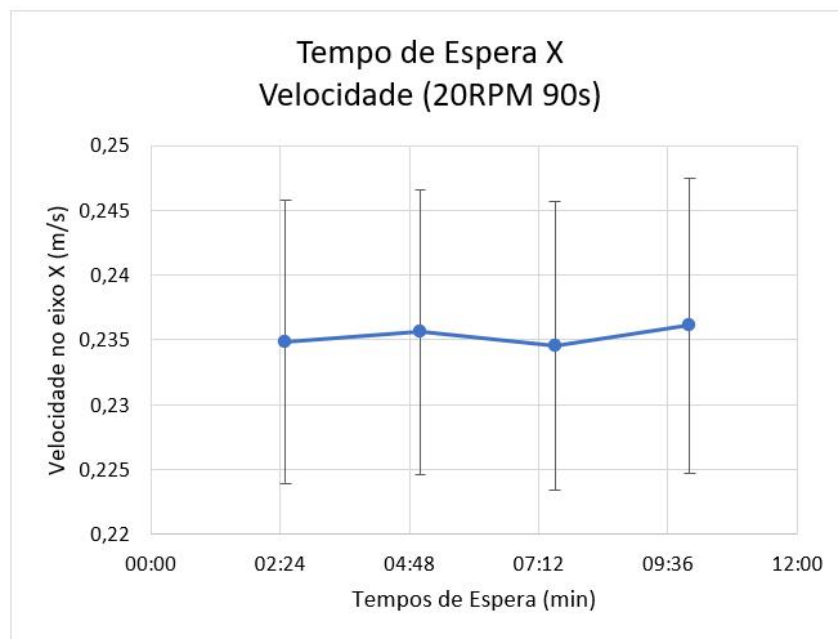


Fonte: Aatoria própria (2024).



A Figura 32 evidencia que, para a rotação de 20 RPM com um tempo de aquisição de 90 segundos, a velocidade do escoamento apresenta estabilidade já no primeiro tempo de espera, ou seja, aos 2min30s. Isso ocorre devido ao maior tempo de aquisição, que, ao ser de 90 segundos, permite uma melhor captura da estabilização do escoamento nesse período. A variação da velocidade ocorre com um acréscimo de 0,32% de 2min30s para 5min, e de 5min para 7min30s um decréscimo de 0,45%, e logo em seguida um aumento de 0,67%.

Figura 32 – Gráfico representando o tempo de espera para 20 RPM com 90s



Fonte: Autoria própria (2024).

Com base nas informações obtidas no primeiro ensaio para a definição do tempo de espera e do tempo de aquisição, conclui-se, a partir dos resultados apresentados nas Figuras 29 e 32, que o tempo de aquisição ideal é de 90 segundos, devido à maior amostragem de dados e, conseqüentemente, uma velocidade média mais precisa.

Já em relação ao tempo de espera, observou-se que, na rotação de 20 RPM, conforme a Figura 32, a velocidade do escoamento atinge estabilização já aos 2 minutos e 30 segundos. No entanto, para a rotação de 5 RPM, conforme a Figura 29, a estabilização do escoamento não é claramente definida, uma vez que a velocidade do escoamento apresenta um aumento de 1,41% entre 7min30s e 10min, sugerindo que a velocidade média ainda está em crescimento e que o tempo de espera ideal para 5 RPM pode estar além dos 10 minutos.

Por essa razão, foi realizado um novo ensaio para determinar o tempo de espera ideal para 5 RPM e 10 RPM, que denominamos de segundo ensaio, esse esclarecido na seção 3.3.3, resultando na definição do tempo de espera ideal para

utilização no ensaio principal, ou seja, para as rotações de 5, 10, 15 e 20 RPM, esse discutido na seção 3.3.4.

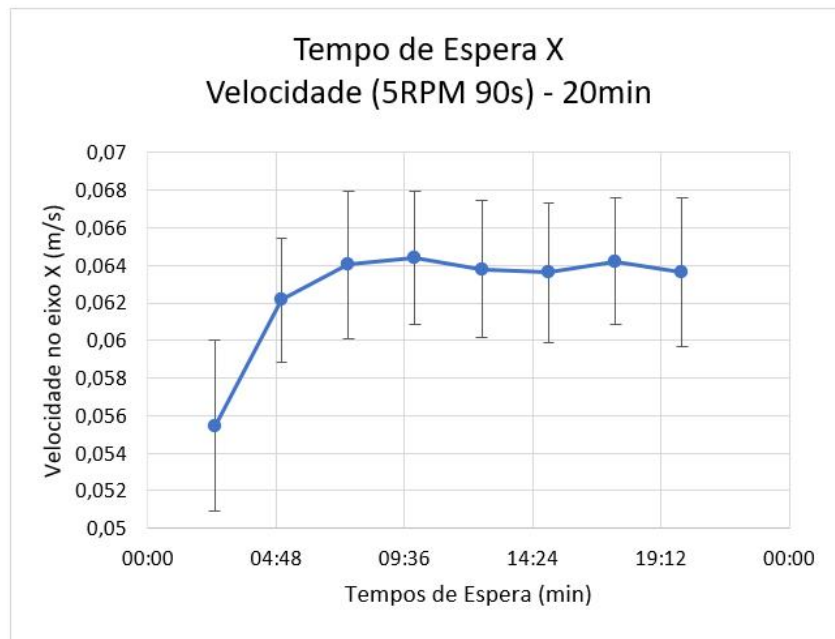
Pontua-se que com a realização do primeiro ensaio foi observado que com o aumento da velocidade no canal, a estabilização do escoamento ocorre mais rapidamente, e, caso o tempo de espera para 10 RPM seja igual ou menor que o de 5 RPM, não será necessário avaliar o tempo de espera em 15 RPM.

## 4.2 SEGUNDO ENSAIO

No segundo ensaio realizado para a definição do tempo de espera, com rotações de 5 e 10 RPM, foi possível concluir que o tempo de espera ideal para todos os casos estudados é de 7 minutos e 30 segundos. Além disso, verificou-se que não é necessário realizar testes para 15 RPM, uma vez que os resultados em 10 RPM indicaram que o escoamento atinge estabilização com 7min30s de espera.

A Figura 33 apresenta os resultados obtidos para a rotação de 5 RPM com um tempo de aquisição de 90 segundos, considerando os tempos de espera de 2min30s, 5min, 7min30s, 10min, 12min30s, 15min, 17min30s e 20min. Conclui-se que a estabilização da velocidade do escoamento ocorre aos 7min30s. No entanto, destaca-se que há uma oscilação na velocidade média a partir desse ponto até 20 minutos, com variações de +0,61%, -0,97%, -0,30%, +0,97% e -0,91%.

Figura 33 – Gráfico representando o ensaio do tempo de espera para 5RPM com 90s

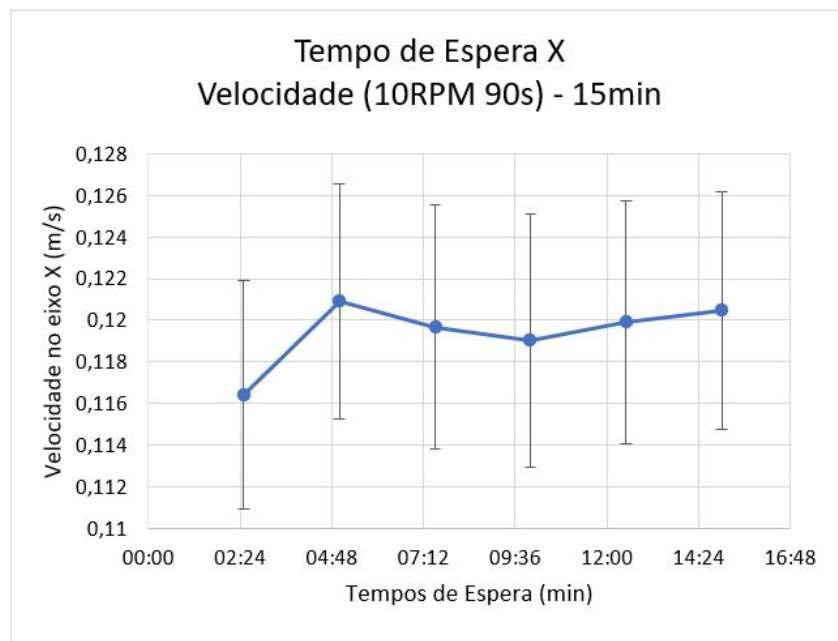


Fonte: Autoria própria (2024).

Já a Figura 34 que apresenta os resultados para a rotação de 10 RPM com um tempo de aquisição de 90 segundos e considerando os tempos de espera de 2min30s,

5min, 7min30s, 10min, 12min30s e 15min, evidencia uma redução de 1,01% na velocidade entre 5min e 7min30s, seguida por outra queda de 0,54% entre 7min30s e 10min. Entre 10min e 12min30s, observa-se um aumento de 0,74%, e de 12min30s até 15min há um acréscimo de 0,46%. Como as variações após os 7min30s são inferiores a 1%, conclui-se que esse é o tempo de espera ideal para 10 RPM. Conforme discutido anteriormente, esse resultado elimina a necessidade de definir o tempo de espera para 15 RPM.

Figura 34 – Gráfico representando o ensaio do tempo de espera para 10RPM com 90s



Fonte: Autoria própria (2024).

Com base nos valores apresentados nos dois ensaios para a definição do tempo de espera e de aquisição, conclui-se que o tempo de espera ideal é de 7min30s para a estabilização da velocidade do escoamento, uma vez que as variações observadas são inferiores a 1,00%. Além disso, o tempo de aquisição ideal é de 90 segundos, pois proporciona uma maior amostragem de dados e, conseqüentemente, resultados mais precisos para a análise.

#### 4.3 ENSAIO PRINCIPAL

Com os tempos de espera e aquisição definidos, foram realizadas as medições para todos os pontos da seção estudada, conforme descrito na seção 3.3.4. Os dados obtidos nesse ensaio foram fundamentais para a criação de uma equação linear que descreve a relação entre a velocidade média do escoamento e a rotação do propulsor para a seção completa e para a região mais utilizada nos experimentos.

Os resultados estão dispostos nas Figuras 35 a 46, que apresentam as velocidades médias e as intensidades turbulentas médias para as rotações de 5, 10, 15 e 20 RPM.

As Figuras 37, 40, 43 e 46, exibem a intensidade turbulenta em formato de colormap, permitindo a identificação visual das regiões com maior intensidade turbulenta em comparação com as demais. As áreas próximas ao vermelho indicam as zonas de maior intensidade. No entanto, é importante considerar a diferença entre os valores mínimos e máximos, pois essa variação pode ser pequena e, portanto, influenciar na interpretação dos resultados.

A Figura 47 exhibe a intensidade turbulenta média para cada rotação estudada, da seção completa e da região mais usada nos experimentos, evidenciando que a intensidade turbulenta diminui com o aumento da velocidade do escoamento em ambos os casos. Além disso, a Figura 48 ilustra a velocidade média para cada rotação estudada na seção completa e na região mais utilizada nos experimentos, juntamente com a reta de tendência e sua equação linear, o que permite determinar a velocidade do escoamento com base na rotação configurada no painel de controle do canal.

A Figura 35 apresenta a velocidade em cada ponto da matriz 5x7 para a rotação de 5 RPM. A partir desses dados, foi possível calcular que a velocidade média do escoamento para essa rotação é de 0,0611 m/s. Já a Figura 36 mostra a intensidade turbulenta em cada ponto para a mesma rotação, indicando uma intensidade turbulenta média de 4,7% para 5 RPM em toda a seção.

Figura 35 – Velocidade do escoamento para 5RPM.

Velocidade (m/s) 5RPM		Boca (mm)						
		-600	-400	-200	0	200	400	
Calado (mm)	1000	0,0547	0,0591	0,0652	0,0640	0,0624	0,0637	0,0592
	800	0,0579	0,0624	0,0648	0,0618	0,0643	0,0615	0,0602
	600	0,0568	0,0619	0,0611	0,0578	0,0618	0,0586	0,0591
	400	0,0595	0,0632	0,0624	0,0588	0,0638	0,0601	0,0592
	200	0,0598	0,0609	0,0619	0,0599	0,0617	0,0631	0,0603
							Velocidade Média	0,0611 m/s

Fonte: Autoria própria (2024).

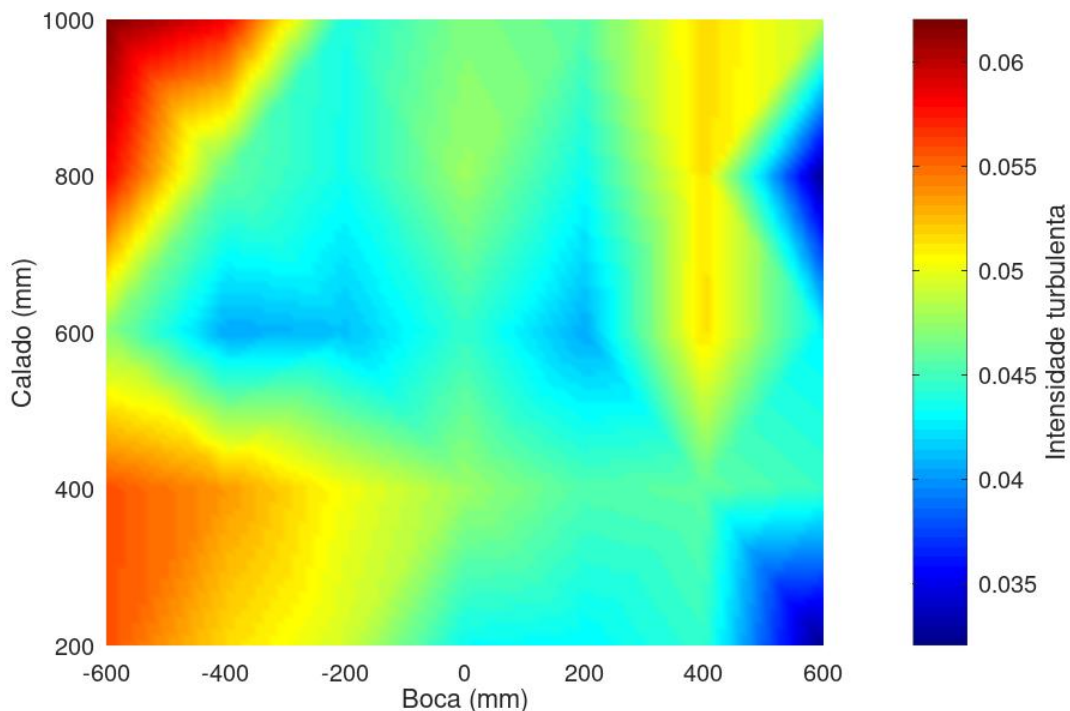
Figura 36 – Intensidade turbulenta para 5RPM.

Intensidade em 5RPM		Boca (mm)						
		-600	-400	-200	0	200	400	600
Calado (mm)	1000	6,2%	5,8%	4,4%	4,7%	4,6%	5,5%	4,9%
	800	5,8%	4,6%	4,4%	4,8%	4,3%	5,1%	3,2%
	600	4,7%	4,0%	4,1%	4,5%	4,1%	5,2%	4,3%
	400	5,6%	5,4%	5,0%	4,8%	4,5%	6,2%	4,5%
	200	5,6%	5,2%	4,9%	4,3%	4,3%	4,5%	3,2%
							Intensidade Média	4,7%

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 37 mostra que, para a rotação de 5 RPM, o ponto 1X1 (localizado em 1000 mm e -600 mm) apresenta a maior intensidade turbulenta. Os pontos 5X1 (200 mm e -600 mm), 4X1 (400 mm e -600 mm) e 3X6 (600 mm e 400 mm) também se destacam pela elevada intensidade turbulenta. Nesse escoamento, a intensidade turbulenta variou de um valor máximo de 6,2% a um mínimo de 3,2%.

Figura 37 – Intensidade turbulenta para 5RPM.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 38 exibe as velocidades obtidas para cada ponto de medição na rotação de 10 RPM. Com base nesses resultados, a velocidade média do escoamento foi determinada em 0,1164 m/s. Os dados da intensidade turbulenta para cada ponto é retratada na Figura 39, com ele foi obtido a intensidade turbulenta média de 4,0%,

evidenciando uma leve diminuição na turbulência à medida que a velocidade do escoamento aumenta.

Figura 38 – Velocidade do escoamento para 10RPM.

Velocidade (m/s) 10RPM		Boca (mm)								
		-600	-400	-200	0	200	400	600		
Calado (mm)	1000	0,1052	0,1126	0,1217	0,1197	0,1187	0,1190	0,1102		
	800	0,1084	0,1162	0,1230	0,1181	0,1217	0,1164	0,1114		
	600	0,1089	0,1164	0,1148	0,1102	0,1180	0,1122	0,1114		
	400	0,1147	0,1178	0,1165	0,1096	0,1205	0,1183	0,1123		
	200	0,1137	0,1171	0,1191	0,1149	0,1186	0,1214	0,1150		
							Velocidade Média	0,1164	m/s	

Fonte: Autoria própria (2024).

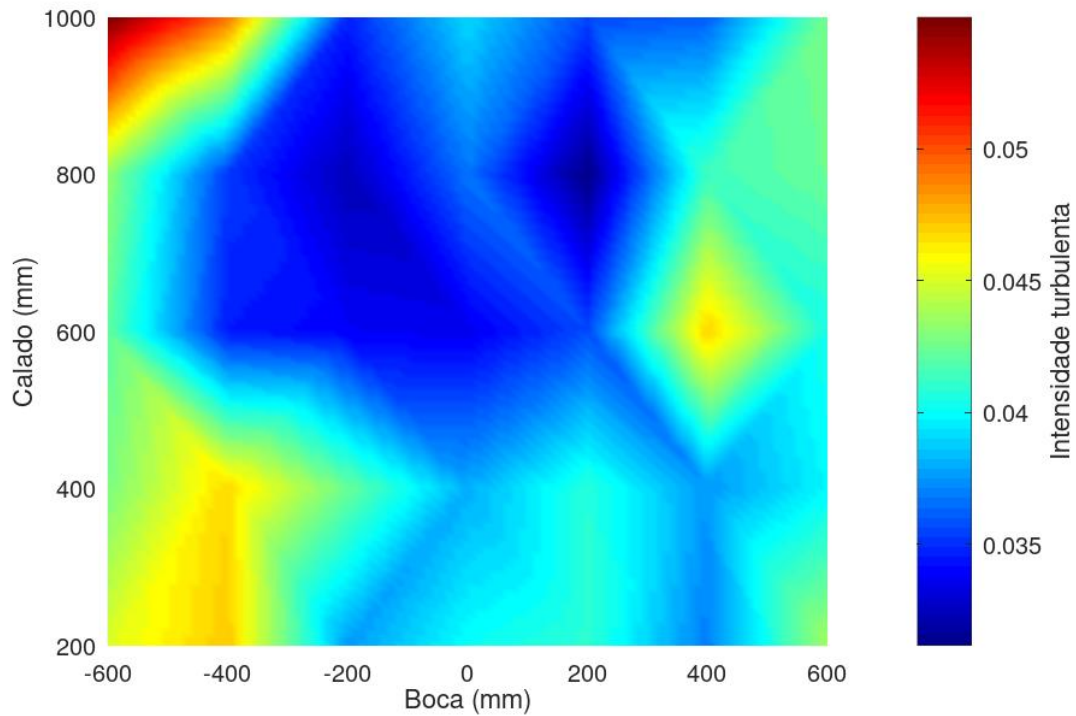
Figura 39 – Intensidade turbulenta para 10RPM.

Intensidade em 10RPM		Boca (mm)								
		-600	-400	-200	0	200	400	600		
Calado (mm)	1000	5,5%	4,9%	3,5%	3,9%	3,6%	3,6%	4,3%		
	800	4,3%	3,5%	3,2%	3,7%	3,1%	4,1%	4,2%		
	600	4,2%	3,5%	3,4%	3,4%	3,6%	4,7%	4,0%		
	400	4,3%	4,7%	4,2%	3,8%	4,1%	3,7%	4,0%		
	200	4,5%	4,7%	3,8%	4,0%	4,1%	3,7%	4,4%		
							Intensidade Média	4,0%		

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 40 revela um perfil de intensidade turbulenta mais homogêneo, com apenas alguns pontos de destaque. Observa-se que o ponto 1X1, assim como em 5 RPM, apresenta a maior intensidade turbulenta registrada. Neste escoamento, os valores variaram entre um máximo de 5,5% e um mínimo de 3,1%.

Figura 40 – Intensidade turbulenta para 10RPM.



Fonte: Autoria própria (2024).

Para a rotação de 15 RPM, as velocidades obtidas estão representadas na Figura 41, enquanto a intensidade turbulenta é mostrada na Figura 42. Com base nesses dados, foi possível determinar uma velocidade média de 0,1772 m/s e uma intensidade turbulenta média de 3,7%.

Figura 41 – Velocidade do escoamento para 15RPM.

Velocidade (m/s) 15RPM		Boca (mm)						
		-600	-400	-200	0	200	400	
Calado (mm)	1000	0,1606	0,1728	0,1848	0,1804	0,1813	0,1792	0,1661
	800	0,1660	0,1782	0,1876	0,1780	0,1859	0,1758	0,1691
	600	0,1673	0,1772	0,1731	0,1675	0,1810	0,1714	0,1705
	400	0,1754	0,1777	0,1796	0,1677	0,1844	0,1815	0,1713
	200	0,1738	0,1790	0,1813	0,1767	0,1813	0,1831	0,1760
Velocidade Média							0,1772	m/s

Fonte: Autoria própria (2024).

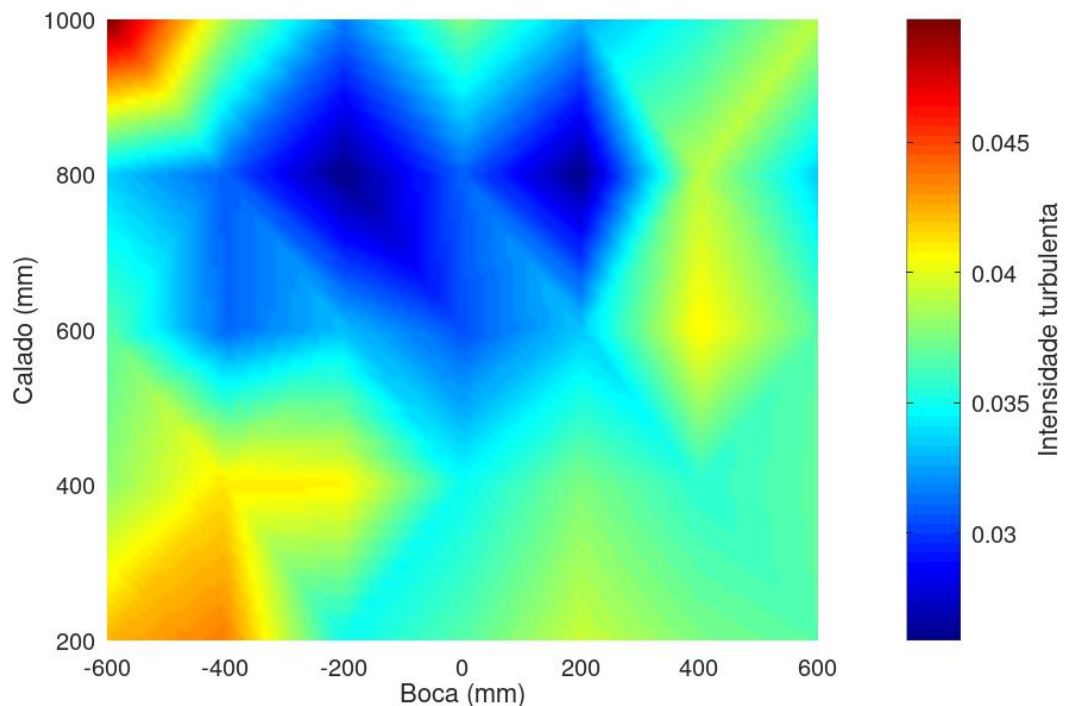
Figura 42 – Intensidade turbulenta para 15RPM.

Intensidade em 15RPM		Boca (mm)						
		-600	-400	-200	0	200	400	600
Calado (mm)	1000	5,0%	3,9%	3,2%	3,8%	3,3%	3,5%	3,9%
	800	3,4%	3,1%	2,6%	3,1%	2,6%	3,9%	3,4%
	600	3,7%	3,1%	3,3%	3,1%	3,3%	4,1%	3,7%
	400	3,8%	4,1%	4,1%	3,5%	3,8%	3,6%	3,7%
	200	4,2%	4,4%	3,5%	3,7%	3,9%	3,8%	3,7%
							Intensidade Média	3,7%

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 43 também demonstra uma distribuição homogênea dos resultados, semelhante ao perfil observado na rotação de 10 RPM. Nesta configuração, a intensidade turbulenta variou entre um valor máximo de 5,0% e um mínimo de 2,6%.

Figura 43 – Intensidade turbulenta para 15RPM.



Fonte: Autoria própria (2024).

Na rotação de 20 RPM, os resultados mostram uma velocidade média de 0,2308 m/s e uma intensidade turbulenta média de 3,5%. As velocidades medidas em cada ponto estão ilustradas na Figura 44, enquanto as intensidades turbulentas podem ser visualizadas na Figura 45.



Figura 44 – Velocidade do escoamento para 20RPM.

Velocidade (m/s) 20RPM		Boca (mm)								
		-600	-400	-200	0	200	400	600		
Calado (mm)	1000	0,2062	0,2256	0,2409	0,2345	0,2365	0,2332	0,2157		
	800	0,2195	0,2328	0,2459	0,2318	0,2439	0,2299	0,2186		
	600	0,2204	0,2299	0,2258	0,2197	0,2350	0,2229	0,2308		
	400	0,2296	0,2308	0,2340	0,2209	0,2437	0,2376	0,2255		
	200	0,2280	0,2330	0,2374	0,2319	0,2393	0,2390	0,2281		
							Velocidade Média	0,2308	m/s	

Fonte: Autoria própria (2024).

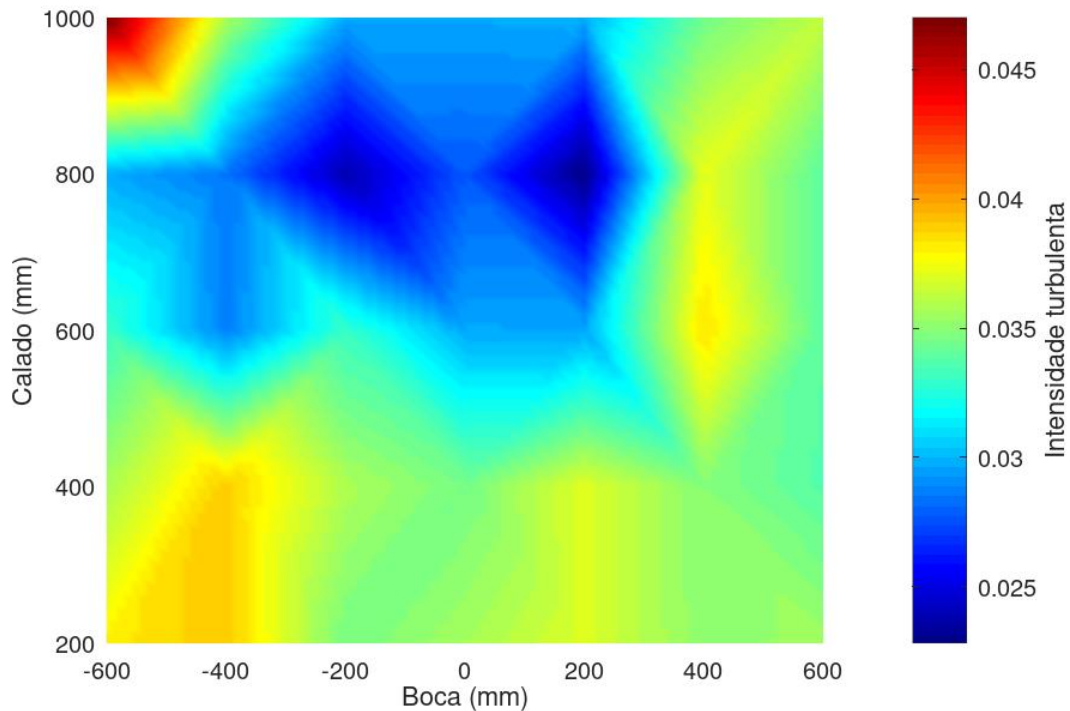
Figura 45 – Intensidade turbulenta para 20RPM.

Intensidade em 20RPM		Boca (mm)								
		-600	-400	-200	0	200	400	600		
Calado (mm)	1000	4,7%	3,6%	3,0%	4,3%	3,0%	3,4%	3,6%		
	800	3,0%	2,8%	2,4%	2,8%	2,3%	3,7%	3,4%		
	600	3,3%	2,9%	3,3%	3,0%	3,0%	3,8%	3,4%		
	400	3,6%	3,9%	3,6%	3,5%	3,7%	3,5%	3,4%		
	200	3,8%	3,9%	3,5%	3,6%	3,7%	3,5%	3,6%		
							Intensidade Média	3,5%		

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 37 indica, assim como nas demais rotações, que o ponto 1x1 apresenta a maior intensidade turbulenta. Observa-se uma coloração mais amarelada na parte inferior da seção (calado de 200 mm), refletindo valores de intensidade entre 4,0% e 3,5%. No entanto, é importante destacar que a intensidade turbulenta para essa rotação possui um valor máximo de 4,7% e um mínimo de 2,3%.

Figura 46 – Intensidade turbulenta para 20RPM.



Fonte: Autoria própria (2024).

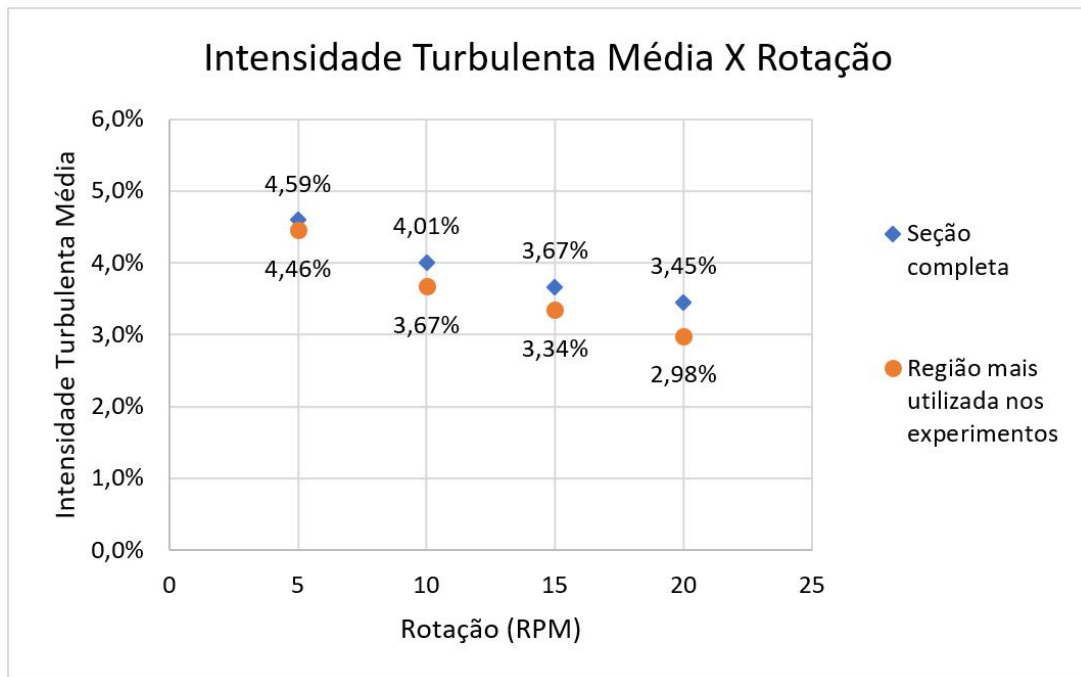
As representações em colormap, juntamente com os resultados numéricos, permitiram identificar visualmente os pontos de maior intensidade turbulenta. Essa visualização possibilitou realizar verificações durante as aquisições, a fim de compreender se as intensidades elevadas eram causadas por um erro de posicionamento do equipamento de medição ou se refletiam uma característica real do escoamento. Após procedimentos de verificação de trim, banda e posicionamento do equipamento de medição, constatou-se que o ponto 1x1 (localizado em 1000 mm e -600 mm) apresentou consistentemente a maior intensidade turbulenta em todas as rotações, confirmando que este ponto possui, de fato, uma intensidade turbulenta mais elevada que os demais.

Como apresentado na seção 3.3.4, as aquisições do ensaio principal não puderam ser realizadas no mesmo dia. Por isso, a temperatura da água foi registrada em cada aquisição, resultando em uma variação de temperatura entre o valor mínimo de 20,8 °C e o máximo de 27,2 °C, resultando em uma média de 24,1 °C. Essa variação de temperatura ocorreu devido à reposição de água no canal para calibrar seu calado e também às variações bruscas de temperatura na região geográfica durante o período das aquisições. É importante destacar que todas as quatro aquisições de um mesmo ponto foram realizadas no mesmo dia, garantindo assim que as medições ocorreram sob as mesmas condições de temperatura.

A Figura 47 apresenta os valores das intensidades turbulentas médias para

cada rotação estudada, ou seja, 5, 10, 15 e 20 RPM, na seção completa e na região mais utilizada nos experimentos. Através dessa visualização, é possível observar uma tendência de redução da intensidade turbulenta à medida que a rotação do propulsor aumenta, o que indica um escoamento mais estável em velocidades mais altas.

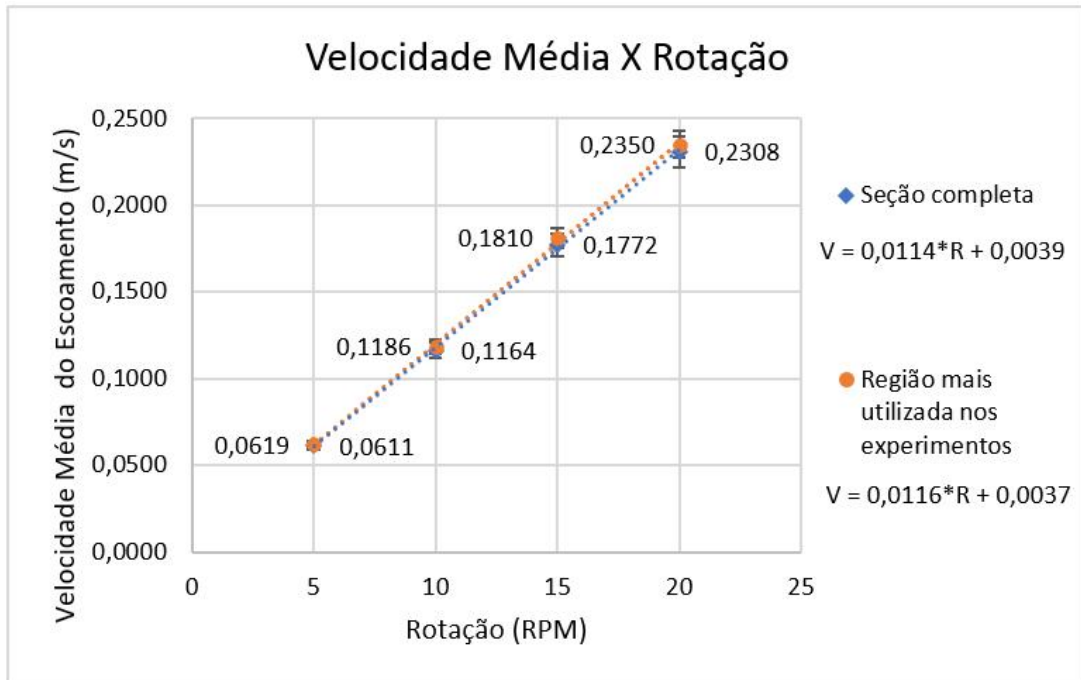
Figura 47 – Intensidade turbulenta média para cada rotação estudada.



Fonte: Autoria própria (2024).

Já a Figura 48 exibe os valores das velocidades médias para cada rotação, na seção completa e na região mais utilizada nos experimentos, acompanhadas das linhas de tendência e suas respectivas equações lineares. Essas equações permitem a determinação da velocidade do escoamento para qualquer rotação do propulsor, facilitando o ajuste e a previsão das condições de escoamento no canal com base nas rotações programadas.

Figura 48 – Velocidade média do escoamento para cada rotação estudada.



Fonte: Autoria própria (2024).

As Equações 4 e 5 relacionam a rotação do propulsor ( $R$ ) com a velocidade do escoamento ( $V$ ) para a seção completa e para a região mais utilizada nos experimentos, respectivamente.

$$V = 0,0114 \cdot R + 0,0039 \quad (4)$$

$$V = 0,0116 \cdot R + 0,0037 \quad (5)$$

## 5 CONCLUSÃO

Apresentando a caracterização do canal de água circulante do LIFE da UFSC Joinville, foram analisados aspectos críticos para a compreensão do escoamento, como a velocidade média e a intensidade turbulenta em diferentes rotações do propulsor. O medidor doppler de velocidade possibilitou a aquisição de dados de velocidade nas três dimensões, para cada ponto da matriz proposta. Esse dispositivo foi fundamental no ensaio preliminar, permitindo a análise do tempo de espera necessário para a estabilização do escoamento, bem como o tempo ideal de aquisição dos dados de velocidade. O segundo ensaio seguiu a mesma lógica dos ensaios preliminares, permitindo assumir o tempo de espera ideal para garantir a estabilização do escoamento.

Partindo dos parâmetros definidos, foi possível realizar o ensaio principal. Os resultados das velocidades e intensidades turbulentas em cada ponto permitiram calcular as médias desses valores para a seção completa e para a região mais utilizada nos experimentos, além de definir uma equação que relaciona a velocidade com a rotação do propulsor. A partir dessa análise, foi possível desenvolver as equações lineares que descrevem a relação entre a rotação do propulsor e a velocidade média do fluxo, tanto para a seção completa, como para a seção mais utilizada nos ensaios, fornecendo uma ferramenta prática e confiável para o cálculo de parâmetros da velocidade do canal.

Os resultados também revelaram que, com o aumento da rotação, ocorre uma redução na intensidade turbulenta, indicando maior estabilidade do fluxo em altas velocidades. No entanto, algumas regiões apresentaram intensidade turbulenta relativamente maior, evidenciando uma variação no comportamento do escoamento ao longo da seção estudada.

Diante disso, sugere-se a utilização de uma estrutura de honeycomb (favo de mel) para melhorar a uniformidade da intensidade turbulenta e diminuí-la, pois, de acordo com a geometria dessa forma, ela é capaz de amenizar essas turbulências e melhorar o escoamento na seção. Além disso, recomenda-se uma verificação detalhada da estrutura existente nas regiões com intensidades mais elevadas para identificar possíveis falhas ou componentes que possam estar influenciando o escoamento nessas áreas.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, sugere-se:

- Caracterização de outras seções ao longo da área de testes do canal, visando compreender o comportamento do escoamento e identificar a seção ideal para

ensaios;

- Implementação de melhorias no canal para reduzir a intensidade turbulenta, seguida pela verificação dos efeitos dessas mudanças nos resultados obtidos;
- Realização de caracterizações para rotações mais elevadas, determinando se a relação entre velocidade e rotação permanece linear ou apresenta variações;
- Expansão da caracterização com um número maior de pontos na seção, reduzindo o espaçamento entre os pontos medidos neste estudo para maior detalhamento do escoamento.

## REFERÊNCIAS

- ASSI, G. R. S.; MENEGHINI, J. R.; ARANHA, J. A. P.; COLETO, W. G. P. Design, assembling and verification of a circulating water channel facility for fluid dynamics experiments. *In: Proceedings of the 18TH INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING*, 6-11 nov. 2005, Ouro Preto, MG. 2005. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/cobem/2005/PDF/COBEM2005-1238.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2024.
- BASSE, N. T. Turbulence intensity and the friction factor for smooth- and rough-wall pipe flow. **Multidisciplinary Digital Publishing Institute - Fluids**, v. 2, n. 30, 2017.
- BAUM, S. K. **Glossary of physical oceanography and related disciplines**. Texas: Texas AM University, 2004.
- BUSNARDO, E. R. **Projeto conceitual de um canal de água circulante para pesquisas de interação fluido-estrutura na UFSC – campus de Joinville**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.
- CFD ONLINE. **Turbulence intensity**. 2022. Disponível em: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence\\_intensity](https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity). Acesso em: 24 jun. 2024.
- COANDA TECH COMPANY. **Facilities Laboratories**: Recirculating water channel. Canada, 2024. Disponível em: <https://coanda.ca/about/facilities-instrumentation/>. Acesso em: 23 jun. 2024.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2006.
- FUJARRA, A. L. C. **Estudos Experimentais e Analíticos das vibrações induzidas pela emissão de vórtices em cilindros flexíveis e rígidos**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- HAN, L.; NING, M.; XIE-CHONG, G. Uncertainty analysis for ship-bank interaction tests in a circulating water channel. **China Ocean Engineering**, v. 34, n. 3, p. 352–361, 2020.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **NASA dryden flow visualization facility**. Edwards, California, 1995. 22 p. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19950021493/downloads/19950021493.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- NORTEK. **Nortek Manuals**: The comprehensive manual for velocimeters. Noruega, 2022. 139 p. Disponível em: [https://www.nortekgroup.com/assets/software/N3015-030-Comprehensive-Manual-Velocimeters\\_1118.pdf](https://www.nortekgroup.com/assets/software/N3015-030-Comprehensive-Manual-Velocimeters_1118.pdf). Acesso em: 17 ago. 2024.
- NORTEK GROUP. **Vector**: Vector 300m. Norway, 2024. Disponível em: <https://www.nortekgroup.com/products/vector-300-m>. Acesso em: 23 jun. 2024.

WU, X.; ZHANG, X.; TIAN, X.; LI, X.; LU, W. A review on fluid dynamics of flapping foils. **Ocean Engineering**, v. 195, 2019.

ZHU, G.; FENG, Y.; CHEN, Z.; LU, H. Hydrodynamic design of a circulating water channel based on a fractional-step multi-objective optimization. **Ocean Engineering**, v. 251, 2022.