



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS QUIXADÁ
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

ELIAS FROTA COUTINHO FILHO

SIMULAÇÃO DE SENSOR DE FLUXO ULTRASSÔNICO

QUIXADÁ
2023

ELIAS FROTA COUTINHO FILHO

SIMULAÇÃO DE SENSOR DE FLUXO ULTRASSÔNICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Computação do Campus Quixadá da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Computação.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Luis Rodolfo Rebouças
Coutinho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Thiago Werlley Bandeira da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Carlos Igor Ramos Bandeira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil parabolico	17
Figura 2 – Gráfico de saída de um sensor analógico.	19
Figura 3 – Gráfico de saída de um sensor digital. Fonte: Autor	19
Figura 4 – Saturação de saída digital e Sinal amplificado.. . . .	20
Figura 5 – Resposta não-linear e linear.	21
Figura 6 – Sinais com frequências diferentes	23
Figura 7 – Disposição padrão de transdutores para o método de tempo de transito. . . .	24
Figura 8 – Micro-Benchmark	26
Figura 9 – Diagrama de blocos	27
Figura 10 – Relação viscosidade vs temperatura para água pura	31
Figura 11 – Simulação do campo de velocidades	34
Figura 12 – Simulação do campo de velocidades	35
Figura 13 – Gráfico de erro médio absoluto	37
Figura 14 – Gráfico de sensibilidade	38
Figura 15 – Delta T x Velocidade	39
Figura 16 – Gráfico de Regressão	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de tabela com informações sobre os trabalhos	13
Tabela 2 – Tabela de temperaturas e viscosidades correspondentes	31
Tabela 3 – Velocidades em diferentes temperaturas	35
Tabela 4 – Variação do gradiente de pressão	36
Tabela 5 – Aplicação do modelo do sensor	36
Tabela 6 – Aplicação do modelo do sensor	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

atm	atmosfera
Hz	Hertz
mm	Milímetros
mmHg	milímetro de mercúrio
Pa	pascal
SI	Sistema Internacional

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Comprimento de onda
ρ	Massa específica
d	Densidade relativa
μ	Viscosidade Dinâmica
ν	Viscosidade Cinemática
P	Pressão
ω	Frequência
ϕ	Fase angular
t_u	Tempo de subida da onda
t_d	Tempo de descida da onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivos específicos	10
2	TRABALHOS RELACIONADOS	11
2.1	<i>High-precision time-of-flight determination algorithm for ultrasonic flow measurement</i>	<i>11</i>
2.2	<i>Research on Coupling Method of Flow Field and Acoustic Field Based on COMSOL for Ultrasonic Flowmeter</i>	<i>11</i>
2.3	<i>Numerical Simulation of Transit-time Ultrasonic Flowmeters in Deep-regulating Units</i>	<i>12</i>
2.4	<i>Clamp-On Measurements of Fluid Flow in Small-Diameter Metal Pipes Using Ultrasonic Guided Waves</i>	<i>12</i>
2.5	Análise Comparativa	12
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1	Mecânica dos fluidos	14
3.1.1	<i>Fluidos</i>	<i>14</i>
3.1.2	<i>Propriedades dos fluidos</i>	<i>14</i>
3.1.2.1	<i>Densidade</i>	<i>15</i>
3.1.2.2	<i>Compressibilidade</i>	<i>15</i>
3.1.2.3	<i>Viscosidade</i>	<i>15</i>
3.1.2.4	<i>Pressão</i>	<i>16</i>
3.1.3	<i>Equação de Navier-Stokes</i>	<i>16</i>
3.1.4	<i>Perfil Laminar</i>	<i>17</i>
3.2	Sensores	18
3.2.1	<i>Definição</i>	<i>18</i>
3.2.2	<i>Tipos de resposta e condicionamento de sinais</i>	<i>18</i>
3.2.3	<i>Características de sensores</i>	<i>20</i>
3.2.3.1	<i>Sensibilidade</i>	<i>20</i>
3.2.3.2	<i>Exatidão e precisão</i>	<i>20</i>
3.2.3.3	<i>Linearidade</i>	<i>20</i>
3.2.4	<i>Transdutores</i>	<i>21</i>

3.2.5	<i>Sensores não invasivos</i>	21
3.3	Características de sinais ultrassônicos	22
3.3.1	<i>Frequência</i>	22
3.3.2	<i>Comprimento de onda</i>	23
3.4	Fluxômetros ultrassônico	23
3.4.1	<i>Tempo de transito</i>	23
3.5	Simuladores	24
3.5.1	<i>k-Wave</i>	24
3.5.2	<i>COMSOL Multiphysics Simulation Software</i>	25
3.5.3	<i>Ansys</i>	25
3.6	Julia	25
3.6.1	<i>Benchmarks</i>	25
4	METODOLOGIA	27
4.1	Modelagem do sensor	27
4.1.1	<i>Formulação Matemática</i>	27
4.1.2	<i>Implementação Computacional do Modelo em Julia</i>	28
4.2	Implementação do ambiente de simulação	29
4.2.1	<i>Simulação de Perfil Parabólico</i>	29
4.2.2	<i>Calculo do tempo de trânsito</i>	29
4.2.3	<i>Aplicação do modelo</i>	30
4.3	Aplicação de ruído	30
4.4	Variação de parâmetros	30
4.4.1	<i>Viscosidade cinemática</i>	31
4.4.2	<i>Gradiente de pressão</i>	31
4.5	Análise de Métricas	32
4.5.1	<i>Precisão</i>	32
4.5.2	<i>Sensibilidade</i>	32
4.5.3	<i>Linearidade</i>	33
5	RESULTADOS	34
5.1	Simulação de perfil parabólico	34
5.1.1	<i>Campo de velocidades</i>	34
5.1.2	<i>Perfil de velocidade</i>	34

5.2	Variação de parâmetros	35
5.2.1	<i>Varição de viscosidade</i>	35
5.2.2	<i>Varição de gradiente de pressão</i>	36
5.3	Modelo do sensor	36
5.3.1	<i>Integração do modelo à simulação</i>	36
5.3.2	<i>Análise de Métricas</i>	37
5.3.2.1	<i>Precisão</i>	37
5.3.2.2	<i>Sensibilidade</i>	38
5.3.2.3	<i>Linearidade</i>	38
6	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	41
	APÊNDICE A –CÓDIGOS	43

1 INTRODUÇÃO

A escassez de recursos hídricos é um problema crescente em todo o mundo, especialmente em regiões áridas e semiáridas. No Brasil, a situação não se difere, e a gestão adequada dos recursos hídricos se torna cada vez mais urgente. O fator de perda de água potável é mais um agravante para o cenário hídrico do país, tais perdas podem ocorrer por diversas causas no processo de consumo e distribuição de água, como vazamentos ou medições incoerentes. Em 2019, foi estimado um índice de perda de faturamento do Brasil no valor de 40,58%, o que representa 25 pontos percentuais acima da média dos países desenvolvidos e 5 pontos acima da média dos países em desenvolvimento (OLIVEIRA PEDRO SCAZUFCA, 2021).

No contexto atual, a busca por soluções que permitam um maior controle do consumo hídrico ganha destaque, não apenas por questões de eficiência no uso da água, mas também por atender às exigências de regulamentações mais rígidas e à crescente demanda por sustentabilidade. A Lei nº 13.312/2016, sancionada em 12 de julho de 2016, tornou obrigatória a medição individualizada do consumo hídrico nas novas edificações condominiais (BRASIL, 2016). Essa medida tem como objetivo proporcionar um maior controle da utilização de recursos hídricos de cada consumidor, assim como uma cobrança justa para o valor consumido. Além disso, a medição individualizada auxilia na localização de possíveis vazamentos, reduzindo perdas e promovendo a preservação do meio ambiente (COMPESA, 2016).

O uso de sensores ultrassônicos para a medição do fluxo de fluidos já é amplamente consolidado na indústria, sendo uma ferramenta muito utilizada em diversas aplicações, desde processos industriais complexos até a medição de consumo em sistemas de abastecimento (MATA RICARDO A. T. PESSANHA, 2000). Este trabalho busca explorar a viabilidade técnica de sensores de vazão de água baseados em sinais de ultrassom, utilizando simulações desenvolvidas em linguagem Julia. A simulação se justifica pela flexibilidade e precisão oferecida no estudo das características e do comportamento do sensor em diferentes condições de operação, permitindo uma análise detalhada sem a necessidade de protótipos físicos nas etapas iniciais.

A relevância desse estudo também se amplifica quando consideramos os avanços tecnológicos na área de sensores e a crescente adoção da Internet das Coisas (IoT) em aplicações residenciais. Sensores de vazão de água ultrassônicos, quando integrados a sistemas inteligentes, podem fornecer dados em tempo real que são cruciais para o monitoramento e controle eficiente do uso da água, possibilitando não apenas a economia de recursos, mas também a detecção precoce de vazamentos e anomalias. Assim, o desenvolvimento e a simulação desses sensores se

inserem em uma tendência global de cidades inteligentes e gestão sustentável de recursos.

Embora existam diversos sensores de vazão disponíveis no mercado, a produção e o domínio técnico desse tipo de dispositivo ainda são desafios para muitas instituições acadêmicas. Dessa forma, este trabalho não apenas visa contribuir para o avanço técnico na área, mas também para a capacitação da universidade no desenvolvimento de tecnologias próprias, com potencial para a geração de patentes e amadurecimento no campo da instrumentação.

1.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos estão definidos:

1. Modelar o comportamento do sensor na linguagem Julia.
2. Aplicar o modelo em um ambiente simulado para validação dos conceitos
3. Aplicar métricas de avaliação ao modelo.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta sessão, serão apresentados alguns estudos, relacionados com o projeto proposto neste trabalho.

2.1 *High-precision time-of-flight determination algorithm for ultrasonic flow measurement*

Em (SUNOL; GARCIA, 2018) é apresentado um algoritmo para calcular de forma precisa o tempo de transito em medidores de fluxo com correlação cruzada. (SUNOL; GARCIA, 2018) aborda de forma matemática a relação de tempo de transito e com a distribuição dos transdutores no sistema de medição. O esquema proposto neste estudo é demonstrado como uma solução eficaz, superando as limitações do método médio em diversas condições. Ele permite obter medições confiáveis de fluxo próximo a zero, possibilitando uma ampla faixa dinâmica de operação. A análise da curva de erro revela que os erros relativos têm um valor absoluto inferior a 2% em todas as taxas de fluxo consideradas, que variam de 0,2 a $150 \text{ m}^3/\text{h}$. Esses resultados evidenciam a capacidade do algoritmo em fornecer medições altamente precisas.

2.2 *Research on Coupling Method of Flow Field and Acoustic Field Based on COMSOL for Ultrasonic Flowmeter*

Neste estudo, (ZHENG *et al.*, 2018) aborda o aprimoramento dos medidores de fluxo ultrassônicos não invasivos, que são amplamente utilizados na indústria para medir a velocidade de fluidos em movimento.

O objetivo central do trabalho foi investigar o impacto do campo de fluxo na precisão e confiabilidade dos medidores de fluxo ultrassônicos. Para isso, (ZHENG *et al.*, 2018) utilizou um software de simulação COMSOL Multiphysics para estabelecer um método de análise baseado na simulação computacional.

Os resultados do estudo mostraram que o campo de fluxo influencia significativamente o campo acústico, causando deslocamentos nas trajetórias de propagação das ondas ultrassônicas e alterações na distribuição da pressão sonora. A fim de compreender melhor esses efeitos, foram realizadas simulações numéricas considerando diferentes configurações de fonte sonora, cunha do transdutor e propriedades do fluido em movimento.

2.3 Numerical Simulation of Transit-time Ultrasonic Flowmeters in Deep-regulating Units

Em (SUN *et al.*, 2019), é feito um estudo onde foi abordado o desenvolvimento e aprimoramento dos medidores de fluxo ultrassônicos. (SUN *et al.*, 2019) focou em uma técnica não invasiva chamada medidor de tempo de trânsito, que utiliza transdutores ultrassônicos externos para medir o fluxo sem danificar o tubo ou interromper o processo.

Nesse estudo foi observado que a complexidade aumenta quando se utiliza a tecnologia não invasiva, devido às múltiplas interfaces sólido-sólido e sólido-fluido que o feixe ultrassônico precisa atravessar. Para melhorar a precisão e o desempenho do medidor, (SUN *et al.*, 2019) propôs um método de simulação numérica baseado na tecnologia de dinâmica dos fluidos computacional.

2.4 Clamp-On Measurements of Fluid Flow in Small-Diameter Metal Pipes Using Ultrasonic Guided Waves

Em (DIXON *et al.*, 2021), foi apresentado o problema da medição de fluxo, utilizando uma abordagem não invasiva e baseado em sinais de ultrassom em tubulações de metal com diâmetros inferiores a 30 Milímetros (mm). É dito que para tubulações com diâmetros inferiores a 30mm as ondas guiadas pela tubulação produzem sinais muito diferentes que os sinais produzidos em tubulações com maior diâmetro.

O objetivo principal do estudo é desenvolver e analisar uma técnica de medição de fluxo de fluidos em tubos de metal de pequeno diâmetro usando ondas ultrassônicas guiadas. O trabalho busca superar as limitações dos medidores de fluxo convencionais, que requerem cortes no tubo para instalar o medidor ou têm dificuldades de precisão em pequenos diâmetros.

2.5 Análise Comparativa

Nesta seção, será realizada uma análise comparativa dos estudos relacionados que possuem alguma relação com o tema proposto neste trabalho.

A Tabela 1 faz uma comparação entre os trabalhos relacionados e o projeto desenvolvido neste estudo. Verifica-se que a maioria dos estudos analisados utiliza simuladores para testar e validar seus modelos. No entanto, nem todos aplicam métodos não invasivos para a medição do fluxo, com (SUNOL; GARCIA, 2018) sendo uma exceção ao empregar um método invasivo.

Tabela 1 – Exemplo de tabela com informações sobre os trabalhos

Trabalho	Utiliza simulador	Utiliza o método não invasivo	Utiliza ferramentas de código livre
(ZHENG <i>et al.</i> , 2018)	Sim	Sim	Não
(SUNOL; GARCIA, 2018)	Não	Não	Sim
(SUN <i>et al.</i> , 2019)	Sim	Sim	Não
(DIXON <i>et al.</i> , 2021)	Não	Sim	Sim
Trabalho proposto	Sim	Sim	Sim

Fonte: Autor

No que se refere às ferramentas utilizadas, apenas dois dos trabalhos revisados, incluindo o presente estudo, adotaram softwares de código aberto, como a linguagem Julia. Já os estudos de (ZHENG *et al.*, 2018) e (SUN *et al.*, 2019) fazem uso de ferramentas proprietárias, como o COMSOL Multiphysics, o que pode representar uma limitação em termos de acessibilidade e reprodutibilidade dos resultados.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, serão abordados alguns dos conceitos fundamentais essenciais para compreender e avançar no projeto proposto neste trabalho, como mecânica dos fluidos, métodos numéricos, sensores, características de sinais de ultrassom e fluxômetros ultrassônico. Além de uma breve análise de alguns simuladores.

3.1 Mecânica dos fluidos

A mecânica dos fluido é uma área da física que estuda o comportamento e as propriedades de fluidos tanto em repouso quanto em movimento. Ela se concentra na análise e descrição dos fluidos, que podem ser líquidos ou gases, e abrange uma ampla gama de fenômenos, desde o escoamento de água em tubulações até a aerodinâmica de aeronaves (COIMBRA, 2015).

A Mecânica dos Fluidos envolve o estudo de conceitos fundamentais, como densidade, pressão, viscosidade, tensão superficial e velocidade do fluido. Ela também investiga as leis físicas que regem o comportamento dos fluidos, incluindo a conservação da massa, a conservação do momento linear e a conservação da energia (ÇENGEL; CIMBALA, 2014).

3.1.1 Fluidos

(COIMBRA, 2015) define fluido como uma substância que se deforma quando submetido a uma força tangencial. Fluidos compreendem as fase líquidas e gasosas da matéria, logo, se faz necessário uma definição para cada estado.

Fluidos líquidos são substâncias que possuem volume definido, ou seja, eles não podem ser comprimidos facilmente, fluem e se adaptam à forma do recipiente que os contém, mantendo uma superfície livre definida. Fluidos gasosos, por outro lado, não possuem volume ou forma definidos, eles podem ser comprimidos facilmente e se expandem para preencher completamente o recipiente que os contém.

3.1.2 Propriedades dos fluidos

As propriedades dos fluidos são elementos-chave para compreender o comportamento e as características dessas substâncias em diferentes contextos. Dentre as propriedades mais relevantes, destacam-se a densidade, compressibilidade, viscosidade e pressão.

3.1.2.1 Densidade

A densidade é um conceito fundamental que descreve a relação entre a massa e o volume de um corpo. Na física, utiliza-se o termo massa específica para representar essa relação, definida como a razão entre a massa e o volume ocupado por um objeto no espaço. Essa equação resulta em um valor que indica a quantidade de massa presente em uma unidade de volume (NETO, 2011).

$$\rho = \frac{m}{V} [kg/m^3] \quad (3.1)$$

Contudo a densidade não é uma característica imutável, variáveis como temperatura e pressão podem alterar a densidade de um objeto. Por se tratar de um valor que não é constante se torna necessário a utilização de um valor de referencia (COIMBRA, 2015).

$$d = \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad (3.2)$$

Onde ρ_{ref} é uma massa específica de referencia com valores conhecidos, como por exemplo a água em uma temperatura específica.

3.1.2.2 Compressibilidade

A compressibilidade de um fluido é definida pela variação da sua densidade em resposta a mudanças de pressão e temperatura. Fluidos incompressíveis são aqueles cuja densidade permanece constante ao longo do tempo e em qualquer ponto do fluido. Em outras palavras, a variação da densidade em função da pressão e da temperatura é desprezível.

3.1.2.3 Viscosidade

A viscosidade é a resistência interna de um fluido ao fluxo. A viscosidade de um fluido afeta diretamente sua capacidade de escoamento. Um fluido altamente viscoso oferece uma maior resistência às forças viscosas e, conseqüentemente, flui com maior dificuldade em comparação a um fluido de baixa viscosidade.

O coeficiente de viscosidade dinâmica μ é definido como a força necessária para movimentar uma unidade de fluido em uma unidade de distância. A relação entre viscosidade

e densidade é chamada de viscosidade cinemática (3.3), que permite comparar a facilidade de escoamento de diferentes fluidos (GOMES, 2011).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.3)$$

3.1.2.4 Pressão

Na mecânica dos fluidos, a pressão pode ser entendida como a distribuição de forças exercidas pelas moléculas do fluido em uma superfície. Quando uma força é aplicada a um fluido, suas moléculas transmitem essa força por meio de colisões e interações, resultando em uma pressão exercida sobre as superfícies adjacentes. (ÇENGEL; CIMBALA, 2014)

A pressão é uma grandeza escalar e sua unidade no Sistema Internacional (SI) é o pascal (Pa). Além disso, ela pode ser medida e expressa em outras unidades comuns, como atmosfera (atm) e milímetro de mercúrio (mmHg). (WHITE, 2011)

3.1.3 Equação de Navier-Stokes

A equação de Navier-Stokes é uma das principais equações na mecânica dos fluidos. A equação é expressa por um conjunto de equações diferenciais parciais que descrevem a dinâmica de um fluido com o passar do tempo (WHITE, 2011).

Para fluidos incompressíveis (Densidade constante ao longo do tempo e em qualquer ponto) e newtonianos (tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação angular), a equação de Navier-Stokes pode ser expressa da seguinte forma:

A condição de incompressibilidade é dada por:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.4)$$

E a equação de movimento é:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + F \quad (3.5)$$

Onde o termo ρ refere-se à densidade do fluido, e $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$ representa a variação temporal da velocidade, ou seja, a aceleração. Os termos após o sinal de igualdade representam as forças

do sistema, incluindo o gradiente de pressão $-\nabla p$, o termo de viscosidade $\mu \nabla^2 \vec{V}$, e forças adicionais ao sistema, como a gravidade, representada pela matriz de força F (STAM, 2003).

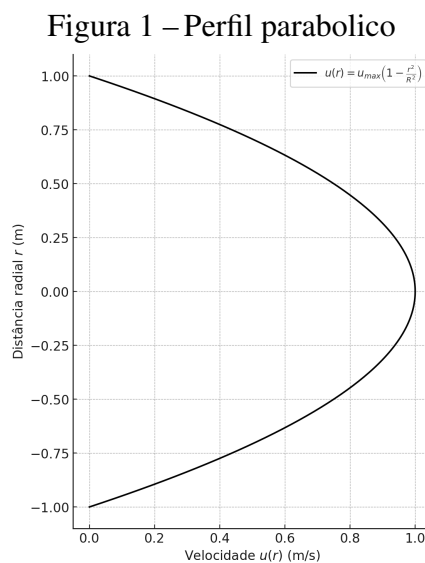
3.1.4 Perfil Laminar

O perfil de fluxo laminar é caracterizado por um escoamento ordenado, onde o fluido se desloca em camadas paralelas, sem mistura significativa entre elas. Esse tipo de fluxo ocorre tipicamente em baixas velocidades, quando a viscosidade se sobrepõe sobre as forças inerciais (WHITE, 2011).

Em um escoamento laminar dentro de um tubo cilíndrico, a velocidade do fluido é máxima no centro do tubo e diminui gradualmente até zero nas paredes, devido à condição de aderência, que impõe velocidade zero na superfície do tubo. O perfil de velocidade em um fluxo laminar possui formato parabolizado e pode ser descrito pela seguinte equação (WHITE, 2011):

$$u(r) = u_{max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (3.6)$$

onde $u(r)$ é a velocidade em uma distância radial r a partir do centro do tubo, u_{max} é a velocidade máxima no centro do tubo, e R é o raio interno do tubo. Este comportamento parabolizado é uma consequência direta da distribuição linear da tensão de cisalhamento ao longo do raio do tubo. A figura 1 mostra uma representação da equação 3.6.



Fonte: Autor

3.2 Sensores

Nesta seção, será abordado as definições e características de sensores. Uma base sólida em como sensores e transdutores funcionam é essencial para uma modelagem dos fenômenos elétricos que presentes em sensores de fluxo ultrassônicos.

3.2.1 Definição

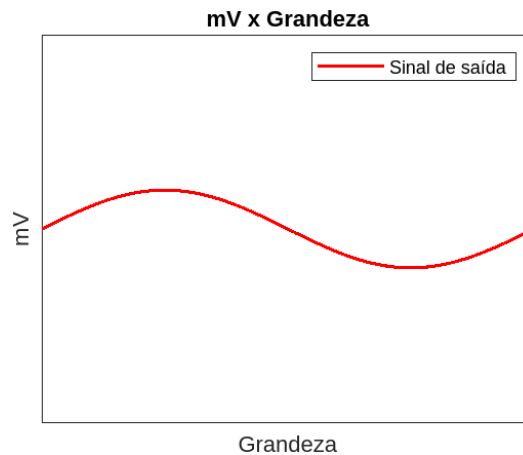
De acordo com (THOMAZINI, 2009) sensor é o termo que descreve dispositivos sensíveis a formas de energia do ambiente, relacionando as informações a alguma grandeza mensurável, como por exemplo, um sensor de temperatura que é sensível a energia térmica e a informação obtida através dele é uma medida de temperatura.

3.2.2 Tipos de resposta e condicionamento de sinais

Um sensor nem sempre é capaz de apresentar, em sua saída, um sinal com as características elétricas necessárias para realizar uma medida digital ou ser integrado a um sistema de controle. Na maioria das vezes, é necessário submetê-lo a um circuito condicionador, para que o sinal possa ser utilizado. Supondo um sensor, cuja saída possui um nível de tensão muito baixo, é necessário um circuito amplificador para atuar como uma interface e condicionar o sinal, permitindo que ele seja lido por um controlador (THOMAZINI, 2009).

Existem dois tipos de saídas básicas para sensores, analógicas e digitais (WENDING, 2010). A saída analógica pode assumir qualquer valor ao longo do tempo, desde que esteja na faixa de operação do sensor, ela possui saída contínua, que é quase uma replica da entrada, porém em uma grandeza elétrica, como mostra a Figura 2.

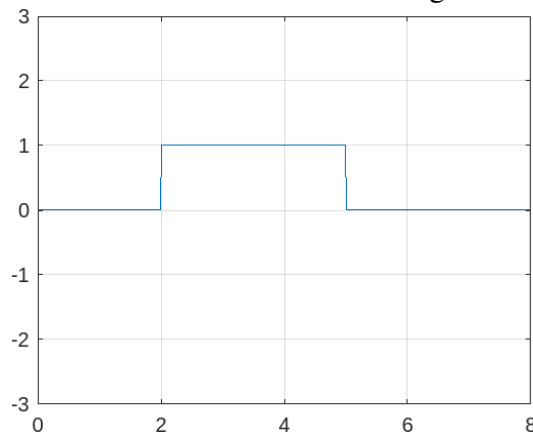
Figura 2 – Gráfico de saída de um sensor analógico.



Fonte: Autor.

Já sensores com saída digital possuem um nível de tensão definidos como alto e baixo, esses níveis são digitalmente representados como um sinal binário onde variam entre 0 e 1 como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Gráfico de saída de um sensor digital. Fonte: Autor

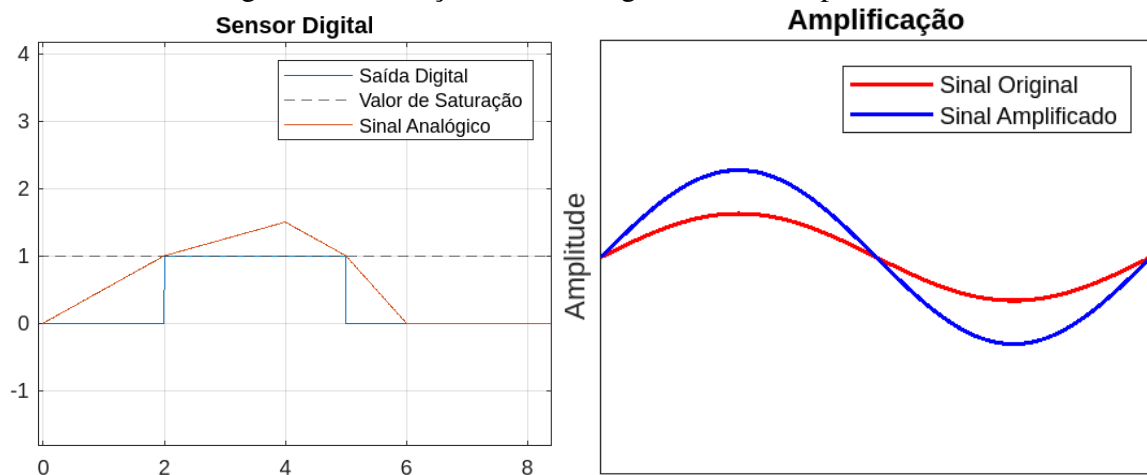


Fonte: Autor

As saídas digitais possuem em seu estágio final um circuito de saturação, que eleva a tensão até um valor determinado, quando a tensão do sinal original ultrapassa um determinado valor, como mostra a Figura 4. Esse tipo de sensor é muito utilizado para aplicações onde a resposta pode ser do tipo 'sim' ou 'não', como *encoders* ou sensores de presença.

Já sensores analógicos possuem em seu estágio final, um circuito de amplificação, para que seus níveis de tensão estejam em uma faixa de operação determinada pelo controlador, como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Saturação de saída digital e Sinal amplificado..



Fonte: Autor

3.2.3 Características de sensores

Em sua maioria os sensores apresentam diversas características, dentre elas, destacam-se os conceitos de sensibilidade, exatidão, precisão e linearidade.

3.2.3.1 Sensibilidade

A sensibilidade de um sensor é definida como a razão entre a entrada do sinal e a saída do sensor. A relação entre a variação de uma grandeza e a medição de um sensor está diretamente relacionada a sensibilidade do sensor. Assim um sensor que apresenta uma resposta diferente a menor variação do sinal de entrada é dito como sensível (THOMAZINI, 2009).

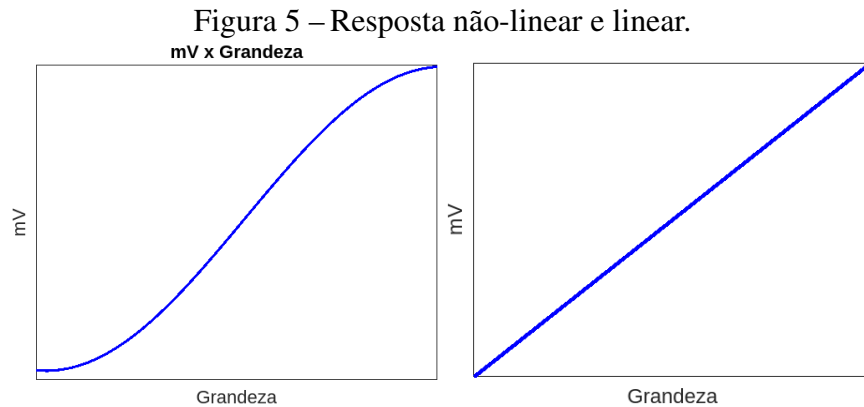
3.2.3.2 Exatidão e precisão

Ambos os termos aparentam ser semelhantes, porém a exatidão de um sensor corresponde a uma relação entre o erro medido pelo sensor e um medidor padrão. Já a precisão de um sensor é uma característica que está relacionada a taxa de repetibilidade dos valores medidos. Todo sensor apresenta um erro de medição, esse erro está diretamente ligado as condições do sensor e na qualidade da sua produção (SALES, 2016).

3.2.3.3 Linearidade

Esse conceito é aplicado basicamente em sensores analógicos, ela caracteriza uma relação linear entre a resposta de um sensor e a grandeza medida. Quanto mais próximo de uma

reta é dito que mais linear é o sensor (WENDLING, 2010).



Fonte: Autor.

A Figura 5 mostra dois gráficos de sensores com formas de resposta não-linear e linear respectivamente.

3.2.4 *Transdutores*

Transdutores são dispositivos de medição completos, que consistem em, um sensor responsável por converter a grandeza física em um sinal elétrico, quanto os circuitos de interface que condicionam esse sinal para torná-lo adequado para um sistema de controle ou medição (THOMAZINI, 2009).

Por se tratar de um dispositivo completo, que apresenta em sua composição um sensor, possuem as mesmas características definidas para sensores, como sensibilidade, linearidade, exatidão e precisão.

3.2.5 *Sensores não invasivos*

Sensores ditos não invasivos possuem a mesma função de sensores convencionais, que é, transformar uma grandeza física em uma grandeza elétrica. O que caracteriza esse tipo de sensor é a forma com a qual ele é instalado no sistema (DAROLD *et al.*, 2020). Sensores não invasivos são instalados de forma que a estrutura original do sistema não precise ser modificada, dessa forma facilitando a instalação do sistema de medição.

Esse tipo de sensor é amplamente utilizados em áreas sensíveis, como a medicina e a biologia, onde a preservação da integridade do objeto ou organismo é essencial. Além de ser bastante utilizado na indústria. (DAROLD *et al.*, 2020)

Embora os sensores não invasivos apresentem vantagens significativas em termos de tempo e praticidade de instalação, é importante mencionar algumas de suas desvantagens. Pelo fato de serem instalados do lado de "fora" do sistema, esses sensores estão mais suscetíveis a interferências externas, o que pode afetar a precisão e a confiabilidade das medições. Além disso, devido à natureza não invasiva, esses sensores requerem uma lógica mais complexa para realizar a transformação das grandezas medidas em sinais elétricos utilizáveis. Podendo assim demandar cada vez mais rotinas de processamento mais complexas, aumentando a complexidade do projeto.

3.3 Características de sinais ultrassônicos

Nesta seção, será abordado as principais características dos sinais ultrassônicos e sua relevância na medição de fluxo. Das características presente em sinais ultrassônicos, será explorado aspectos como frequência e comprimento de onda.

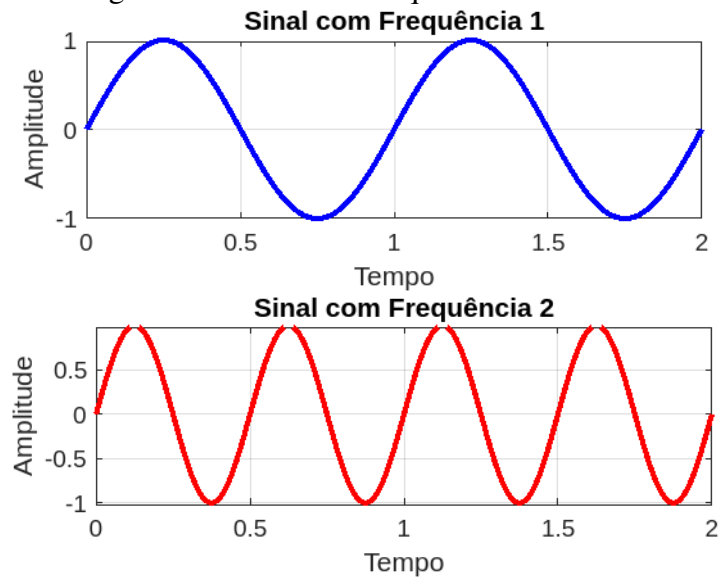
3.3.1 Frequência

A frequência de um sinal é definida como o número de oscilações periódicas em um determinado espaço de tempo. A unidade de medida padrão para frequência é o Hertz (Hz), que é definido como o número de oscilações em um segundo. Sinais do tipo periódicos, como sinais senoidais, apresentam em sua representação matemática um coeficiente de frequência (OPPENHEIM; WILLSKY, 1997). A equação 3.7 apresenta forma de um sinal senoidal.

$$A \sin(\omega t + \phi) \quad (3.7)$$

Onde A é a amplitude do sinal, ω é a frequência e ϕ é a fase angular do sinal. A Figura 6 exemplifica dois sinais do tipo senoidal, porém com frequências diferentes. Sinais ultrassônicos recebem esse nome por operarem em uma faixa de frequência acima da faixa audível pelo ser humano, que é acima de 20kHz.

Figura 6 – Sinais com frequências diferentes



Fonte: Autor

3.3.2 Comprimento de onda

O comprimento de onda é definido como a distância entre os pontos correspondentes em um ciclo completo da onda de um sinal (BRAGA, [s.d.]). O comprimento de onda dos sinais está diretamente relacionado à sua frequência. Quanto maior a frequência do sinal, menor será o comprimento de onda e vice-versa.

3.4 Fluxômetros ultrassônico

O termo "Fluxômetro" é empregado para dispositivos que tem como função medir algum fluxo. Fluxômetros ultrassônicos recebem esse nome por utilizarem sinais de ultrassom para realizar tal medição.

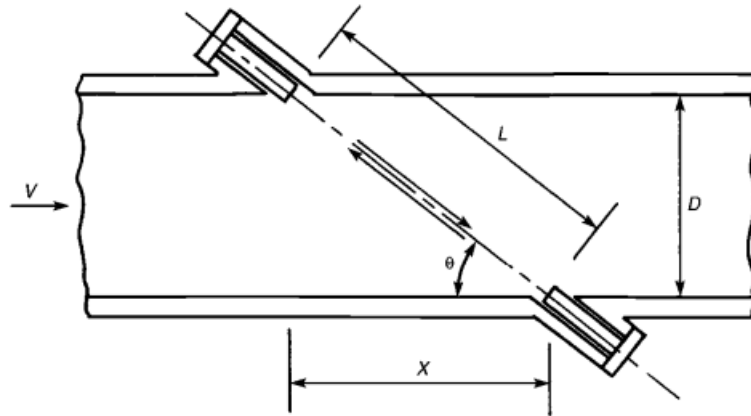
Nessa seção, será abordado as características dos dois principais métodos para medição de fluxo utilizando sinais ultrassônicos, que são por tempo de transito e por efeito Doppler.

3.4.1 Tempo de transito

O método de tempo de transito utiliza da diferença de tempo em que uma onda sai do emissor ultrassônico até o receptor. O tempo de emissão da onda é calculado e logo em seguida comparado ao tempo em que a onda leva para chegar ao emissor no sentido oposto ao fluxo do fluido. A velocidade do fluido afeta o tempo de trânsito da onda. Logo ao conhecer a

velocidade de propagação do ultrassom no meio, é possível determinar a velocidade do fluxo do fluido com base no tempo de trânsito medido (BAKER, 2000). A Figura 7 apresenta uma arquitetura comum para o método de tempo de transito.

Figura 7 – Disposição padrão de transdutores para o método de tempo de transito.



Fonte: (BAKER, 2000)

A Figura 7 exemplifica a aplicação do método. É possível observar dois transdutores que estão dispostos na tubulação e com uma angulação igual a θ . Além disso é possível observar que por conta da angulação uma onda irá se propagar no sentido do fluxo V enquanto a outra e se propagará no sentido oposto. Utilizando esse método pode-se inferir a velocidade do fluido.

3.5 Simuladores

Nessa seção, será abordado as características de três dos diversos simuladores disponíveis, sendo eles o k-Wave, COMSOL e Ansys.

3.5.1 k-Wave

O k-Wave é uma *toolbox* de código aberto disponível para MATLAB e C++. Foi projetado para simular a propagação de ondas acústicas no domínio do tempo em até três dimensões (TREEBY, 2010).

O k-Wave conta com um modelo numérico avançado que leva em consideração tanto a propagação linear quanto a não linear das ondas acústicas. O modelo numérico é baseado em três equações diferenciais de primeira ordem, tais equações são resolvidas utilizando um método pseudoespectral de espaço k (TREEBY, 2010).

3.5.2 *COMSOL Multiphysics Simulation Software*

O COMSOL é um software proprietário desenvolvido para realizar a simulações de modelos físicos. É utilizado por profissionais em diversas áreas da engenharia. Ele fornece uma plataforma poderosa para a modelagem e simulação de designs, dispositivos e processos, permitindo a análise e otimização de sistemas complexos (COMSOL, Inc., 2023).

O COMSOL é amplamente utilizado para dimensionar e simular dispositivos piezoelétricos que são um dos principais componentes em transdutores ultrassônicos (COMSOL, Inc., 2023).

3.5.3 *Ansys*

A Ansys é um software proprietário, é uma referencia mundial em software para simulações e análises na engenharia. A Ansys disponibiliza uma ampla variedade de produtos, cada um focado em uma área específica da engenharia e fornecendo recursos especializados (Ansys, 2023).

Alguns dos produtos populares da Ansys incluem o *Ansys Mechanical* que é capaz de simular o comportamento acústico em sólidos e estruturas, permitindo a análise de ondas ultrassônicas e a interação com materiais. Além disso, o *Ansys Fluent* pode ser usado para simulações de fluidos acústicos, permitindo a modelagem e análise do comportamento das ondas sonoras em meios líquidos ou gasosos (Ansys, 2023).

3.6 *Julia*

A linguagem Julia é uma linguagem de programação de alto desempenho e dinâmica, projetada para resolver problemas complexos e realizar cálculos científicos. Ela foi desenvolvida com o objetivo de combinar a facilidade de uso de linguagens de alto nível, como Python e MATLAB, com o desempenho de linguagens de baixo nível, como C (Julia Language, 2023b).

3.6.1 *Benchmarks*

A Figura 8 mostra um gráfico de testes de desempenho do compilador em uma serie de códigos comuns, como análise de strings, chamadas de funções, geração de números aleatórios, recursão e operação de vetores (Julia Language, 2023a)..

Na Figura 8, o eixo vertical representa cada tempo de benchmark, normalizado em relação à implementação em C. Os dados do benchmark acima foram calculados utilizando as seguintes versões: Julia v1.0.0, SciLua v1.0.0-b12, Rust 1.27.0, Go 1.9, Java 1.8.0_17, Javascript V8 6.2.414.54, Matlab R2018a, Anaconda Python 3.6.3, R 3.5.0 e Octave 4.2.2. Os códigos em C e Fortran foram compilados com o gcc 7.3.1, e foi escolhido o melhor tempo de execução entre todos os níveis de otimização (-O0 até -O3) (Julia Language, 2023a).

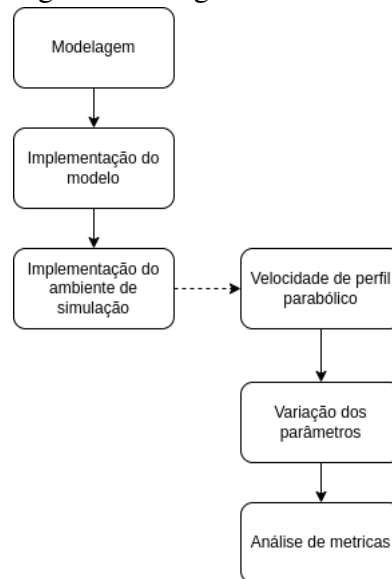


Fonte: (Julia Language, 2023a)

4 METODOLOGIA

Nesta seção serão abordados os procedimentos metodológicos necessários para alcançar os objetivos propostos neste trabalho. A estrutura foi definida em etapas que abrangem a modelagem do sensor, a implementação computacional e a simulação das condições de operação, conforme o diagrama de blocos apresentado pela Figura 9.

Figura 9 – Diagrama de blocos



Fonte: Autor

4.1 Modelagem do sensor

Neste estágio, o sensor de ultrassom será modelado. A modelagem incluirá, a modelagem matemática do funcionamento sensor e a discretização do sensor em Julia.

4.1.1 *Formulação Matemática*

A ideia principal do sensor de fluxo é utilizar o tempo de trânsito de uma onda ultrassônica para calcular a diferença de tempo que o som leva para percorrer uma distância L com uma angulação α .

A propagação do som em um fluido é afetada pelo fluxo do próprio fluido. Considerando que o tempo é definido pela razão entre a distância e a velocidade, o tempo de subida e descida do som pode ser descrito pela Equação 4.1:

$$t_{ud} = \frac{L}{c \pm v} \quad (4.1)$$

onde t_{ud} representa o tempo de subida ou descida do som, L é a distância entre os transdutores, c é a velocidade do som no fluido, e v é a velocidade do fluido.

Para considerar a projeção da onda em um ângulo α , a influência do fluxo na propagação da onda é ajustada, resultando na Equação 4.2. Nesta equação, α é o ângulo formado entre a direção do fluxo e a reta que conecta os transdutores.

$$t_{ud} = \frac{L}{c \pm v \cos \alpha} \quad (4.2)$$

Definidos os tempos de subida e descida, é possível calcular a diferença de tempo, descrita pela Equação 4.3.

$$\Delta t = t_u - t_d = \frac{L}{c - v \cos \alpha} - \frac{L}{c + v \cos \alpha} \quad (4.3)$$

Resolvendo a equação, obtém-se a Equação 4.4.

$$\Delta t = \frac{2Lv \cos \alpha t_u t_d}{L^2} \quad (4.4)$$

Finalmente, resolvendo a Equação 4.4 em função da velocidade, obtém-se a Equação 4.5.

$$v = \frac{L \Delta t}{2 \cos \alpha t_u t_d} \quad (4.5)$$

O desenvolvimento das equações formam uma base matemática que explica como o fluxo do fluido influencia a propagação das ondas ultrassônicas e, consequentemente, como o sensor de ultrassom pode ser utilizado para medir a velocidade do fluido.

4.1.2 Implementação Computacional do Modelo em Julia

A implementação do modelo foi dividida em duas etapas principais, sendo elas, o modelo de interferência do fluxo na velocidade de propagação do som, descrito pela equação 4.2

e o modelo de inferência do fluxo, baseado nos tempos de subida e descida da onda, definido pela equação 4.5.

4.2 Implementação do ambiente de simulação

No ambiente de simulação desenvolvido em Julia, foi implementado um modelo para simular o comportamento do escoamento laminar, permitindo a análise do perfil de velocidade parabólico. Esse tipo de escoamento é característico em fluidos com baixa taxa de turbulência, onde o movimento das partículas de fluido ocorre de maneira ordenada, formando camadas paralelas. O objetivo desta implementação é analisar o comportamento da velocidade ao longo da seção transversal de um tubo e como a medição da velocidade do fluido pode ser realizada usando um modelo de medidor ultrassônico.

4.2.1 Simulação de Perfil Parabólico

O perfil de escoamento laminar segue um comportamento parabólico, com a velocidade máxima do fluido ocorrendo no centro do tubo e diminuindo até zero nas paredes, onde ocorrem as forças de atrito. Este perfil foi modelado resolvendo numericamente as equações de Navier-Stokes para um fluxo impulsionado por um gradiente de pressão constante, conforme mostra o código 1.

Para essa simulação, foi utilizado um método de diferenças finitas aplicado sobre uma malha 2D, que representa a seção transversal do tubo. A malha foi discretizada em $N \times N$ pontos, permitindo a definição de um campo de velocidades ao longo do tubo. Cada ponto na malha representa a velocidade do fluido naquele local específico. As fronteiras foram modeladas com condições de não deslizamento (velocidade zero nas paredes do tubo), resultando em um gradiente de velocidades parabólico ao longo da seção transversal. A equação que descreve o perfil de velocidade é dada por 3.6.

4.2.2 Cálculo do tempo de trânsito

Após definir o campo de velocidades, o próximo passo na simulação foi calcular o tempo de trânsito da onda ultrassônica ao longo de um caminho diagonal de 45 graus na malha de pontos, representando o percurso de um feixe de som através do fluido. As velocidades do fluido ao longo desse trajeto foram extraídas, considerando o ângulo de 45 graus entre o trajeto do feixe

e o fluxo do fluido. O tempo de trânsito da onda, descrito pela equação 4.4, foi implementado em Julia conforme mostrado no código 3.

Como as velocidades relevantes foram extraídas ao longo do caminho percorrido pelo feixe, a equação 4.4 foi adaptada para que cada velocidade afetasse individualmente a propagação da onda. Dessa forma, foi possível obter o somatório dos tempos em cada ponto do trajeto, conforme descrito pela equação 4.6.

$$\sum_{i=1}^N t_{ud}(i) = \frac{\Delta x}{c_{som} \pm v(i)\cos(45)} \quad (4.6)$$

Onde Δx representa o tamanho do elemento na malha de simulação e $v(i)$ representa as velocidades extraídas do campo de velocidades.

4.2.3 Aplicação do modelo

Após a aquisição dos tempos de subida e descida da onda, a diferença de tempo foi calculada e aplicada ao modelo descrito pela equação 4.5, desenvolvido em Julia conforma descrito no código 4.

4.3 Aplicação de ruído

Para tornar a simulação mais realista, foi aplicado ruído branco à saída das operações do modelo. O ruído branco simula variações aleatórias que podem ocorrer em sistemas reais, permitindo testar o modelo sob condições menos ideais.

A implementação do ruído foi realizada em Julia, utilizando uma função que adiciona um valor aleatório, baseado em uma distribuição normal, ao valor original. A função foi desenvolvida conforme mostrado no código 5, e um exemplo de aplicação é apresentado no código 6.

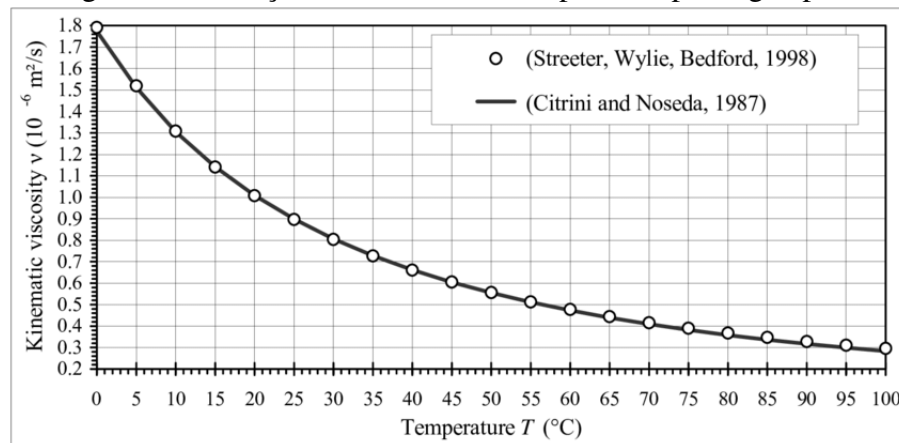
4.4 Variação de parâmetros

Nesta seção, será descrito a variação de parâmetros executados para a realização dos ensaios de teste do sensor, os parâmetros variados foram, viscosidade cinemática e gradiente de pressão.

4.4.1 Viscosidade cinemática

A viscosidade cinemática do fluido foi variada com base na temperatura da água, conforme a relação apresentada na Figura 10. A viscosidade afeta diretamente a taxa de dissipação da energia do fluido, influenciando a velocidade do escoamento. Ao simular diferentes viscosidades, é possível verificar como a temperatura do fluido altera o perfil de velocidade e, consequentemente, a medição realizada pelo modelo do sensor.

Figura 10 – Relação viscosidade vs temperatura para água pura



Fonte: (ORSI; SANFILIPPO, 2015)

Para simular a influência da viscosidade, foram consideradas temperaturas variando de 5°C a 100°C, com as respectivas viscosidades representadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Tabela de temperaturas e viscosidades correspondentes

Temperatura	Viscosidade
5	1.5×10^{-6}
25	0.9×10^{-6}
55	0.5×10^{-6}
75	0.4×10^{-6}
100	0.3×10^{-6}

Fonte: Autor

4.4.2 Gradiente de pressão

Devido ao gradiente de pressão ser constante na simulação proposta, o seu valor foi ajustado para simular diferentes velocidades de fluxo no sistema. Variar o gradiente de pressão permite representar cenários com fluxo rápido e lento, alterando diretamente a velocidade do

escoamento do fluido. Um gradiente de pressão maior gera um fluxo mais rápido, enquanto um gradiente menor resulta em um fluxo mais lento.

4.5 Análise de Métricas

Nesta seção, são descritas as métricas utilizadas para avaliar o desempenho do modelo de simulação. As métricas de precisão, sensibilidade e linearidade foram escolhidas para fornecer uma visão abrangente da eficácia do sensor ultrassônico em diferentes condições de operação.

4.5.1 Precisão

A precisão do modelo foi avaliada medindo-se o grau de proximidade entre os valores simulados e os valores esperados. A métrica de erro médio absoluto (MAE) foi utilizada para quantificar essa precisão, conforme a Equação 4.7:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |v_i - \hat{v}_i| \quad (4.7)$$

Onde v_i representa os valores reais e \hat{v}_i os valores medidos pelo modelo, como mostra o código 7.

4.5.2 Sensibilidade

A sensibilidade do modelo foi avaliada observando-se como pequenas variações nos parâmetros de entrada, como a velocidade do fluido (v) afeta os resultados, como mostra a equação 4.8.

$$S_v = \frac{\Delta \hat{v}}{\Delta v} \quad (4.8)$$

Para a solução numérica dessa equação foi utilizado o método das diferenças finitas, conforme a equação 4.9.

$$S_v \approx \frac{\hat{v}(i) - \hat{v}(i-1)}{v(i) - v(i-1)} \quad (4.9)$$

Dessa forma é feita uma aproximação da sensibilidade baseado em uma variação de Δv .

4.5.3 Linearidade

A linearidade do modelo foi avaliada verificando-se a relação entre o fluxo de entrada e a diferença de tempo (Δt) medida pelo sensor. O objetivo é determinar o quão próximo o modelo segue uma relação proporcional entre o fluxo de entrada e o tempo medido, caracterizando um comportamento linear.

Para isso, foi realizado um ajuste de regressão linear simples, conforme a equação 4.10:

$$\Delta t = a \cdot v + b \quad (4.10)$$

onde v representa a velocidade do fluido, a é o coeficiente angular (inclinação) e b é o intercepto. Um valor de R^2 (coeficiente de determinação) foi calculado para quantificar o quão bem o modelo se ajusta a uma linha reta, conforme a equação 4.11:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.11)$$

Onde y_i são valores reais de Δt , \hat{y}_i são os valores preditos pela regressão e \bar{y} é a média dos valores reais. Como mostra os códigos 8 e 9.

5 RESULTADOS

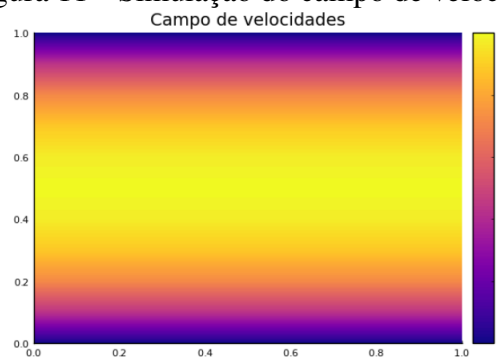
5.1 Simulação de perfil parabólico

Nesta seção, serão apresentados os resultados da simulação do escoamento laminar de um fluido, que segue o perfil de velocidade parabólico esperado em um tubo. A simulação foi conduzida com base nas equações de Navier-Stokes, e o comportamento do fluido foi avaliado observando a variação do campo de velocidades ao longo da seção transversal do tubo.

5.1.1 *Campo de velocidades*

O campo de velocidades ilustra como as velocidades se distribuem ao longo da seção transversal do tubo. Como esperado em escoamentos laminares, a velocidade do fluido atinge seu valor máximo no centro do tubo, diminuindo gradualmente até chegar a zero nas paredes. A Figura 11, oferece uma visão clara dessa distribuição, mostrando como o gradiente de velocidades gera um perfil típico, destacando o comportamento parabólico característico do escoamento.

Figura 11 – Simulação do campo de velocidades

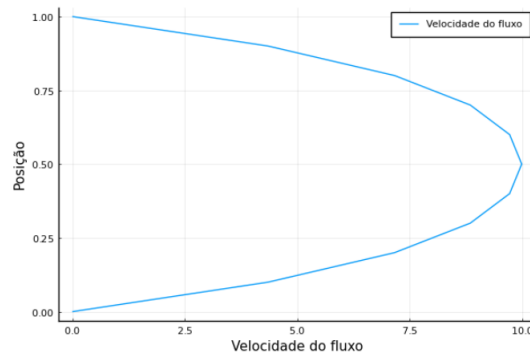


Fonte: Autor

5.1.2 *Perfil de velocidade*

O perfil de velocidade do escoamento foi obtido a partir do campo de velocidades, evidenciando a variação da velocidade ao longo de uma linha central da seção transversal. Esse perfil segue o padrão típico de escoamentos laminares, onde a velocidade máxima ocorre no centro do tubo. A Figura 12 mostra o gráfico do perfil de velocidade, comprovando que a simulação está de acordo com o comportamento teórico apresentado na equação 3.6.

Figura 12 – Simulação do campo de velocidades



Fonte: Autor

5.2 Variação de parâmetros

Nesta seção, são apresentados os resultados da simulação, focando nas variações dos principais parâmetros, como a viscosidade do fluido e o gradiente de pressão.

5.2.1 Variação de viscosidade

A viscosidade do fluido foi variada para simular diferentes condições térmicas, baseadas na relação entre temperatura e viscosidade apresentada na Figura 10 e na Tabela 2.

Tabela 3 – Velocidades em diferentes temperaturas

Temperatura	Viscosidade	Velocidade Média
5°C	1.5×10^{-6}	5.7259
25°C	0.9×10^{-6}	5.7266
55°C	0.5×10^{-6}	5.7269
75°C	0.4×10^{-6}	5.7269
100°C	0.3×10^{-6}	5.7270

Fonte: Autor

Conforme apresentado na Tabela 4, a variação da viscosidade não ocasionou mudanças significativas no valor médio do campo de velocidades. Apesar da água apresentar variações em sua viscosidade com a mudança de temperatura, os valores de velocidade média simulados permaneceram praticamente constante, em torno de 5.72 em todas as faixas de temperatura estudadas. Esse comportamento sugere que, no intervalo de temperaturas testado, o efeito da viscosidade na dissipação de energia do fluido foi muito pequeno para causar alterações relevantes no padrão de escoamento laminar. Esse resultado está de acordo com o esperado, já que a água, em condições normais, tem uma variação de viscosidade relativamente pequena

em função da temperatura, o que não impacta de maneira relevante o perfil de velocidade do escoamento.

5.2.2 *Variação de gradiente de pressão*

A Tabela 4 apresenta os resultados relacionados à variação do gradiente de pressão no sistema. Em comparação com a variação da viscosidade, cujos efeitos foram menos expressivos, a modificação do gradiente de pressão teve um impacto direto e significativo sobre as velocidades média e máxima do fluido.

Tabela 4 – Variação do gradiente de pressão

Gradiente de pressão	Velocidade Média	Velocidade Máxima
-0.3	5.72	7.00
-0,5	8.99	11.00
-1	17.18	21.00
-1.5	25.36	30.99
-2	33.54	41.00

Fonte: Autor

5.3 **Modelo do sensor**

Nesta seção, são apresentados os resultados do modelo do sensor ultrassônico, incluindo sua integração à simulação e as análises de desempenho em termos de precisão, sensibilidade e linearidade.

5.3.1 *Integração do modelo à simulação*

A Tabela 5 exibe os resultados referentes à aplicação do modelo do sensor em diferentes velocidades.

Tabela 5 – Aplicação do modelo do sensor

Velocidade Média	Velocidade Medida
5.72	5.11
8.99	8.09
17.18	15.53
25.36	22.97
33.54	30.40

Fonte: Autor

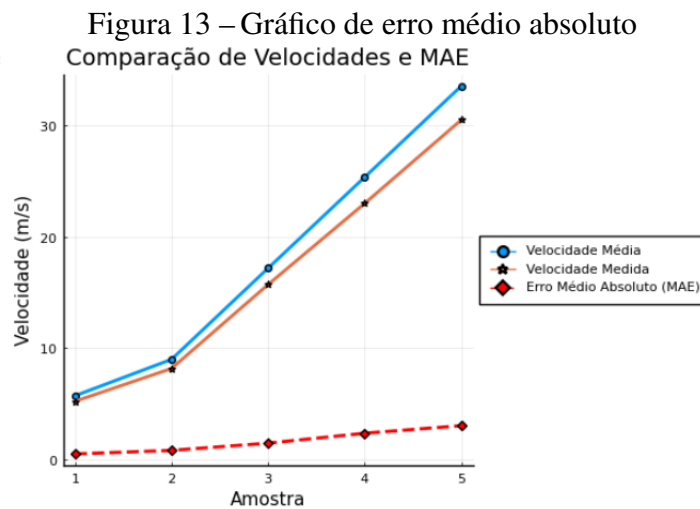
Nesse experimento, foi utilizado as velocidades médias dos campos de velocidade e foi feito com um comparativo com o valor de saída do sensor, é possível ver que a medida que a velocidade média aumenta, o sensor tende a perder precisão.

5.3.2 Análise de Métricas

Nesta seção, são apresentados os resultados referentes à análise de métricas, para avaliar o desempenho do modelo simulado.

5.3.2.1 Precisão

A Figura 13, apresenta a comparação entre a velocidade medida pelo sensor, a velocidade média do campo simulado e o erro médio absoluto (MAE), utilizado para avaliar a precisão do modelo. O gráfico mostra como o erro se comporta à medida que a velocidade média aumenta.



Fonte: Autor

Observa-se um padrão na Figura 13, indicando que conforme a velocidade média aumenta, o erro médio absoluto também cresce. Esse comportamento reflete uma tendência do sensor de perder precisão em velocidades mais altas. A Tabela 6 detalha as informações do gráfico, listando as velocidades médias, medidas, e o erro médio absoluto para cada amostra.

Tabela 6 – Aplicação do modelo do sensor

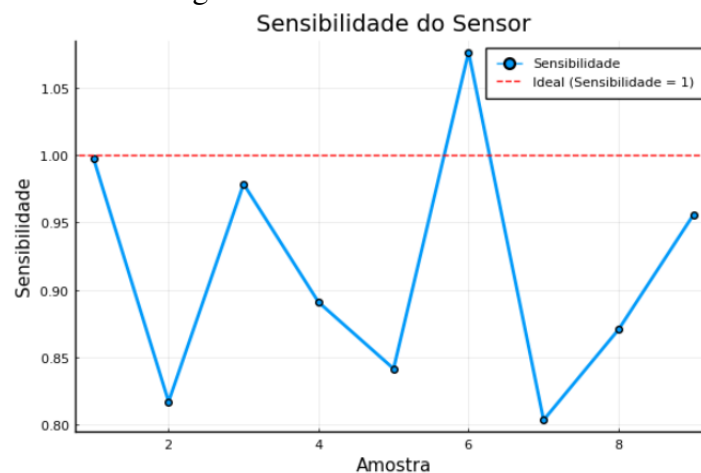
Amostra	Velocidade Média	Velocidade Medida	MAE
1	5.72	5.11	0.606
2	8.99	8.09	0.904
3	17.18	15.53	1.64
4	25.36	22.97	2.39
5	33.54	30.40	3.13

Fonte: Autor

5.3.2.2 Sensibilidade

A Figura 14 apresenta as curvas de sensibilidade do modelo para diferentes amostras. A sensibilidade é calculada como a razão entre a variação da velocidade medida pelo sensor e a variação da velocidade média do campo simulado.

Figura 14 – Gráfico de sensibilidade



Fonte: Autor

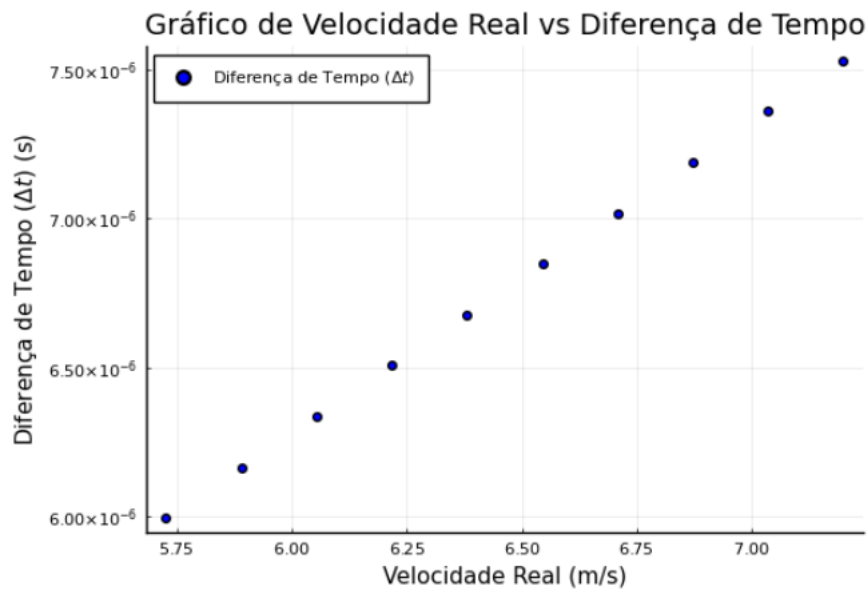
É possível notar uma variação considerável entre os valores de sensibilidade de cada amostra. Isso indica que o sensor não responde de maneira totalmente consistente às mudanças no fluxo, com algumas amostras subestimando ou superestimando as variações de velocidade. O ideal seria que a sensibilidade permanecesse próxima de 1, o que representaria uma resposta proporcional às variações no fluxo.

5.3.2.3 Linearidade

A Figura 15 mostra a relação entre a diferença de tempo medida pelo modelo do sensor e a velocidade de entrada. A visualização do gráfico permite observar uma tendência linear clara entre esses valores, indicando que o modelo responde de maneira proporcional à

variação da velocidade.

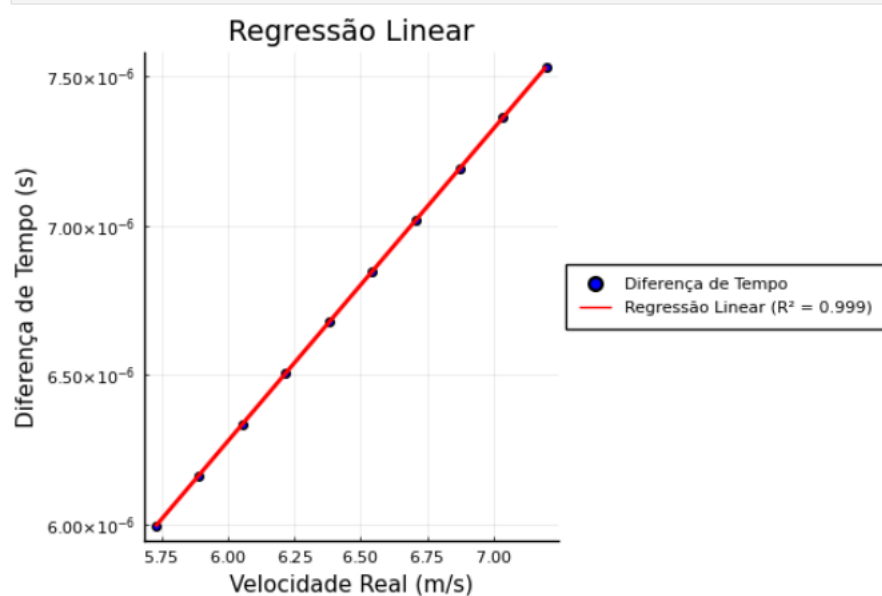
Figura 15 – Delta T x Velocidade



Fonte: Autor

A Figura 16 utiliza uma regressão linear para confirmar as características de linearidade. No gráfico, é possível observar que o valor de R^2 é muito próximo de 1, o que significa que o modelo apresenta uma característica fortemente linear entre a velocidade de entrada e a diferença de tempo medida na saída.

Figura 16 – Gráfico de Regressão



Fonte: Autor

6 CONCLUSÃO

Em resumo, este trabalho trouxe a simulação de um sensor ultrassônico a um escoamento laminar. Foram utilizadas equações de Navier-Stokes, com o perfil de velocidades parabólico. Verificou-se que, na simulação, a velocidade máxima estava no centro e diminuía até o zero nas paredes, conforme esperado. No entanto, a variação de viscosidade do fluido parecia não impactar significativamente as velocidades simuladas, pelo menos nas condições testadas. Já a variação do gradiente de pressão apresentou resultados interessantes, com um aumento bem considerável da velocidade à medida que o gradiente de pressão era intensificado.

A análise do modelo do sensor mostrou que ele perde precisão em velocidades mais altas, com o erro médio absoluto (MAE) crescendo à medida que a velocidade aumenta. A sensibilidade do modelo também variou significativamente, sugerindo que o sensor não responde de forma totalmente consistente às variações de fluxo.

A análise de linearidade, realizada com regressão linear, revelou uma forte correlação entre a velocidade de entrada e a diferença de tempo medida, sugerindo que o modelo responde de forma previsível dentro de certas condições. Entretanto, é importante destacar que o ruído foi aplicado à velocidade medida, e não ao tempo de trânsito. Essa escolha pode ter influenciado o resultado da análise de linearidade, tornando-o mais idealizado.

Como trabalhos futuros, sugere-se integrar diretamente o modelo do sensor à simulação do escoamento, permitindo que ele responda em tempo real às variações do fluxo. Essa abordagem poderia melhorar a precisão e a reatividade do modelo em condições dinâmicas. Também seria relevante explorar escoamentos turbulentos e simular diferentes tipos de fluidos. Outra linha de pesquisa seria investigar o impacto da aplicação do ruído diretamente ao tempo de trânsito.

REFERÊNCIAS

- Ansys. **POWERING INNOVATION THAT DRIVES HUMAN ADVANCEMENT**. 2023. ansys.com. Acessado em: 15 de outubro de 2023.
- BAKER, R. C. **Flow Measurement Handbook**. 1th. ed. [S. l.]: The press syndicate of the university of cambridge, 2000.
- BRAGA, N. C. **Comprimento de onda**. [s.d.]. Disponível em: < <https://www.newtoncbraga.com.br/category/ingredient/1070>. > Acesso em: 17 Jun. de 2023.
- BRASIL. Altera a lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, para tornar obrigatória a medição individualizada do consumo hídrico nas novas edificações condominiais. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2016.
- COIMBRA, A. L. **Mecânica dos fluidos**. [S. l.]: E-papers, 2015. v. 1.
- COMPESA. **Medição individualizada de água traz vantagens para consumidor**. 2016. <https://servicos.compesa.com.br/medicacao-individualizada-de-agua-traz-vantagens-para-consumidor/#:~:text=O%20sistema%20de%20medi%C3%A7%C3%A3o%20individualizada,30%25%20da%20conta%20de%20%C3%A1gua>. Acessado em: 12 de abril de 2024.
- COMSOL, Inc. **COMSOL Modeling Software**. 2023. <https://www.comsol.com>. Acessado em: 15 de outubro de 2023.
- DAROLD, M. W.; ALMEIDA, F. V. d.; BERTOLINO, H. O.; EVALD, P. J. D. d. O. Sensores invasivos e não invasivos: conceitos e aplicações biomédicas. **Disciplinarum Scientia. Série: Naturais e Tecnológicas**, 2020.
- DIXON, S.; LI, Z.; BAKER, M.; BUSHI, X.; SMITH, L. Clamp-on measurements of fluid flow in small-diameter metal pipes using ultrasonic guided waves. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 70, 2021.
- GOMES, M. H. R. **Apostila de Mecânica dos Fluidos**. 2011. Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Julia Language. **Julia Benchmarks**. 2023. Disponível em: <<https://julialang.org/benchmarks/>> Acesso em: 07 Jul. de 2023.
- Julia Language. **Julia Language Documentation – v1**. 2023. Disponível em: <<https://docs.julialang.org/en/v1/>> Acesso em: 07 Jul. de 2023.
- MATA RICARDO A. T. PESSANHA, R. G. G. M. H. P. F. Josaphat Dias da. Applications of ultrasonic flow meters in the petroleum industry. Salvador, Bahia, Brazil, 2000.
- NETO, C. B. **Mecânica dos fluidos**. [S. l.]: Instituto Federal Santa Catarina, 2011. v. 1.
- OLIVEIRA PEDRO SCAZUFCA, P. L. S. R. P. O. G. Perdas de Água 2021 (snis 2019): Desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento básico. **Trata Brasil**, 2021.
- OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. **Signals and Systems**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.

ORSI, E.; SANFILIPPO, U. Uncertainty in experimental evaluation of chezy- strickler-manning and colebrook-white roughness coefficients in circular pipes. 2015.

SALES, A. L. C. **Desempenho De Sensores**. 2016. Disponível em: < <http://www2.decom.ufop.br/imobilis/desempenho-de-sensores-parte-1/>. > Acesso em: 30 Maio. de 2023.

STAM, J. Real-time fluid dynamics for games. 2003.

SUN, M.; WANG, T.; XIAO, S.; PAN, C.; LIANG, X.; GAO, K.; ZHENG, W. Numerical simulation of transit-time ultrasonic flowmeters in deep-regulating units. In: **2019 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 389–392.

SUNOL, D. A. O. F.; GARCIA, J. E. High-precision time-of-flight determination algorithm for ultrasonic flow measurement. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2018.

THOMAZINI, P. U. B. d. A. D. **Sensores Industriais Fundamentos e Aplicações**. São Paulo, SP: Editora Érica, 2009. v. 4.

TREEBY, B. T. C. B. E. k-wave: Matlab toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields. **Journal of Biomedical Optics** **15(2)**, 2010.

WENDLING, M. **Sensores**. 2010. Universidade Estadual Paulista.

WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**. 7th. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2011.

ZHENG, D.-D.; LV, S.-H.; WANG, H.; MAO, Y. Research on coupling method of flow field and acoustic field based on comsol for ultrasonic flowmeter. In: **2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)**. [S. l.: s. n.], 2018. p. 1–6.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications**. 3rd. ed. [S. l.]: McGraw-Hill Education, 2014.

APÊNDICE A – CÓDIGOS

Código-fonte 1 – Simulation

```

1  for iter in 1:N_TIME_STEPS
2      convection_x = velocity_x_prev .*
        central_difference_x_periodic(velocity_x_prev,
        element_length)
3      diffusion_x = KINEMATIC_VISCOSITY * laplace_periodic(
        velocity_x_prev, element_length)
4
5      velocity_x_next = velocity_x_prev .+ TIME_STEP_LENGTH *
        (-PRESSURE_GRADIENT[1] .+ diffusion_x .-
        convection_x)
6
7      velocity_x_next[1, :] .= 0.0
8      velocity_x_next[end, :] .= 0.0
9      if iter == N_TIME_STEPS
10         velocity_x_final .= velocity_x_next
11     end
12     velocity_x_prev = velocity_x_next
13 end

```

Código-fonte 2 – Extract

```

1  beam_path = []
2  row = 1
3  col = 1
4  while row >= 0 && row <= N_POINTS && col >= 0 && col <=
    N_POINTS
5      push!(beam_path, copy(calculated_velocity_field[row, col
        ]))
6      row = row+1

```

```

7     col = col+1
8 end

```

Código-fonte 3 – Calculo de tempo

```

1 function transit_time_at_point_up(velocity, element_length,
   speed_of_sound)
2     angle_factor = cos(pi / 4)
3     time = (element_length / (speed_of_sound - (velocity *
   angle_factor)))
4     return time
5 end
6
7 function transit_time_at_point_down(velocity,
   element_length, speed_of_sound)
8     angle_factor = cos(pi / 4)
9     time = (element_length / (speed_of_sound + (velocity *
   angle_factor)))
10    return time
11 end

```

Código-fonte 4 – Modelo

```

1 delta_t = total_transit_time_up - total_transit_time_down
2 product_t = total_transit_time_up * total_transit_time_down
3 v_calculated = (L*delta_t)/(2*cos(pi/ 4)*product_t)

```

Código-fonte 5 – Noise

```

1
2 function add_noise(value::Float64, noise_level::Float64)
3     return value + (randn()*2-1) * noise_level
4 end

```

Código-fonte 6 – Aplicação de Ruído

```
1 v_calculated = add_noise(v_calculated,0.05)
```

Código-fonte 7 – MAE

```
1 function calc_MAE(v::Vector{Float64}, v_hat::Vector{Float64}
    })
2     return mean(abs.(v .- v_hat))
3 end
```

Código-fonte 8 – Linearidade

```
1
2 df = DataFrame(velocidade_real = medio, delta_t =
    delta_t_vec)
3 df.velocidade_real = Float64.(df.velocidade_real)
4 df.delta_t = Float64.(df.delta_t)
5 modelo = lm(@formula(delta_t ~ velocidade_real), df)
6 a = coef(modelo)[2]
7 b = coef(modelo)[1]
8 println("Inclinação (a): ", a)
9 println("Intercepto (b): ", b)
10 delta_t_pred = a .* medio .+ b
```

Código-fonte 9 – R2

```
1
2 y_real = df.delta_t
3 y_pred = coef(modelo)[2] .* df.velocidade_real .+ coef(
    modelo)[1]
```

```
4 ss_tot = sum((y_real .- mean(y_real)).^2)
5 ss_res = sum((y_real .- y_pred).^2)
6 r_squared = 1 - (ss_res / ss_tot)
```