

Universidade Federal do Ceará

SIMULAÇÃO DE SENSOR DE FLUXO ULTRASSÔNICO

Trabalho de conclusão de curso II

Elias Frota Coutinho Filho
Prof. Me. Luis Rodolfo Rebouças Coutinho

Universidade Federal do Ceará

Resumo

- Simulação de fluxo
- Modelagem de sistema
- Sensores

Universidade Federal do Ceará

Sumário

01 Introdução

02 Trabalhos relacionados

03 Fundamentação Teórica

04 Metodologia

05 Resultados

Universidade Federal do Ceará

Introdução

- Gestão de recursos
- Regulamentação
- Base de desenvolvimento

Universidade Federal do Ceará

Objetivos

Objetivo geral

Como objetivo geral, este trabalho busca utilizar a linguagem Julia para simular o comportamento de medição de um sensor de fluxo ultrassônico.

Universidade Federal do Ceará

Objetivos

Objetivos específicos

- Modelar o comportamento do sensor na linguagem Julia.
- Validar o modelo em um ambiente simulado.
- Aplicar métricas de desempenho ao modelo.

Universidade Federal do Ceará

Trabalhos relacionados

- 01** High-precision time-of-flight determination algorithm for ultrasonic flow measurement
- 02** Research on Coupling Method of Flow Field and Acoustic Field Based on COMSOL for Ultrasonic Flowmeter
- 03** Numerical Simulation of Transit-time Ultrasonic Flowmeters in Deep-regulating Units
- 04** Clamp-On Measurements of Fluid Flow in Small-Diameter Metal Pipes Using Ultrasonic Guided Waves

Trabalhos relacionados

Tabela 1 – Trabalhos relacionados

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

Universidade Federal do Ceará

Fundamentação Teórica

Universidade Federal do Ceará

Fundamentação Teórica

Conceitos abordados

01 Mecânica dos fluidos

02 Sensores

03 Sinais ultrassônicos

04 Fluxômetros

05 Simuladores

Universidade Federal do Ceará

Mecânica dos fluidos

Universidade Federal do Ceará

Mecânica dos fluidos

- Definição de fluidos

- Substância que se deforma sob a ação de uma força tangencial.

- Propriedades

- Densidade.
- Viscosidade.
- Pressão.

$$\rho = \frac{m}{V} [kg/m^3]$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

$$\Delta p$$

Universidade Federal do Ceará

Mecânica dos fluidos

- **Navier-Stokes**

- Descrevem a dinâmica de um fluido ao longo do tempo.
- Expressas por um conjunto de equações diferenciais parciais

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

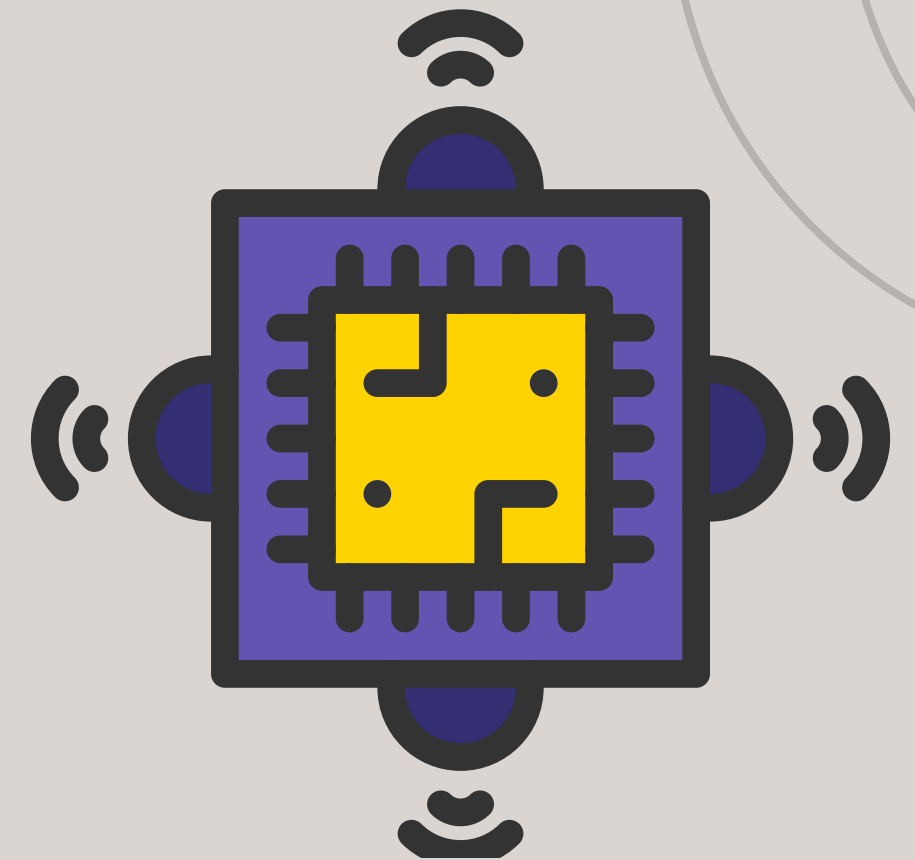
$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + F$$

Universidade Federal do Ceará

Sensores

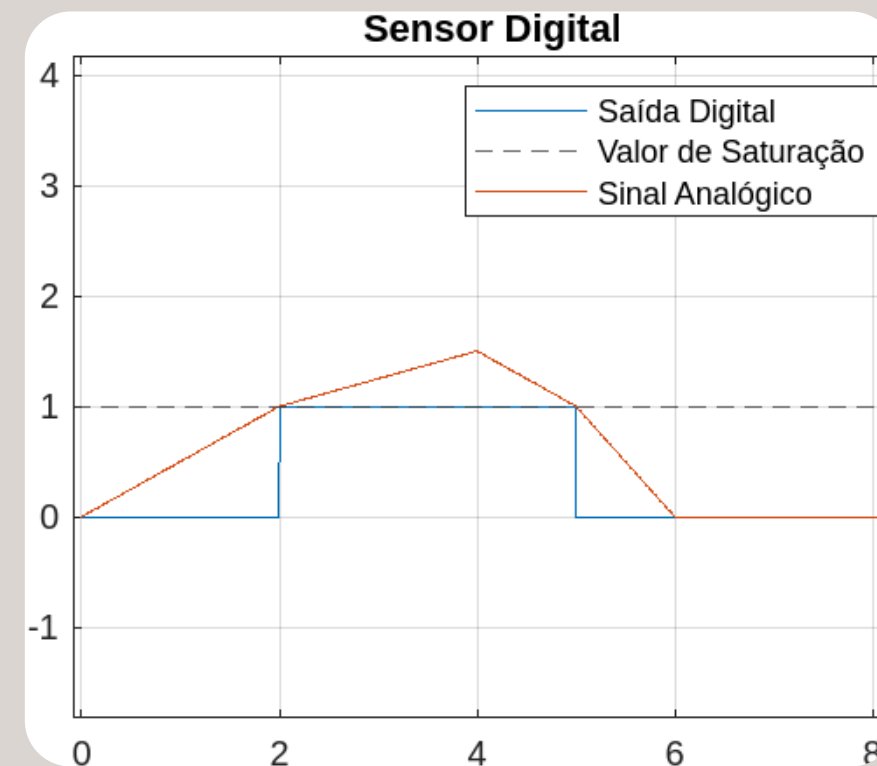
Sensores

- Definição
 - Dispositivo sensível a formas de energia do ambiente, capaz de converter uma grandeza mensurável.

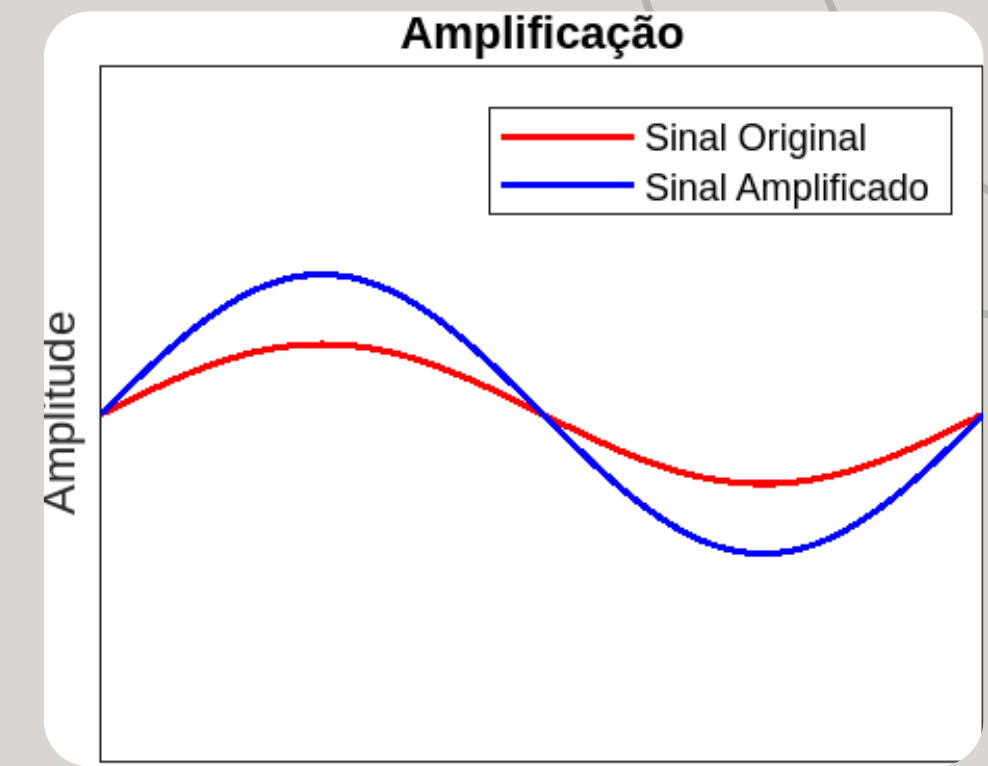


Sensores

- Tipos de respostas e formas de condicionamento.
 - Digital
 - Saturação.
 - Analógico
 - Amplificação.



Fonte: Autor



Fonte: Autor

Universidade Federal do Ceará

Sensores

- **Transdutores**
 - Dispositivos de medição completos, compostos por um sensor e por circuitos de interface.

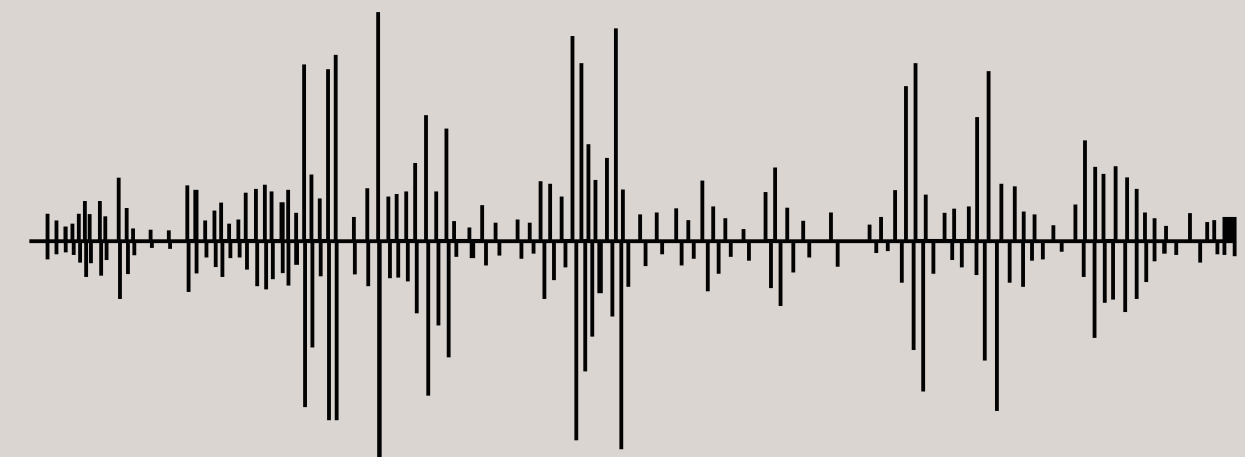
Sinais ultrassonicos

- **Definição**

- Sinais ultrassônicos recebem esse nome por operarem em uma faixa de frequência superior à audível pelo ser humano, acima de 20 kHz.

- **Frequência**

- A frequência de um sinal é definida como o número de oscilações periódicas em um determinado intervalo de tempo.
- A unidade de medida padrão para frequência é o Hz.



Universidade Federal do Ceará

Fluxômetros

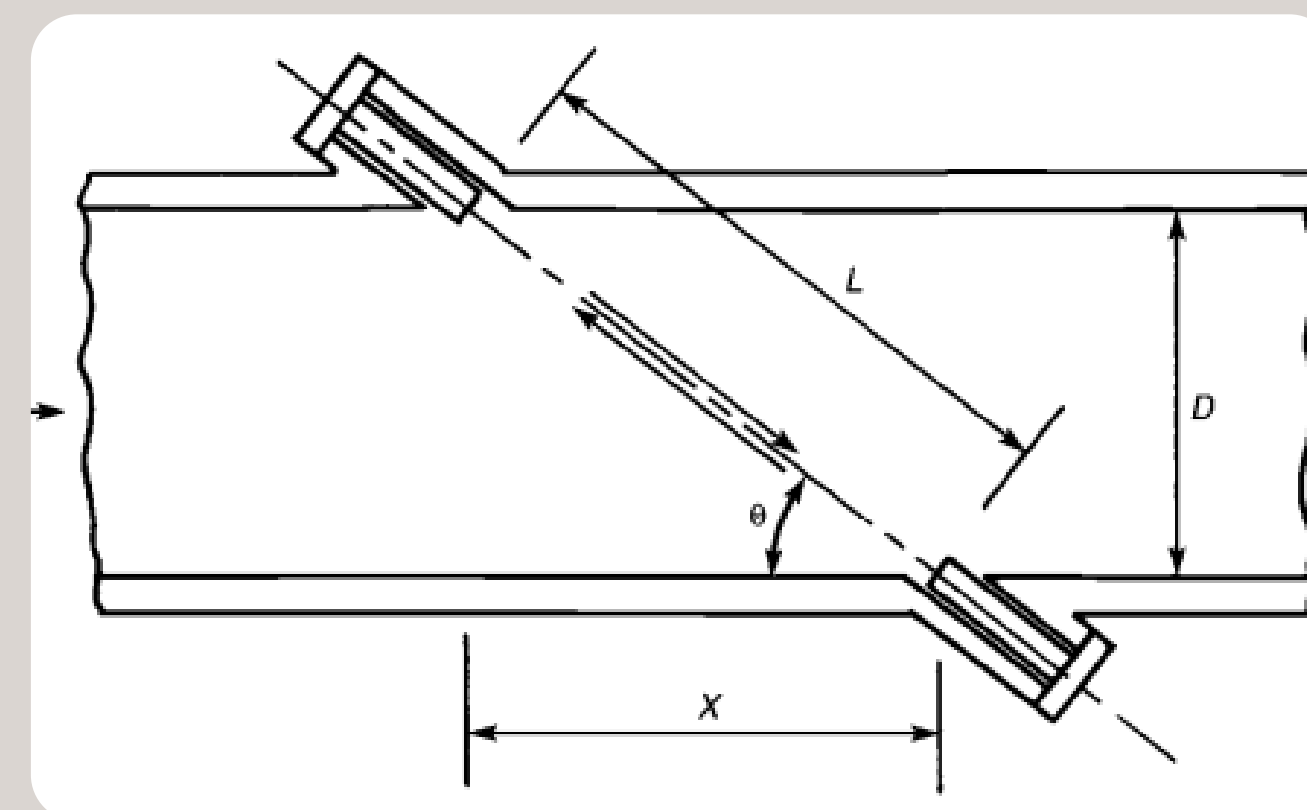
Fluxômetros

- Definição

- Dispositivos que têm a função de medir fluxo.

- Fluxômetros ultrassônico

- Utilizam sinais de ultrassom para realizar a medição de fluxo.
- Tempo de trânsito.



Fonte: (BAKER,2000)

Universidade Federal do Ceará

Simuladores

Universidade Federal do Ceará

Simuladores

- **k-Wave.**
 - MATLAB/C++
- **COMSOL Multiphysics Simulation Software.**
 - Software proprietário.
- **Ansys.**
 - Software proprietário.

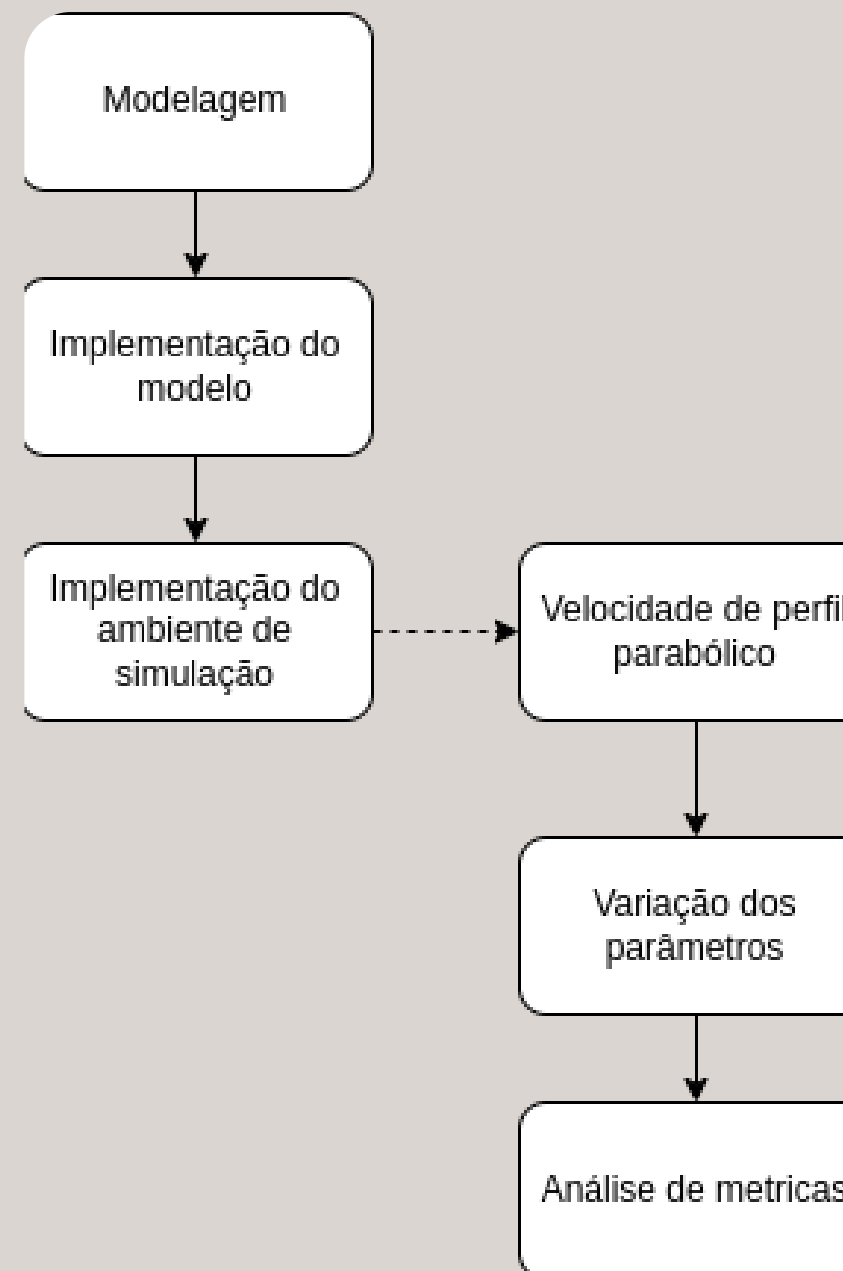


Universidade Federal do Ceará

Metodologia

Universidade Federal do Ceará

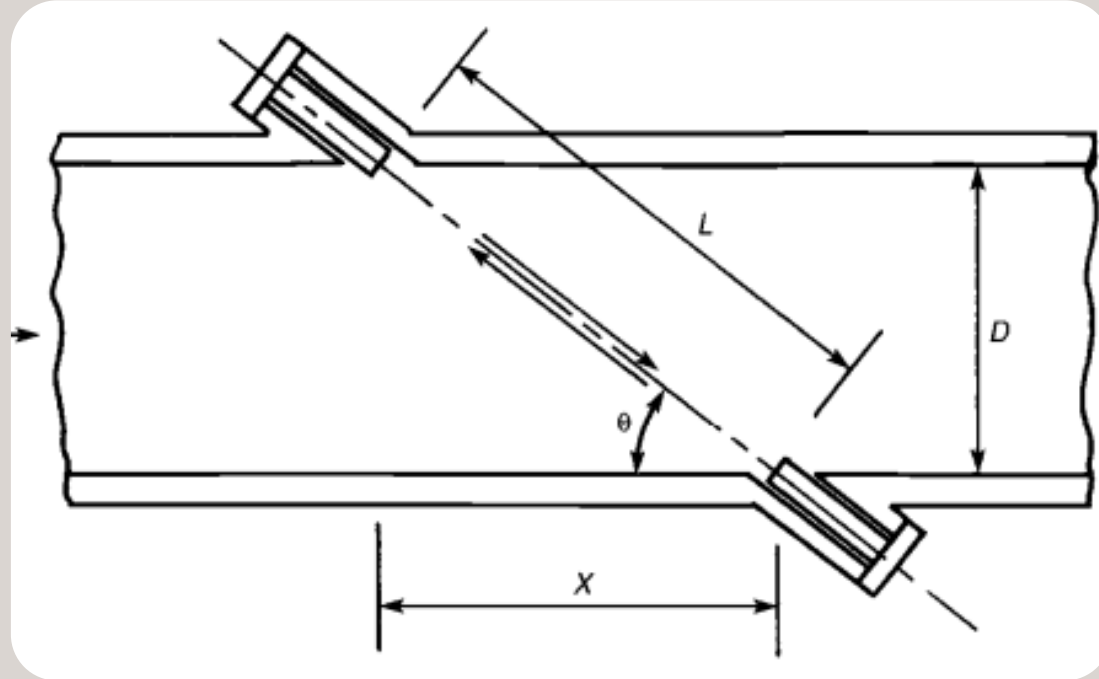
Fluxograma



Fonte: Autor

Universidade Federal do Ceará

Modelagem



Fonte: (BAKER,2000)

$$t_{ud} = \frac{L}{c \pm v \cos \alpha}$$

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

$$v = \frac{L \Delta t}{2 \cos \alpha t_u t_d}$$

Universidade Federal do Ceará

Impelmentação do modelo

```
delta_t = total_transit_time_up - total_transit_time_down  
push!(delta_t_vec,copy(delta_t))  
product_t = total_transit_time_up * total_transit_time_down  
v_calculated = (L * delta_t) / (2 * cos( $\pi$  / 4) * product_t)
```

Fonte: Autor

Universidade Federal do Ceará

Ambiente de simulação e perfil parabólico

```
for iter in 1:N_TIME_STEPS
    convection_x = velocity_x_prev .* central_difference_x_periodic(velocity_x_prev, element_length)
    diffusion_x = KINEMATIC_VISCOSITY_25 * laplace_periodic(velocity_x_prev, element_length)

    velocity_x_next = velocity_x_prev .+ TIME_STEP_LENGTH * (-PRESSURES[i] .+ diffusion_x .- convection_x)

    velocity_x_next[1, :] .= 0.0
    velocity_x_next[end, :] .= 0.0
    velocity_x_prev = velocity_x_next
end
```

Fonte: Autor

Universidade Federal do Ceará

Variação de parâmetros

```
PRESSURES= [-0.3,-0.4,-0.5,-0.6,-0.7,-0.8,-0.9,-1.0,-1.1,-1.2]
```

```
KINEMATIC_VISCOSITY_5 = 1.8 *(10^(-6))  
KINEMATIC_VISCOSITY_25 = 0.9 *(10^(-6))  
KINEMATIC_VISCOSITY_55 = 0.5 *(10^(-6))  
KINEMATIC_VISCOSITY_75 = 0.4 *(10^(-6))  
KINEMATIC_VISCOSITY_100 = 0.3 *(10^(-6))
```

Fonte: Autor

Universidade Federal do Ceará

Análise de métricas

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

Precisão

$$S_v = \frac{\Delta \hat{v}}{\Delta v}$$

Sensibilidade

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

$$\Delta t = a \cdot v + b$$

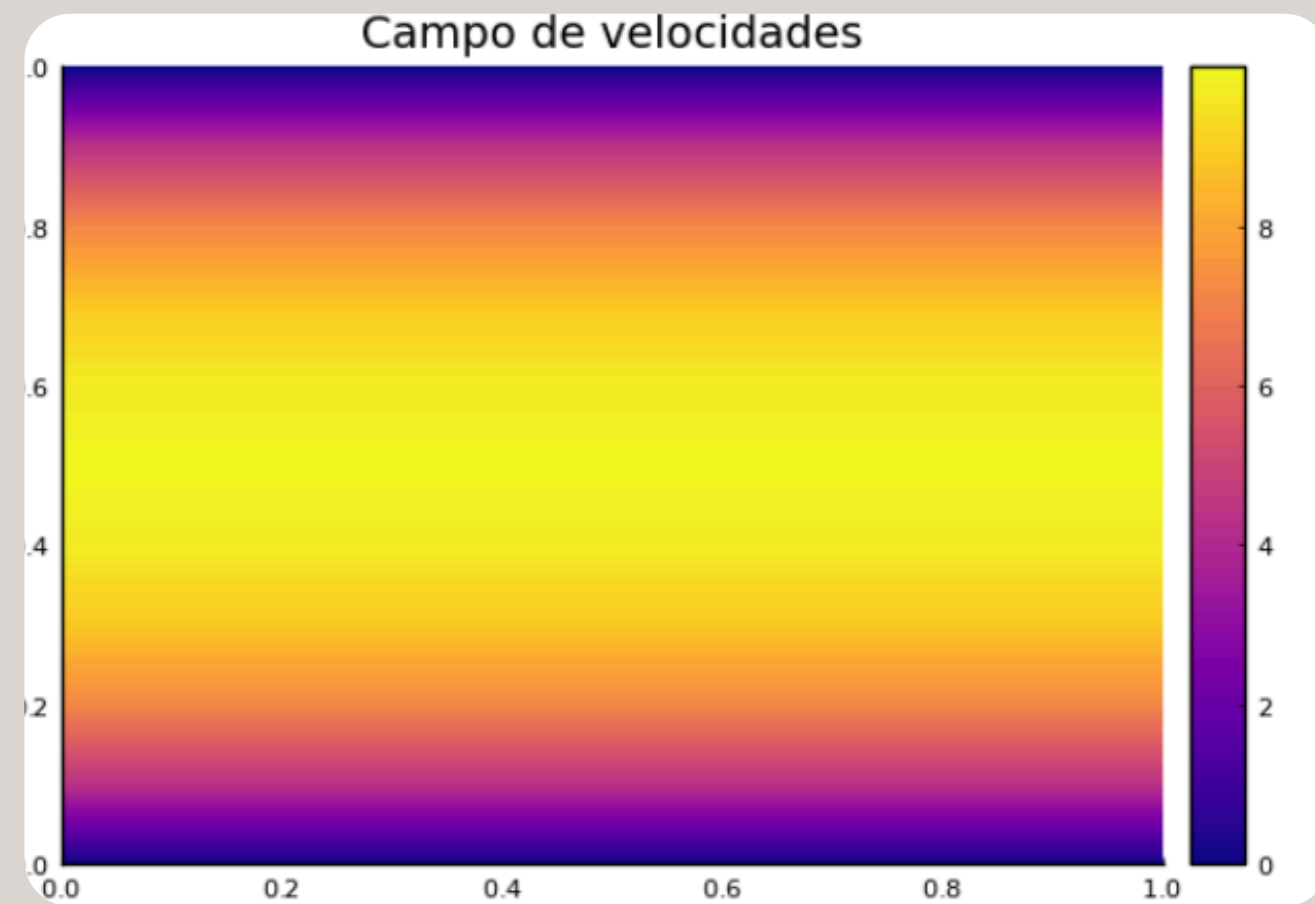
Linearidade

Universidade Federal do Ceará

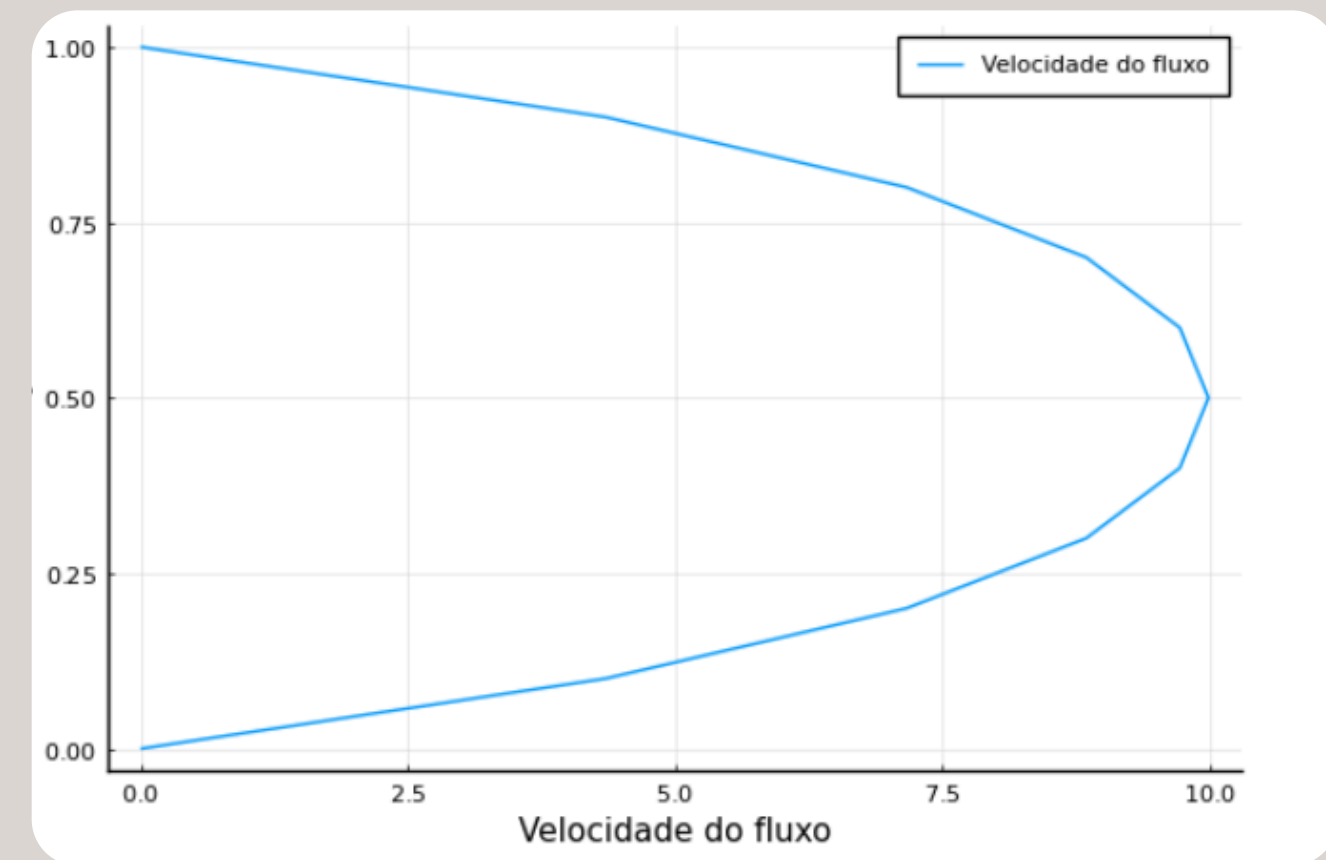
Resultados

Universidade Federal do Ceará

Resultados - Ambiente de simulação



Fonte: Autor



Fonte: Autor

Resultados - Variação de parâmetros

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

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

Tabela 4 – Variação do gradiente de pressão

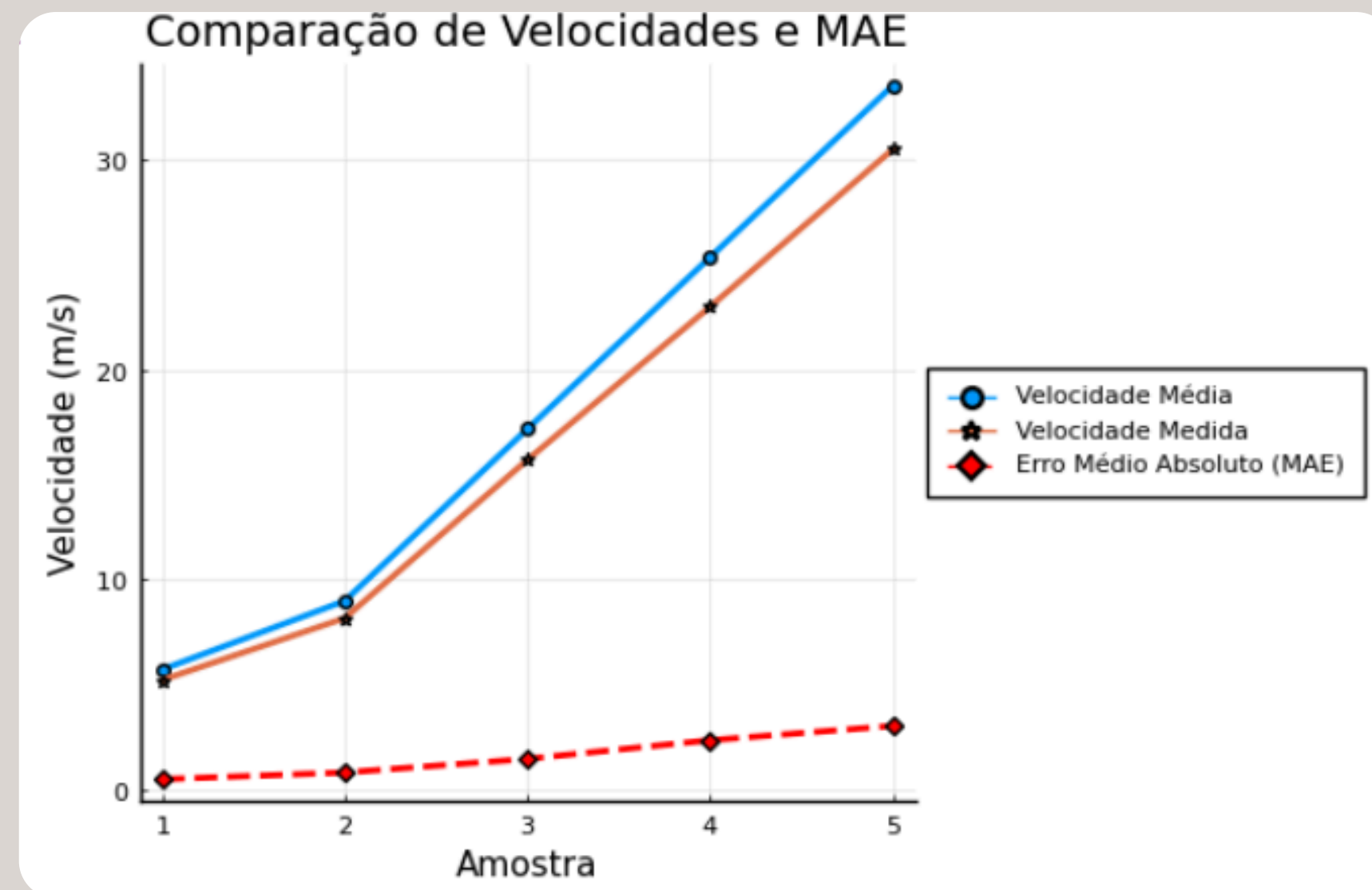
Gradiente de pressão	Velocidade Média	Velocidade Máxima
-0.3	5.72	7.00
-0,5	8.99	11.00
-1	17.18	21.00
-1.5	25.36	30.99
-2	33.54	41.00

Fonte: Autor

Universidade Federal do Ceará

Resultados - Análise de métricas

Precisão

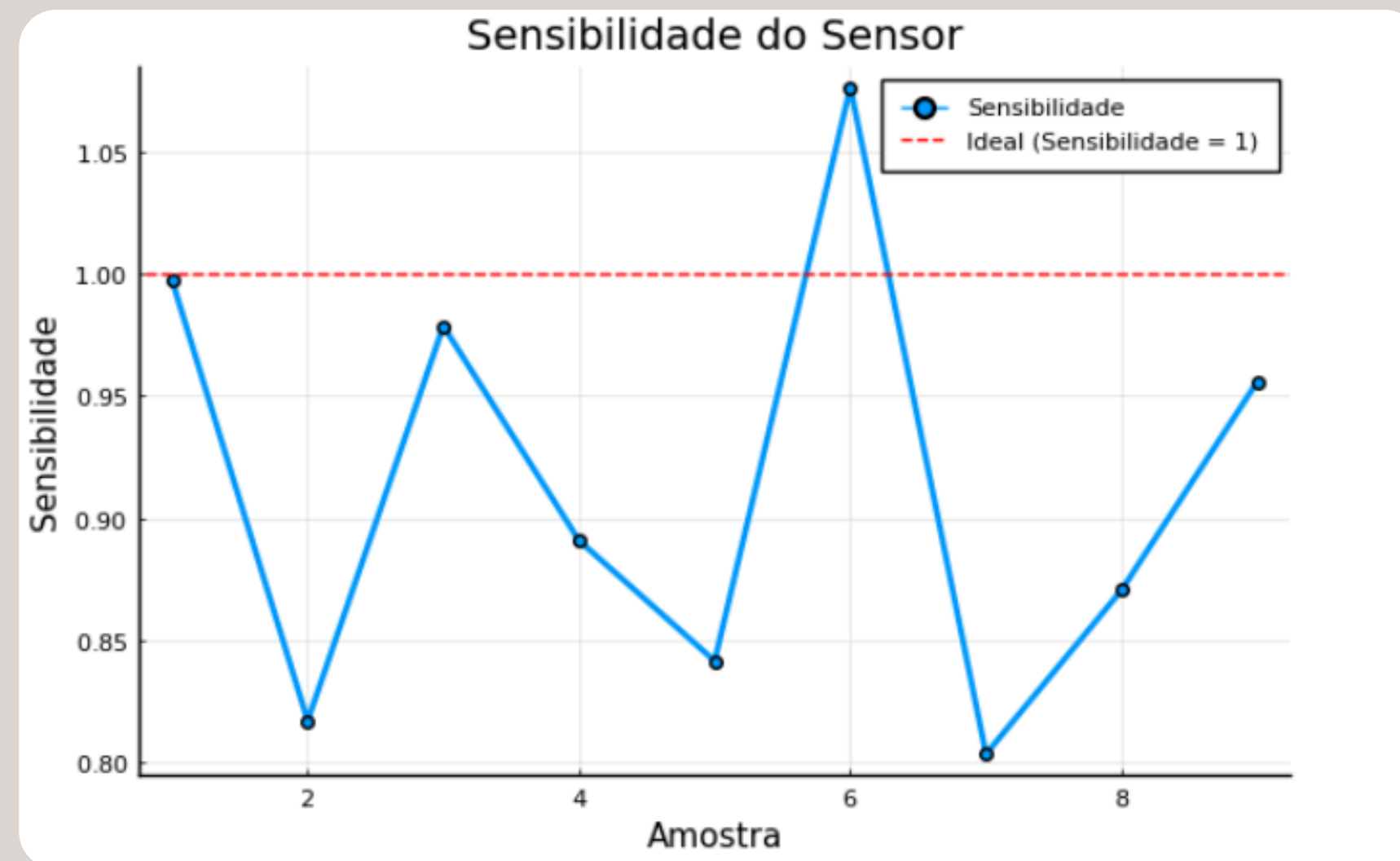


Fonte: Autor

Universidade Federal do Ceará

Resultados - Análise de métricas

Sensibilidade



Fonte: Autor

Universidade Federal do Ceará

Resultados - Análise de métricas Lenaridade



Fonte: Autor

Universidade Federal do Ceará

Conclusão e trabalhos futuros

- Simulação com perfil de velocidade seguindo o ideal.
- Variação de parâmetros do fluido.
 - Viscosidade não demonstrou uma alteração significativa.
 - Pressão demonstrou um aumento considerável na velocidade.
- Análise de métricas.
 - Precisão boa em velocidades mais baixas, erro tende a crescer em velocidades mais altas.
 - Sensibilidade inconsistente.
 - Linearidade apresentou uma forte correlação entre a velocidade de entrada e a diferença de tempo na saída.

Universidade Federal do Ceará

Conclusão e trabalhos futuros

- Integração do modelo do sensor dentro da simulação do fluido.
- Análise de fluidos turbulentos.
- Estudo de aplicação de ruído ao tempo de trânsito.

Universidade Federal do Ceará

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.

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 vanta-gens 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.

Universidade Federal do Ceará

Referências

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.