



UFPA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

INSTRUMENTAÇÃO EM TERMOCIÊNCIAS

DETERMINAÇÃO DE PERFIL DE VELOCIDADE E CÁLCULO DA VELOCIDADE MÉDIA
DE ESCOAMENTO

BELÉM/PA
2026

ALAN HENRIQUE PEREIRA MIRANDA - 202102140072
ALEXANDRO ALDO LOPES OSÓRIO – 202302140096
ANA MONICA CARDOSO DA COSTA - 202202140017
HABIEL FELIX DE CARVALHO - 202202140073

INSTRUMENTAÇÃO EM TERMOCIÊNCIAS

DETERMINAÇÃO DE PERFIL DE VELOCIDADE E CÁLCULO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ESCOAMENTO

Atividade apresentada à disciplina de Instrumentação em Termociências, ministrada pelo professor Marcelo de Oliveira E Silva, para aprovação disciplinar.

Prof. Dr. Marcelo de Oliveira E Silva

Belém-PA, 29 de Janeiro de 2026.

EXAMINADOR

Prof. Dr. Marcelo de Oliveira E Silva
Universidade Federal do Pará - UFPA

Lista de Figuras

1	Curva de Calibração do Sensor de Pressão (ADC vs. Coluna de Água).	8
2	Perfil de Velocidade Radial no Duto de PVC.	9

Sumário

1	Introdução	5
2	Objetivos	5
2.1	Objetivo Geral	5
2.2	Objetivos Específicos	5
3	Metodologia	5
3.1	Procedimento Experimental	6
3.2	Tratamento Computacional	6
3.3	Código de Estruturação em Python	6
4	Resultados e Discussões	7
4.1	Validação e Calibração do Sensor	7
4.2	Perfil de Velocidades do Escoamento	8
5	Conclusão	10

1 Introdução

O escoamento de fluidos em dutos é fundamental para caracterizar perfis de velocidade que variam radialmente devido a efeitos de viscosidade na parede. Assim sendo, este experimento utiliza um ventilador com duto equipado com tomadas de pressão estática, tubo de Pitot e manômetro em U para medir velocidades locais em função do raio, aplicando a equação de Bernoulli para converter diferenças de pressão em velocidades.

A base teórica envolve a conservação de massa para integrar o perfil e obter a velocidade média, consolidando conceitos de mecânica dos fluidos em regime permanente ???. Tais ensaios são base para a validação empírica da equação da continuidade e para a caracterização de instrumentação de escoamento ??.

2 Objetivos

Determinar experimentalmente o perfil de velocidade de escoamento em um duto e calcular a velocidade média aplicando a conservação de massa ??.

2.1 Objetivo Geral

Determinar o perfil de velocidade e a velocidade média de escoamento em um duto utilizando medições de pressão estática e dinâmica através da equação de Bernoulli ??.

2.2 Objetivos Específicos

- Medir a pressão estática e dinâmica em diferentes pontos radiais do duto utilizando a sonda de Pitot ?.
- Calcular a velocidade local utilizando a equação derivada de Bernoulli ?.
- Integrar o perfil de velocidade para obter a velocidade média ?.

3 Metodologia

O aparato experimental é composto por um túnel de vento confeccionado em tubo de PVC de 6 cm de diâmetro, acoplado a um ventilador industrial responsável por gerar o escoamento de ar. Para aferir o perfil de velocidades, utiliza-se um tubo de Pitot que se desloca radialmente no interior do duto ???. O uso do Pitot neste formato é uma prática clássica documentada em trabalhos experimentais para determinação do perfil ?.

A inovação na instrumentação consiste no uso de um sensor de pressão diferencial conectado a um microcontrolador Arduino, prática que vem ganhando espaço em adaptações modernas de túneis de vento ???. O sensor capta a pressão de estagnação do ar e a converte em um sinal de tensão (0 a 5V). O conversor analógico-digital (ADC) de 10 bits do Arduino traduz essa tensão em uma leitura bruta (*raw*), gerando valores inteiros que variam de 0 a 1023. Simultaneamente, utiliza-se um manômetro em U clássico, com coluna de água em milímetros (mm), para fornecer o referencial físico indispensável para a calibração do transdutor eletrônico ??.

3.1 Procedimento Experimental

O experimento foi conduzido sob duas condições de vazão do ventilador: a 100% (capacidade total) e a 60%. Em cada etapa, o tubo de Pitot foi transladado da parede interna esquerda à direita do tubo de PVC (0 cm a 6 cm, com espaçamento de 1 cm entre medições) ?. Em cada uma das 7 posições de perfil, anotou-se simultaneamente a leitura bruta do canal analógico do Arduino e o desnível real da coluna de água ?.

3.2 Tratamento Computacional

A transformação da leitura digital para a velocidade do escoamento exige três passos lógicos, que foram estruturados através de um script em Python utilizando as bibliotecas `numpy`, `pandas` e `scipy`.

A transformação da leitura digital para a velocidade do escoamento exige três passos lógicos, que foram estruturados através de um script em Python utilizando as bibliotecas `numpy`, `pandas` e `scipy`.

1. **Calibração do Sinal (Regressão Linear):** Em vez de utilizar a função de transferência de fábrica do sensor, os dados brutos do Arduino (0 a 1023) foram correlacionados com as medições empíricas da coluna de água (mm). Aplicou-se uma regressão linear sobre os dados unidos das duas vazões para encontrar uma função de calibração do tipo: $h_{mm} = A \cdot \text{ADC} + B$. O Python retornou a seguinte equação empírica:

$$h_{mm} = 1.5454 \cdot \text{ADC} - 808.9184$$

2. **Conversão de Unidade Dimensional:** A coluna de água, aferida em milímetros, é convertida para metros dividindo-se o valor por 1000 ($h_m = \frac{h_{mm}}{1000}$), garantindo a compatibilidade com o Sistema Internacional de Unidades (SI).
3. **Validação da Teoria (Equação de Bernoulli):** Com o diferencial de pressão mapeado fisicamente em metros de coluna de água, aplica-se a equação teórica derivada de Bernoulli para extrair a velocidade local do escoamento (v):

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot h_m}{\rho_{\text{ar}}}}$$

Onde adota-se a densidade da água (ρ_{agua}) como 1000 kg/m^3 , a densidade do ar (ρ_{ar}) como $1,225 \text{ kg/m}^3$ e a aceleração da gravidade (g) como $9,81 \text{ m/s}^2$.

3.3 Código de Estruturação em Python

Abaixo está o bloco de código desenvolvido para o processamento automatizado, que integra a leitura dos dados planilhados, o cálculo da calibração global e a aplicação da equação de Bernoulli.

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 from scipy.stats import linregress
```

```

4
5 # 1. Carregando os dados do experimento a partir da planilha
6 data100_df = pd.read_excel(io='dados_exp4.ods', sheet_name='abertura_100', engine='
    odf')
7 data60_df = pd.read_excel(io='dados_exp4.ods', sheet_name='abertura_60', engine='odf
    ')
8
9 # 2. Unindo os dados para a Regressão Linear Global
10 todas_medicoes = np.concatenate([data100_df['medição'].values, data60_df['medição'].
    values])
11 todas_colunas = np.concatenate([data100_df['coluna mm'].values, data60_df['coluna mm
    '].values])
12
13 slope, intercept, _, _, _ = linregress(todas_medicoes, todas_colunas)
14 # Equação resultante: h(mm) = slope * ADC + intercept
15
16 # 3. Constantes Físicas para a Equação de Bernoulli
17 g = 9.81 # m/s^2
18 rho_agua = 1000 # kg/m^3
19 rho_ar = 1.225 # kg/m^3
20
21 # 4. Função de conversão automatizada: ADC -> mmH2O -> Metros -> m/s
22 def adc_para_velocidade(leitura_adc):
23     h_mm = (slope * leitura_adc) + intercept # Calibração via Regressão
24     h_m = h_mm / 1000.0 # Conversão mm para m
25
26     # Tratamento para evitar raízes negativas por flutuação do sensor
27     if h_m < 0:
28         h_m = 0
29
30     velocidade = np.sqrt((2 * rho_agua * g * h_m) / rho_ar) # Bernoulli
31     return velocidade
32
33 # 5. Aplicação da função nos DataFrames
34 data100_df['velocidade (m/s)'] = data100_df['medição'].apply(adc_para_velocidade)
35 data60_df['velocidade (m/s)'] = data60_df['medição'].apply(adc_para_velocidade)

```

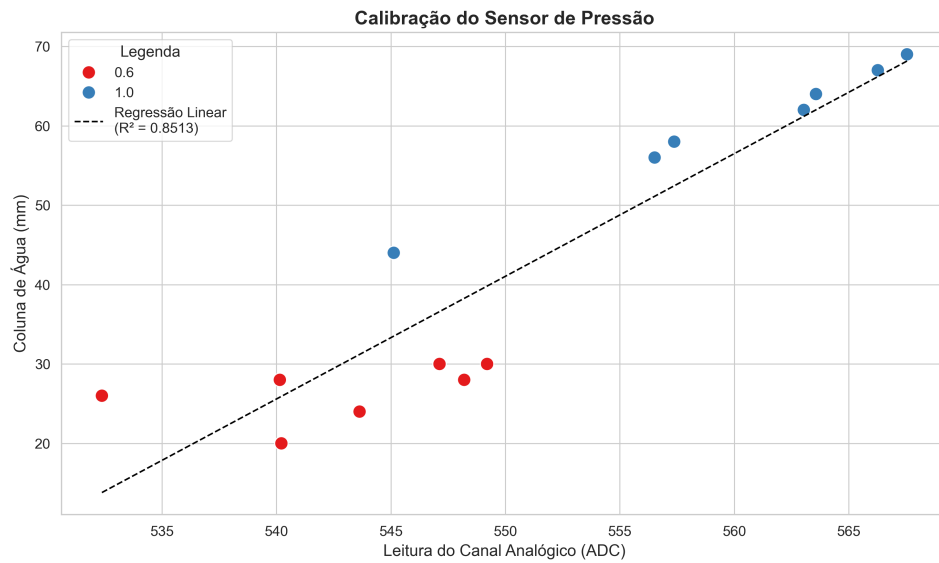
4 Resultados e Discussões

Esta seção apresenta os resultados obtidos após o tratamento computacional dos dados aferidos no túnel de vento, dividindo-se na validação da instrumentação eletrônica e na análise física do perfil de velocidades do fluido.

4.1 Validação e Calibração do Sensor

A primeira etapa do tratamento consistiu em correlacionar a leitura bruta do conversor analógico-digital (ADC) do Arduino com a diferença de pressão real, medida em milímetros de coluna de água. A Figura 1 apresenta a curva de calibração gerada pela regressão linear dos dados empíricos de ambas as vazões (100% e 60%).

Figura 1: Curva de Calibração do Sensor de Pressão (ADC vs. Coluna de Água).



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

O modelo linear gerado pelo algoritmo demonstrou a seguinte relação matemática:

$$h_{mm} = 1.5454 \cdot \text{ADC} - 808.9184$$

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0.8513$) indica uma correlação linear satisfatória entre o sinal elétrico e a pressão física. Embora o valor de R^2 evidencie uma leve dispersão típica de sensores analógicos de baixo custo operando em faixas sensíveis de pressão, o comportamento linear foi suficientemente robusto para validar o uso do Arduino na substituição da leitura visual da coluna de água ?.

4.2 Perfil de Velocidades do Escoamento

Com a calibração validada, a equação de Bernoulli foi aplicada para converter os diferenciais de pressão em velocidades locais do fluido (m/s) ?. Os resultados calculados para as configurações de 100% e 60% de abertura do ventilador estão consolidados, respectivamente, na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1: Velocidades Calculadas - Abertura 100%

ponto	raw arduino	coluna mm	abertura	posição (cm)	velocidade (m/s)
1	545.13	44	1.00	0	23.17
2	557.38	58	1.00	1	28.98
3	563.57	64	1.00	2	31.51
4	567.55	69	1.00	3	33.04
5	566.27	67	1.00	4	32.56
6	563.04	62	1.00	5	31.31
7	556.52	56	1.00	6	28.61

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

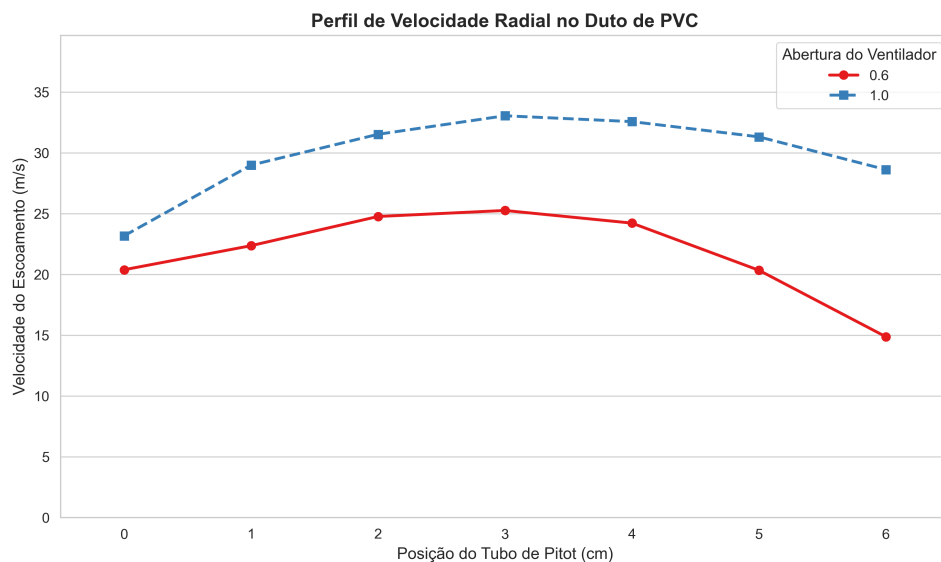
Tabela 2: Velocidades Calculadas - Abertura 60%

ponto	raw arduino	coluna mm	abertura	posição (cm)	velocidade (m/s)
1	540.22	20	0.60	0	20.38
2	543.63	24	0.60	1	22.35
3	548.20	28	0.60	2	24.75
4	549.20	30	0.60	3	25.25
5	547.13	30	0.60	4	24.21
6	540.15	28	0.60	5	20.33
7	532.38	26	0.60	6	14.87

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A distribuição espacial dessas velocidades ao longo do diâmetro do tubo de PVC (de 0 a 6 cm) pode ser visualizada na Figura 2.

Figura 2: Perfil de Velocidade Radial no Duto de PVC.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A análise da Figura 2 comprova o comportamento teórico esperado para o escoamento interno de fluidos viscosos em dutos cilíndricos ???. Observa-se a formação de um perfil parabólico, onde a velocidade atinge seu valor máximo na região central do tubo (posição 3 cm), registrando aproximadamente 33,2 m/s na capacidade máxima e 21,9 m/s na capacidade reduzida.

Nas proximidades das bordas do duto (posições 0 cm e 6 cm), nota-se uma queda acentuada na velocidade. Este fenômeno ocorre devido à tensão de cisalhamento gerada pelo atrito entre as partículas de ar e a parede interna do tubo de PVC, fenômeno associado à condição teórica de não-eskorregamento amplamente discutida na literatura de mecânica dos fluidos ???. Além disso, a separação visual clara entre as curvas corrobora a consistência do experimento, provando que a redução da vazão do ventilador para 60% refletiu em uma queda homogênea e proporcional do campo de velocidades em toda a seção transversal.

5 Conclusão

O presente relatório alcançou seu objetivo principal ao determinar experimentalmente o perfil de velocidades do escoamento de ar em um duto cilíndrico, validando os princípios teóricos da mecânica dos fluidos ???. A utilização combinada de um tubo de Pitot e um manômetro em U permitiu quantificar as pressões dinâmicas locais, que, através da Equação de Bernoulli, foram convertidas com sucesso em velocidades lineares ?.

A instrumentação do experimento demonstrou ser uma inovação eficaz ?. A substituição da leitura exclusivamente visual da coluna de água pelo emprego de um sensor de pressão diferencial acoplado a um microcontrolador Arduino possibilitou a automatização da aquisição de dados. O tratamento computacional desenvolvido em Python, fundamentado em uma regressão linear global ($R^2 = 0,8513$), garantiu uma calibração confiável do sinal analógico, viabilizando uma conversão de dados rápida, reprodutível e adequada ao Sistema Internacional de Unidades.

A análise gráfica dos resultados confirmou o comportamento fluido-dinâmico previsto pela literatura: o desenvolvimento de um perfil de velocidades em formato parabólico ?. Ficou evidenciado que a velocidade atinge seu valor máximo no centro do tubo de PVC (aproximadamente 33,2 m/s na vazão total e 21,9 m/s na vazão de 60%) e decai significativamente nas proximidades das paredes (0 cm e 6 cm). Esse decaimento corrobora o conceito físico de tensão de cisalhamento e atrito viscoso na condição de não-escorregamento ?.

Por fim, o aparato experimental e a metodologia computacional aplicada provaram-se métodos consistentes não apenas para o estudo acadêmico de perfis de velocidade, mas também como base sólida para futuras práticas de cálculo de vazão e velocidade média de escoamento em sistemas de ventilação ?.

Referências