



**João Pedro Chambel Santos**

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

## **Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição de Pressão**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Mecânica**

Orientador: Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil, Professor  
Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa

### **Júri**

Presidente: Doutor José Manuel Paixão Conde, Professor  
Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa

Vogais: Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil, Professor  
Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa  
Doutor Daniel Cardoso Vaz, Professor  
Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa



## **Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição de Pressão**

Copyright © 2019 João Pedro Chambel Santos

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



À minha família



# Agradecimentos

A contribuição de algumas pessoas foi fundamental para a realização deste trabalho.

Quero agradecer ao meu orientador, o professor Luís Gil, pela proposta do tema desta dissertação na qual tive bastante prazer trabalhar. Por todas as ocasiões em que guiou o meu caminho e pela sua permanente disponibilidade e compreensão.

Agradeço ao meu colega Luís Ramos pela sua camaradagem.

Quero agradecer também aos meus pais, à minha irmã e aos meus avós, por tudo.



# Resumo

Neste trabalho foi desenvolvido, recorrendo à associação de um transdutor de pressão com uma placa Arduino Uno, um sistema de aquisição que permite a leitura num ecrã LCD, ou o registo num ficheiro digital, dos valores de pressão e de velocidade num escoamento de um líquido ou de um gás. O registo de ficheiros digitais é feito em computador, utilizando o *software* LabVIEW e o *add on* para Microsoft Excel PLX-DAQ, que permitem comunicação entre este e a placa Arduino Uno.

Foram desenvolvidos dois programas para LabVIEW; o primeiro permite registar séries temporais de pressão e de velocidade, e tem comunicação direta com o Arduino Uno utilizando o *add on* "LabVIEW Interface for Arduino"; o segundo realiza uma análise em frequência a um sinal proveniente de um ficheiro gerado pelo *add on* PLX-DAQ, permitindo obter o seu espectro de amplitude. Foram integrados no sistema de aquisição um barómetro digital e um termopar, que permitiram a automação do cálculo da massa volúmica do ar. Foi desenvolvido um método de aquisição periódica de pressão que permite uma taxa de aquisição máxima de 83 Hz.

Em escoamentos de ar, foi feito o registo de perfis de velocidade e a deteção do desprendimento vorticular na esteira de um cilindro, bem como a correta determinação experimental da frequência deste desprendimento.

O sistema desenvolvido fica disponível para trabalhos futuros no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica Aplicada do DEMI da FCT NOVA e poderá ser utilizado na medição de escoamentos permanentes ou transitórios com variações temporais moderadas.

---

## Palavras Chave

Transdutor de pressão  
Arduino  
Medição de velocidade  
Análise em frequência  
Aquisição automatizada  
Série temporal



# Abstract

In the present work, an acquisition system was developed, which allows liquid or gas flow pressure and velocity measurements to be displayed on an LCD screen or recorded onto a digital file. Digital file recording was accomplished using the software LabVIEW and the add on for Microsoft Excel PLX-DAQ. This system was built using a pressure transducer and an Arduino Uno board, which can communicate with a computer through LabVIEW and PLX-DAQ.

Two LabVIEW programs were developed: the first one allows the recording of pressure and velocity measurements, and has direct communication with the Arduino Uno using the add on "LabVIEW Interface for Arduino"; the second one performs a frequency analysis on a signal previously stored in a digital file generated by PLX-DAQ, and outputs its amplitude spectrum. A digital barometer and a thermocouple were integrated into the acquisition system, allowing the automated computation of air density. It was developed a periodic acquisition method which allows a maximum sampling rate of 83 Hz.

This system was used to record velocity profiles in an air flow and successfully detected the vortex shedding in the wake of a cylinder immersed in an air flow. Moreover, the system succeeded in the experimental determination of the frequency of the vortex shedding.

The acquisition system is available for future work in the Laboratory of Fluid Dynamics and Applied Thermodynamics at DEMI, FCT NOVA and can be used to measure permanent or transient flows with moderate temporal variations.

---

## Keywords

Pressure transducer  
Arduino  
Velocity measurement  
Frequency analysis  
Automated acquisition  
Time series



# Índice

<b>Agradecimentos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumo</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xvi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xvii</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	1
1.3 Estrutura . . . . .	1
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>3</b>
2.1 Conceitos de Dinâmica de Fluidos . . . . .	3
2.1.1 Tubo de Prandtl . . . . .	3
2.1.2 Estrada de Vórtices de Von Karman . . . . .	4
2.2 Aquisição e tratamento de sinal . . . . .	4
2.2.1 Transdutores de pressão . . . . .	4
2.2.2 Placas de aquisição . . . . .	5
<b>3 Desenvolvimento do Sistema de Aquisição</b>	<b>7</b>
3.1 Considerações Gerais . . . . .	7
3.2 Placa de Aquisição . . . . .	8
3.3 Transdutor de Pressão . . . . .	8
3.3.1 Integração do transdutor de pressão com o Arduino Uno . . . . .	9
3.4 Medição da Temperatura . . . . .	9

3.5	Medição da pressão atmosférica . . . . .	9
3.6	Comunicação com o computador . . . . .	10
3.6.1	RegVel . . . . .	10
3.6.2	VortFreq . . . . .	10
3.7	Configuração Final . . . . .	12
3.8	Calibração e verificação de precisão . . . . .	14
3.8.1	Calibração do transdutor de pressão . . . . .	14
3.8.2	Verificação da precisão do barómetro digital . . . . .	14
3.8.3	Verificação da precisão do termopar . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Ensaaios Experimentais</b>	<b>17</b>
4.1	Determinação de perfis de velocidade à saída de uma conduta de ar . . . . .	17
4.1.1	Montagem . . . . .	17
4.1.2	Atravessamento . . . . .	17
4.1.3	Incerteza na medição . . . . .	18
4.1.4	Resultados . . . . .	19
4.2	Deteção do desprendimento de vórtices a jusante de um cilindro . . . . .	20
4.2.1	Escolha do diâmetro do cilindro . . . . .	21
4.2.2	Resultados . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>27</b>
5.1	Conclusão . . . . .	27
5.2	Trabalhos futuros . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Anexos</b>	<b>31</b>

# Lista de Figuras

2.1	Tubo de Prandtl. (adaptado) [12]	3
2.2	Relação entre ângulo de ataque do tubo de Prandtl e o erro que este introduz na medição da pressão estática e de estagnação. (adaptado) [12]	4
2.3	Estrada de Vórtices de Von Karman. [12]	5
3.1	Tratamento de dados - esquema	8
3.2	Aquisição de pressão diferencial pelo transdutor de pressão a uma frequência de aquisição de 50 Hz	11
3.3	Exterior da caixa feita para o sistema de aquisição	12
3.4	Interior da caixa feita para o sistema de aquisição	12
3.5	LCD - Mostra a velocidade do ar, pressão diferencial, temperatura e pressão atmosférica.	13
3.6	Esquema das ligações	13
3.7	Esquema da montagem utilizada na calibração do transdutor de pressão	14
3.8	Termopar em gelo e em água em ebulição	16
4.1	Esquerda, tubo de Pitot posicionado à saída da conduta de ar. Direita, vista geral da montagem.	17
4.2	Trajetória diagonal - espaçamento de 4.3 mm entre cada ponto.	18
4.3	Incerteza no cálculo da velocidade mantendo a massa volúmica constante a $1.14 \text{ kg/m}^3$	19
4.4	Perfil de velocidades adimensional. $V_{max} = 10.7 \text{ m/s}$ $Re_D = 9.15 \cdot 10^4$	20
4.5	Perfil de velocidades adimensional com redução de caudal. $V_{max} = 3.6 \text{ m/s}$ $Re_D = 3.09 \cdot 10^4$	20
4.6	Cilindro em pvc montado no túnel aerodinâmico do LMFTA.	21
4.7	Posição do tubo de Pitot em relação ao cilindro em pvc, montado no túnel aerodinâmico do LMFTA.	22
4.8	Posição do tubo de Pitot que gerou resultados positivos.	22
4.9	Posição da tomada estática montada no cilindro em pvc.	23
4.10	Série temporal do ensaio a 4 m/s	24
4.11	Espectro de amplitude do ensaio a 4 m/s (desprendimento teórico: 7.64Hz)	24

4.12	Série temporal do ensaio a 3 m/s . . . . .	25
4.13	Espectro de amplitude do ensaio a 3 m/s (desprendimento teórico: 5.73Hz) . . . . .	25
4.14	Série temporal do ensaio a 5 m/s . . . . .	26
4.15	Espectro de amplitude do ensaio a 5 m/s (desprendimento teórico: 9.55Hz) . . . . .	26
6.1	Anexo D - Ligações do sistema de aquisição . . . . .	37
6.2	Anexo E - Painel de utilizador do programa RegVel feito em LabVIEW. . . . .	38
6.3	Anexo F - Esquema de blocos do programa RegVel feito em LabVIEW. . . . .	39
6.4	Anexo G - Painel de utilizador do programa VortFreq feito em LabVIEW. . . . .	40
6.5	Anexo H - Esquema de blocos do programa VortFreq feito em LabVIEW. . . . .	41

# Lista de Tabelas

3.1	Calibração do transdutor de pressão . . . . .	15
3.2	Pressões obtidas com o Barómetro de Torricelli e o barómetro digital. . . . .	15
3.3	Dados estatísticos - calibração do barómetro digital . . . . .	15
3.4	Calibração do termopar . . . . .	16



# Nomenclatura

## Símbolos latinos

$P$	Pressão absoluta [Pa]
$p_s$	Pressão estática [Pa]
$p_0$	Pressão de estagnação [Pa]
$g$	Aceleração gravítica [ $m \cdot s^{-2}$ ]
$V$	Velocidade [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$z_s$	Cota da tomada de pressão estática [m]
$z_0$	Cota da tomada de pressão de estagnação [m]
$R$	Constante dos gases perfeitos (ar) [ $J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$T$	Temperatura [K]
$Re$	Número de Reynolds
$St$	Número de Strouhal
$f$	Frequência de desprendimento de Vórtices [Hz]
$D$	Diâmetro [m]
$r$	raio [m]
$Ref_{acc}$	Reference accuracy
$Res_{ard-transd}$	Resolução da leitura proveniente do transdutor de pressão através do Arduino Uno

## Símbolos gregos

$\rho$	Massa volúmica [ $J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$\nu$	Viscosidade cinemática [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]
$\Delta$	Incerteza

## Siglas

BFSL	Best fit straight line
FS	Full scale
LCD	Liquid crystal display
LIFA	LabVIEW Interface for Arduino
CFD	Computational fluid dynamics
LMFTA	Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica Aplicada
DC	Direct current
USB	Universal serial bus

# 1 | Introdução

## 1.1 Motivação

Foi proposto ao autor o desenvolvimento de um sistema de aquisição que integrasse uma placa Arduino Uno e um transdutor de pressão. Foi uma oportunidade de explorar as capacidades desta placa na área científica, e a sua integração com um equipamento industrial.

Simultaneamente, o autor teve a oportunidade de trabalhar nas áreas da automação, programação e eletrónica, áreas com as quais estava pouco familiarizado, mas nas quais tem bastante interesse.

## 1.2 Objetivos

Ao longo do trabalho procurou-se atingir três tipos de objetivos: de carácter técnico, científico e formativo.

Objetivos técnicos:

- Desenvolver uma interface entre um transdutor de pressão e uma placa Arduino Uno, que permita a visualização e registo em tempo real de valores de pressão e velocidade de ar, com e sem o auxílio de um computador.

Objetivos científicos:

- Estudo experimental de escoamentos de ar.
- Medição de pressão e velocidade em escoamentos de ar.
- Detecção do desprendimento alternado de vórtices a jusante de um cilindro.

Objetivos formativos:

- Utilização do software LabVIEW da National Instruments.
- Utilização da plataforma Arduino.
- Expansão de conhecimentos de eletrónica, programação e de aquisição e tratamento de dados.

## 1.3 Estrutura

Este documento encontra-se organizado em cinco capítulos.

No presente capítulo, introdução, são explicitados objetivos a atingir, aspectos motivacionais e a estrutura do documento.

O segundo capítulo trata a revisão bibliográfica, onde são apresentados os conceitos de dinâmica de fluídos e de aquisição e tratamento de sinais, os quais são fundamentais ao desenvolvimento do trabalho.

O terceiro capítulo apresenta o desenvolvimento do sistema de aquisição, descrevendo a montagem do sistema, os componentes e o seu funcionamento ao nível do utilizador.

O quarto capítulo, apresenta os ensaios experimentais e os resultados encontrados.

Por último, no quinto capítulo é feita uma reflexão/conclusão do trabalho desenvolvido.

## 2 | Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, apresentam-se os conceitos fundamentais utilizados no desenvolvimento do trabalho. Foi necessário dividir estes conceitos em duas secções. Na primeira secção encontram-se os conceitos de dinâmica de fluidos, onde se expõe o funcionamento dos tubos de Prandtl e de Pitot e se descreve o fenómeno da estrada de vórtices de Von Karman. A segunda secção refere-se à aquisição e tratamento de sinais.

### 2.1 Conceitos de Dinâmica de Fluidos

#### 2.1.1 Tubo de Prandtl

O tubo de Prandtl é um instrumento utilizado para medir a velocidade de um escoamento em meio gasoso ou líquido, num ponto. É comum ver-se este instrumento na fuselagem de aeronaves ou na carroçaria de carros de Formula 1. Na indústria, é usado para medir velocidades em escoamentos no interior de tubos e condutas, entre outras aplicações.

O valor da velocidade é calculado através da medição da diferença entre dois valores de pressão. Como se observa na figura 2.1, o tubo de Prandtl tem tomadas de pressão laterais, onde é obtida a pressão estática  $p_s$ , e uma frontal, onde é medida a pressão de estagnação ou pressão total  $p_0$ . A velocidade em  $p_0$  é nula.

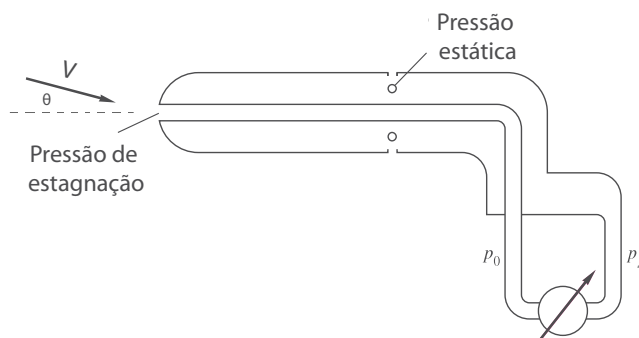


Figura 2.1: Tubo de Prandtl. (adaptado) [12]

Considerando-se regime permanente, escoamento incompressível e escoamento invíscido, pode ser aplicada a Equação de Bernoulli ao longo de uma linha de corrente que seja paralela ao escoamento não perturbado e que termine à superfície da tomada de estagnação, tendo-se:

$$p_s + \frac{1}{2}\rho gV^2 + \rho gz_s = p_0 + \frac{1}{2}\rho g(0) + \rho gz_0 \quad (2.1)$$

Desprezando a diferença de cota entre as tomadas de pressão a velocidade é obtida pela expressão:

$$V = \left[ 2 \frac{(p_0 - p_s)}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

A figura 2.2 relaciona o ângulo de ataque  $\theta$  do eixo do tubo de Prandtl em relação ao escoamento não perturbado com o erro introduzido em  $p_0$  e  $p_s$ . Verifica-se que ângulos superiores a  $5^\circ$  tornam a leitura de pressão imprecisa, pelo que é necessário um cuidado especial no alinhamento do tubo de Prandtl com o escoamento. [12]

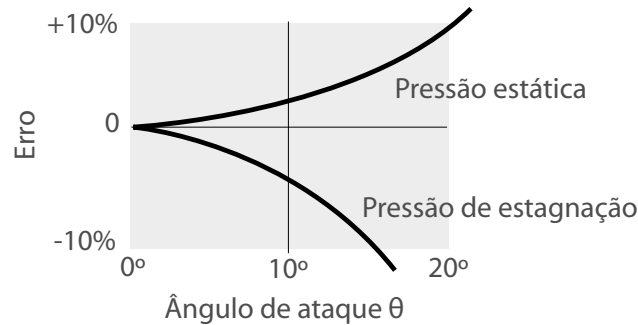


Figura 2.2: Relação entre ângulo de ataque do tubo de Prandtl e o erro que este introduz na medição da pressão estática e de estagnação. (adaptado) [12]

O princípio de funcionamento de um tubo de Pitot é igual ao de um tubo de Prandtl; a diferença reside no facto de o primeiro ter apenas uma tomada de pressão de estagnação.

A diferença entre a pressão estática e a pressão de estagnação pode ser traduzida num valor de velocidade através da utilização de um manómetro devidamente calibrado. Pode também ser convertida num sinal eléctrico por um transdutor de pressão; este sinal eléctrico é utilizado posteriormente para obter um valor de velocidade. Neste trabalho é utilizado um transdutor de pressão.

### 2.1.2 Estrada de Vórtices de Von Karman

Dá-se o nome de Estrada de Vórtices de Von Karman aos vórtices que são gerados na esteira de um corpo tipicamente rombo, quando este é colocado num escoamento normal à sua superfície. Na figura 2.3 observa-se a ocorrência deste fenómeno na esteira de um cilindro. Este comportamento periódico do escoamento é caracterizado pelo número de Strouhal, que relaciona a frequência do desprendimento de vórtices  $f$ , com a velocidade do escoamento não perturbado  $V$  e a dimensão característica do corpo  $L$ :

$$\text{Número de Strouhal } St = \frac{fL}{V} \quad (2.3)$$

Para um cilindro, a dimensão característica é o seu diâmetro  $D$ , e quando  $10^2 < Re < 10^7$ , pode ser considerado um número de Strouhal médio igual a 0.21 [12].

## 2.2 Aquisição e tratamento de sinal

### 2.2.1 Transdutores de pressão

Um transdutor de pressão é um dispositivo que converte um valor de pressão num sinal eléctrico analógico. Os transdutores de pressão mais comuns utilizam um extensómetro associado



Figura 2.3: Estrada de Vórtices de Von Karman. [12]

a um diafragma para cumprir a sua função. A pressão a que o diafragma está sujeito deforma o extensómetro, alterando a resistência elétrica deste. O *output* elétrico de um transdutor pode traduzir-se numa variação em voltagem ou em corrente. Um output em corrente de 4 a 20 mA é muito utilizado na indústria pois é pouco afetado pelo ruído elétrico típico e pela resistência de cabos de ligação. [3]

### 2.2.2 Placas de aquisição

A generalidade das placas de aquisição efetuam a conversão de um sinal elétrico analógico num sinal digital que pode ser processado por um computador. Um *chip* conversor analógico-digital fornece uma representação digital de um sinal analógico referente a um instante de tempo; a placa de aquisição recolhe assim amostras periódicas, que são posteriormente utilizadas para reconstruir o sinal original (agora discretizado) no computador, através da imposição de uma frequência de aquisição.



# 3 | Desenvolvimento do Sistema de Aquisição

Neste capítulo apresenta-se o desenvolvimento do sistema de aquisição. É feita a descrição de cada um dos componentes e como estes interagem entre si. Apresentam-se os programas desenvolvidos para LabVIEW, e como estes permitem o registo de perfis de velocidade e a deteção de vórtices na esteira de um cilindro. Descrevem-se as calibrações e estimativas de erro que foram necessárias para fazer alguns componentes.

## 3.1 Considerações Gerais

O sistema de aquisição foi desenvolvido com o objetivo de permitir (através do uso de um transdutor de pressão associado a uma placa Arduino Uno) a observação em tempo real de valores de velocidade do ar e da pressão diferencial num LCD, e o respetivo registo e visualização destes valores em computador. A aquisição e tratamento de dados no computador foi feita integrando a placa Arduino Uno com o software LabVIEW. Pretendendo-se que o LCD funcione mesmo quando se está a adquirir valores no computador e existindo incompatibilidades entre o LCD e o LabVIEW, optou-se pela utilização de duas placas Arduino Uno na montagem. A primeira, que se passa a referir como *Arduino 1*, controla o LCD e gere as informações que aqui são exibidas. A segunda, que se passa a referir como *Arduino 2* funciona apenas quando é conectada via USB (Universal serial bus) a um computador e permite comunicação com este.

A equação 2.2 mostra que, para o cálculo da velocidade do ar com o tubo de Prandtl/Pitot, é necessária a medição da diferença de pressão entre a tomada estática e a tomada de estagnação, e a massa volúmica do ar. A pressão diferencial foi medida com o transdutor de pressão. Para obter o valor de massa volúmica do ar, optou-se pela automação do cálculo deste valor utilizando a Lei dos Gases Perfeitos. Com  $R = 287 \text{ J/kg.K}$ , sabendo a pressão absoluta e a temperatura a que o ar está sujeito, a massa volúmica é obtida pela expressão:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (3.1)$$

Utilizando dois sensores para Arduino, obtêm-se valores de temperatura (termopar) e pressão atmosférica (barómetro digital colocado na atmosfera). É importante ter em conta que, ao ser utilizado o valor da pressão atmosférica para o cálculo da massa volúmica, apenas se poderá calcular velocidades em escoamentos à pressão atmosférica. Em escoamentos no interior de condutas com uma pressão estática diferente da pressão atmosférica, será necessário posicionar o barómetro digital dentro da conduta ou alterar o código do Arduino 1, colocando manualmente o valor da massa volúmica do ar.

Na figura 3.1 representa-se em esquema a troca de informações no sistema de aquisição por forma a cumprir as especificações.

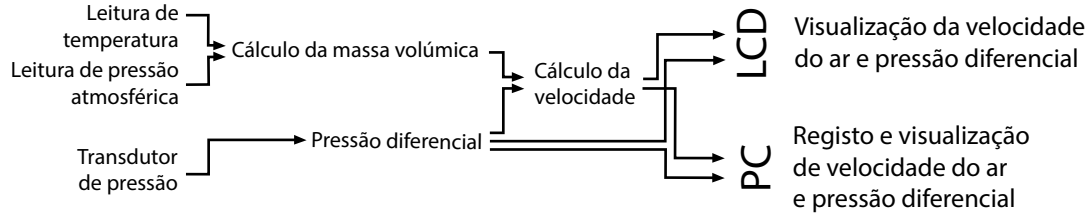


Figura 3.1: Tratamento de dados - esquema

## 3.2 Placa de Aquisição

Para adquirir o sinal elétrico analógico proveniente do transdutor de pressão, foi utilizada uma placa Arduino Uno. É necessário referir que as capacidades da placa Arduino Uno vão muito para além de uma simples aquisição de sinal elétrico analógico, permitindo a associação de diversos componentes periféricos, como o LCD, o barómetro digital e o termopar, utilizados neste trabalho.

A opção por uma placa Arduino Uno ficou a dever-se ao facto de ser de fácil utilização e de custo acessível. Uma placa Raspberry Pie poderia também ter sido utilizada, no entanto, tem um custo superior e uma complexidade acrescida, desnecessária para o sistema de aquisição em causa. Outra opção poderia ter sido uma placa de aquisição específica para LabVIEW, mas para além de ter também um custo superior, não permite funcionamento com um LCD, impedindo o funcionamento independente de um computador.

O Arduino Uno dispõe de 5 pinos analógicos que permitem ler a diferença de potencial entre cada um destes e o pino Ground, desde que o valor a adquirir se encontre entre 0 e 5 V. O conversor analógico-digital de 10 bits do Arduino Uno converte o sinal elétrico analógico em  $2^{10} = 1024$  valores discretos.

## 3.3 Transdutor de Pressão

O transdutor de pressão utilizado foi um OMEGA PX154, que pode ser utilizado para realizar medições em meio gasoso ou líquido. Tem duas tomadas de pressão (LOW e HIGH) e mede a diferença entre estas, dentro de uma gama de 0 Pa até 249 Pa. Esta gama de pressão permite medir velocidades de escoamentos de ar de 0 a 20.1 m/s. Este transdutor tem um tempo de resposta de 100ms e o fabricante assegura uma precisão de  $\pm 0,75\%$  BFS (best fit straight line). [7]

A sua precisão de referência,  $Ref_{acc}$ , é dada por:

$$Ref_{acc} = 0.75\% \cdot gama$$

Sendo a gama deste sensor 249 Pa.

$$Ref_{acc} = 0.75\% \cdot 249 = 1.8675 Pa$$

Este transdutor de pressão requer uma tensão de alimentação compreendida entre 18 V e 30 V e produz um sinal de saída com uma intensidade de corrente que varia linearmente com a pressão diferencial lida, entre 4 e 20 mA. Foi utilizada uma fonte de alimentação AC-DC da Mean Well modelo RS-25-24, com uma tensão de saída de 24 V.

### 3.3.1 Integração do transdutor de pressão com o Arduino Uno

Como referido na secção 3.2, o Arduino Uno tem a capacidade de medir diferenças de potencial e não valores de intensidade de corrente. Sendo que o output do transdutor de pressão varia em intensidade de corrente, torna-se necessário converter este valor num valor de potencial. A Lei de Ohm permite calcular a diferença de potencial entre os pinos de uma resistência se o valor de intensidade de corrente e resistência forem conhecidos. Fazendo corresponder 0,02 A a 5 V (249 Pa), pela Lei de Ohm tem-se:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{5}{0.02} = 250 \Omega$$

Foram assim associadas duas resistências de precisão em filme metálico ( $150+100 \Omega \pm 1\%$ ). Desta forma, calcula-se a tensão que corresponde a 4mA ou uma leitura de 0 Pa:

$$RI = V = 250 \cdot 0.004 = 1V$$

Assim, a leitura variará linearmente entre 1 V (0 Pa) e 5 V (249 Pa).

O conversor analógico-digital do Arduino Uno de 10 bits discretiza o sinal proveniente do transdutor de pressão em  $2^{10} = 1024$  valores, divididos igualmente numa escala de 0 a 5 V DC. A resolução analógica é então:

$$Res_{analog} = \frac{Tensão}{Resolução} = \frac{5}{1023} = 0.0049 \left[ \frac{V}{nível} \right]$$

A resolução atingida na leitura proveniente do transdutor de pressão através do Arduino Uno é dada por:

$$Res_{ard-transd} = Res_{analog} \cdot \frac{gama}{Tensão} = 0.0049 \left[ \frac{V}{nível} \right] \cdot \frac{249 [Pa]}{4 [V]} = 0.31 \left[ \frac{Pa}{nível} \right]$$

Sendo que  $Ref_{acc} > Res_{ard-transd}$  verifica-se que a precisão das medições de pressão feitas pelo transdutor de pressão serão limitadas pela precisão de referência do transdutor e não pelo conversor analógico-digital do Arduino Uno.

## 3.4 Medição da Temperatura

A medição da temperatura foi conseguida por um termopar tipo K associado a uma *break out board* para Arduino. O contacto entre dois condutores de ligas diferentes, induz uma diferença de potencial dependente da temperatura, típica dos termopares. Foi utilizado um termopar da SparkFun que contém dois condutores de Cromel e Alumel e permite ler uma gama de temperaturas de 0 °C a 400 °C [11]. A conversão em temperatura foi feita por um *SparkFun MAX31855K Thermocouple Breakout* o qual tem uma precisão de  $\pm 2^\circ\text{C}$  e necessita de uma tensão de alimentação de 3 a 3.6 V.[10]

## 3.5 Medição da pressão atmosférica

A medição da pressão atmosférica foi conseguida através de um barómetro digital que contém uma *Break out board* com um sensor piezo-resistivo da Bosh, BMP280. Funciona numa gama de pressão absoluta de 30000 a 110000 Pa e tem uma precisão de  $\pm 100$  Pa [9]; a tensão de alimentação deste sensor é de 3 V.

## 3.6 Comunicação com o computador

A comunicação com o computador foi feita com o objetivo de ser possível gerar ficheiros de velocidade e pressão diferencial.

Foi escolhido o software LabVIEW para conectar o Arduino Uno ao computador. O LabVIEW é um software que, através de uma programação gráfica, permite realizar testes, medições e controlo a partir de dados, e que permite o desenvolvimento de interfaces de utilizador personalizadas. Permite a integração do Arduino Uno e manipulação em tempo real dos valores adquiridos no mesmo. Foram criados dois programas em LabVIEW, sendo que o primeiro, denominado RegVel, regista séries temporais de valores de velocidade ou pressão diferencial e traça o respetivo gráfico e o segundo, de nome VortFreq, deteta o desprendimento vorticular na esteira de um cilindro, através de uma análise em frequência.

A integração do Arduino 2 com o LabVIEW foi feita utilizando um *add on* para LabVIEW denominado LabVIEW Interface for Arduino (LIFA). É um *add on* que permite, entre outras funcionalidades, que sejam lidos os pinos analógicos do Arduino Uno diretamente no LabVIEW. O Arduino 2 foi programado com um código que suporta o LIFA, o qual fica guardado no computador quando se instala este *add on*.

### 3.6.1 RegVel

Este código, desenvolvido no âmbito deste trabalho, permite registar e visualizar, em tempo real, séries de valores de velocidade e pressão diferencial e exportá-los para fora do ambiente LabVIEW. Pretendeu-se desta forma facilitar o registo de ficheiros, por exemplo, de perfis de velocidade.

Observa-se, na figura 3.2, que o sinal proveniente do transdutor de pressão apresenta um ruído cuja amplitude é da ordem de  $Res_{ard-transd}$ , ou seja, a discretização de 10 bits produz um sinal com precisão semelhante à intensidade do ruído presente. Desta forma, a aquisição de um único valor proveniente do transdutor de pressão terá sempre um erro associado. Assim, ao invés de registar apenas um valor, o programa regista vários e faz a sua média, reduzindo o erro. O utilizador pode escolher a frequência e o tempo de amostragem.

Como referido na secção 3.1, o cálculo da massa volúmica do ar foi automatizado através da utilização de medições de temperatura e de pressão atmosférica. No entanto, não foi possível integrar os sensores para Arduino que medem estas variáveis no ambiente LabVIEW, devido a incompatibilidades das respetivas *libraries* com o LIFA. Assim, apenas será possível usufruir desta automação na leitura de velocidade pelo LCD. No LabVIEW, solucionou-se este problema permitindo uma introdução manual destas variáveis, ou colocando manualmente um valor para a massa volúmica do ar. Por forma a permitir a visualização dos valores de pressão atmosférica e de temperatura em tempo real, estes também foram integrados no LCD do sistema de aquisição, para além da velocidade do ar e da pressão diferencial lida pelo transdutor de pressão.

Nos anexos E e F encontram-se, respetivamente, o painel de utilizador e o esquema de blocos deste programa, que foram desenvolvidos pelo autor.

### 3.6.2 VortFreq

Este programa foi desenvolvido com o objetivo de detetar o fenómeno da Estrada de Vórtices de Von Karman, descrito na secção 2.1.2.

O fenómeno da Estrada de Vórtices de Von Karman é caracterizado pelo desprendimento alternado de vórtices na esteira de corpo tipicamente rombo, quando este se encontra

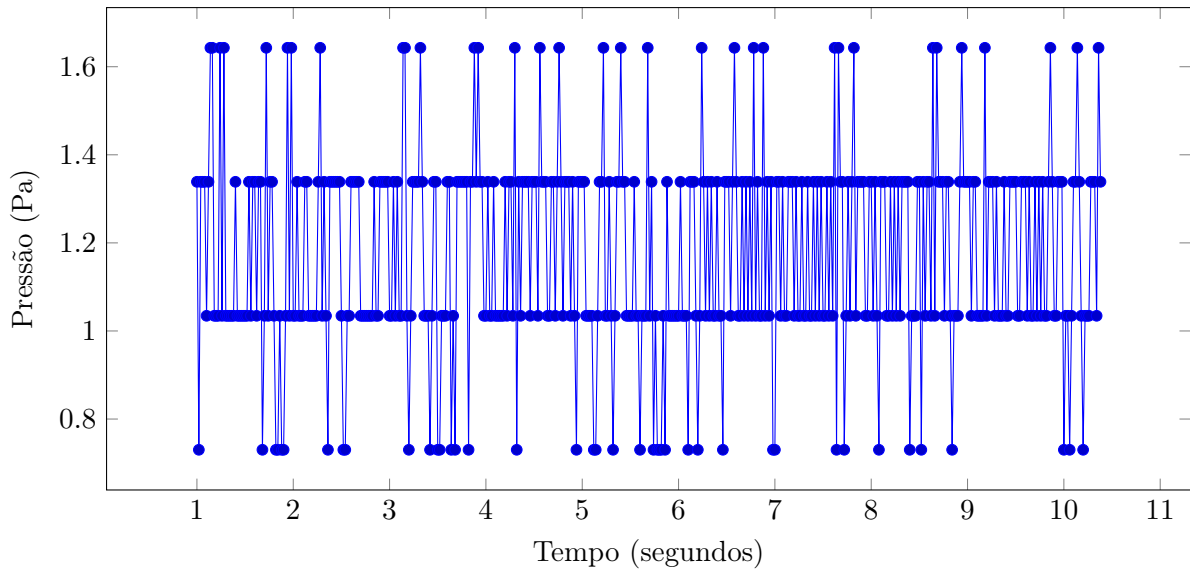


Figura 3.2: Aquisição de pressão diferencial pelo transdutor de pressão a uma frequência de aquisição de 50 Hz

imerso num escoamento normal à sua superfície. São geradas flutuações periódicas na pressão e na velocidade na esteira do corpo, que oscilam a uma frequência correlacionada com o desprendimento de vórtices.

Utilizando o sistema de aquisição desenvolvido, pretende-se determinar a frequência da oscilação de pressão, evidenciando a presença de vórtices. Partindo da aquisição da variação de pressão, através de uma Fast Fourier Transform (FFT), obtém-se um espectro de amplitude, que evidencia a frequência fundamental do sinal em análise. O anexo A apresenta a FFT e os cuidados a ter na amostragem de um sinal para ser processado por este algoritmo. A utilização da FFT pressupõe a amostragem periódica do sinal.

Sendo necessária a amostragem periódica do sinal, não foi utilizado o LIFA, que estando condicionado ao relógio interno do sistema operativo Windows, poderia introduzir atrasos aleatórios na captura do sinal e, conseqüentemente, erros na análise em frequência. O *timing* de aquisição fica sob o controlo do Arduino Uno e da sua função *millis()*, que se considerou suficientemente precisa para este trabalho. Para adquirir o sinal foi utilizado o *add on* para Microsoft Excel PLX-DAQ que lê o *serial monitor* do Arduino Uno e guarda os valores dentro de uma folha de cálculo para futuras manipulações. Posteriormente é exportado um ficheiro digital (.csv) que será interpretado pelo LabVIEW que fará a análise em frequência. Para ser possível a comunicação entre o *add on* PLX-DAQ e o Arduino 2, este teve de ser programado com o código desenvolvido pelo autor que está presente no anexo B, e permite uma frequência de aquisição periódica máxima de 83 Hz. Para além desta frequência, começam a ocorrer atrasos no *timing* da amostragem.

O programa VortFreq permite visualizar o sinal adquirido e escolher uma janela de  $2^n$  valores à qual se aplica a FFT; este verifica se o intervalo de tempo entre amostras é constante, prevenindo algum erro introduzido pelo Arduino Uno durante a aquisição do sinal; traça ainda o respetivo espectro de amplitude, permitindo visualizar a frequência fundamental do sinal em análise.

Nos anexos G e H encontram-se, respetivamente, o painel de utilizador e o esquema de blocos deste programa que foram desenvolvidos pelo autor.

### 3.7 Configuração Final

Para dar um aspeto profissional à montagem, facilitar o seu manuseamento e proteger os diferentes componentes, optou-se pela fabricação de uma caixa. Foi cortada a laser a planificação de uma caixa em MDF de 3mm de espessura no Fab-Lab da FCT NOVA.

A figura 3.3 permite visualizar o exterior da caixa desenvolvida; do lado esquerdo, tem-se acesso à tomada LOW do transdutor de pressão, a um botão de corte de geral de corrente e à conexão da tomada de eletricidade; do lado direito tem-se acesso à tomada HIGH do transdutor de pressão e à saída USB do Arduino 2, para conectar ao computador; na parte de cima, encontra-se o LCD, um botão que alterna o seu modo de operação e o acesso à tampa do transdutor de pressão, permitindo a sua calibração sem ser necessário acesso ao interior da caixa; na parte de trás foi feito um suporte para o termopar.

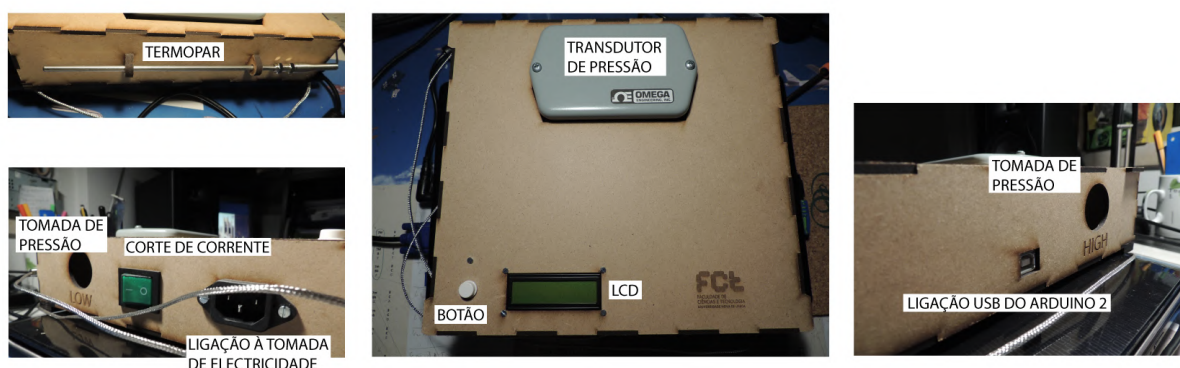
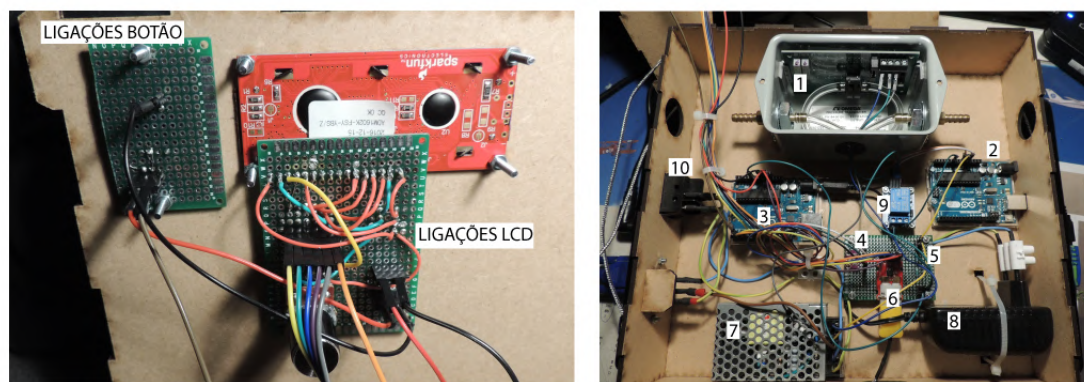


Figura 3.3: Exterior da caixa feita para o sistema de aquisição

Na figura 3.4 encontra-se a vista interior da caixa do sistema de aquisição.



1. Transdutor de pressão 2. Arduino 2 3. Arduino 1 4. Barómetro digital 5. Resistências de precisão 6. Breakout board do termopar 7. Fonte de alimentação do transdutor de pressão 8. Fonte de alimentação do Arduino 1 9. Relé 10. Corte de corrente principal

Figura 3.4: Interior da caixa feita para o sistema de aquisição

A figura 3.5 permite visualizar os dois modos de operação do LCD. O modo 1 permite visualizar a leitura de velocidade do ar e de pressão diferencial; o modo 2 permite visualizar as leituras de temperatura e de pressão atmosférica; um botão localizado do lado esquerdo do LCD permite alternar entre estes dois modos.

Tal como com o transdutor de pressão, também se verificou a presença de ruído nas leituras de temperatura e de pressão atmosférica, dificultando a leitura de valores pelo LCD. Assim, foi introduzida uma média móvel de 30 valores no código do Arduino 1, que faz um

*smoothing* aos valores que são apresentados no LCD, permitindo a sua leitura, sem introduzir um atraso significativo nos valores mostrados.

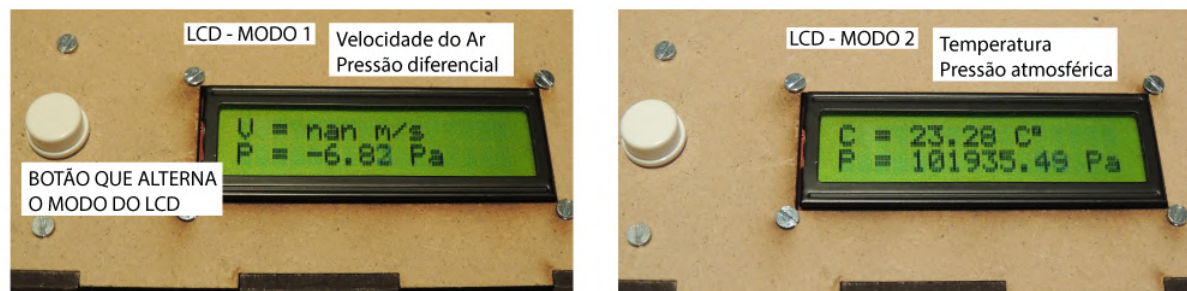


Figura 3.5: LCD - Mostra a velocidade do ar, pressão diferencial, temperatura e pressão atmosférica.

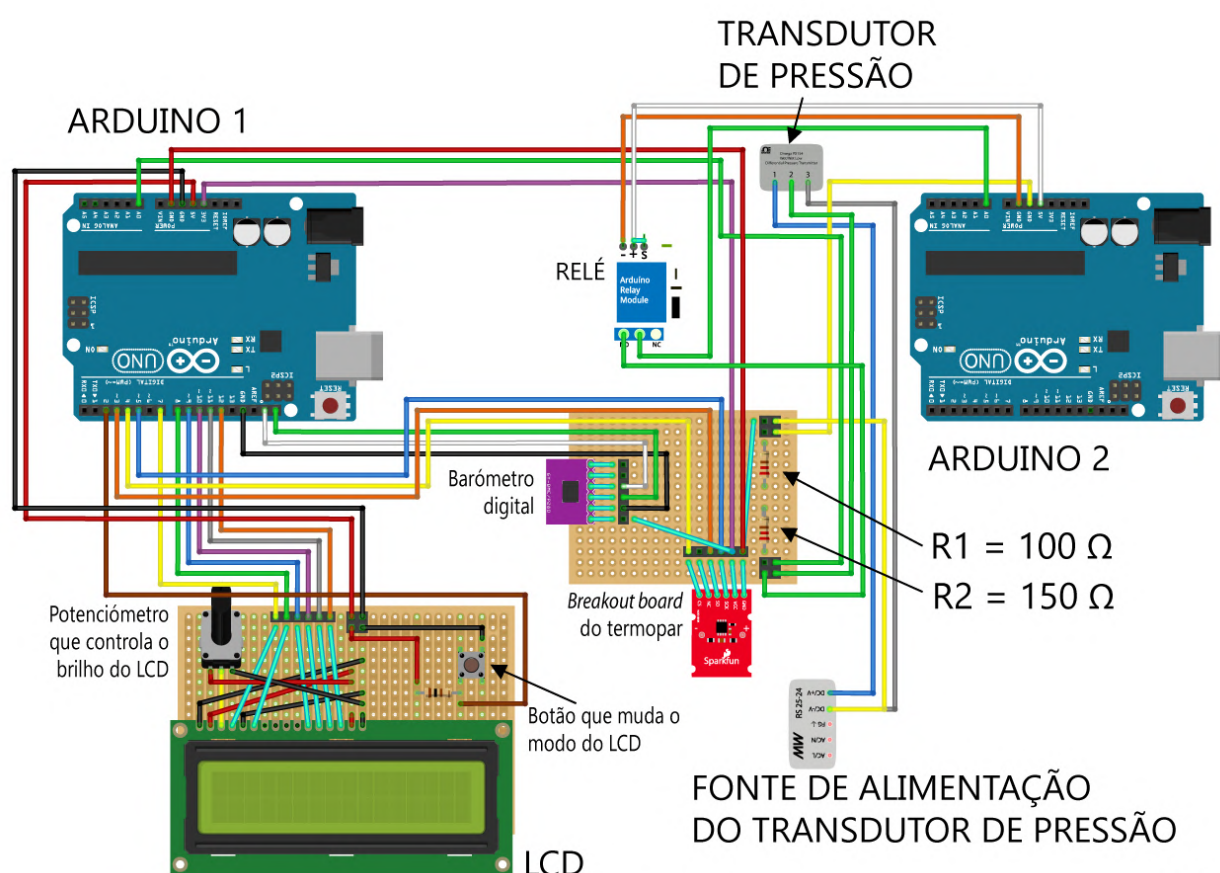


Figura 3.6: Esquema das ligações

A figura 3.6 representa as ligações entre os diferentes componentes. O termopar e o barómetro digital, foram conectados apenas ao Arduino 1; tanto o Arduino 1 como o Arduino 2 medem a diferença de potencial nos terminais das resistências 1 e 2; foi necessário colocar um dispositivo que corte a comunicação entre o Arduino 2 e o transdutor de pressão quando não se pretende ligar o sistema ao computador, pois o Arduino 2, quando desligado introduz um erro na medição feita pelo Arduino 1; foi instalado um relé que corta a ligação entre o Arduino 2 e o transdutor de pressão quando se funciona sem computador; Na figura 3.6 não se encontram representados o termopar, o sistema de alimentação de electricidade do Arduino 1 e a fonte de alimentação do transdutor de pressão. No anexo D encontra-se um esquema alternativo destas

ligações.

O Arduino 1 foi programado com o código desenvolvido pelo autor que está presente no anexo C.

## 3.8 Calibração e verificação de precisão

Por forma a assegurar o correto funcionamento do sistema de aquisição e a fiabilidade dos valores aqui apresentados, foi necessário verificar se alguns componentes se encontravam devidamente calibrados.

### 3.8.1 Calibração do transdutor de pressão

Para esta calibração foi utilizado o programa de LabVIEW de nome RegVel. Comparou-se a leitura de um Manómetro de Betz com a leitura do sistema de aquisição. As tomadas de pressão do Manómetro de Betz e do transdutor de pressão foram conectadas a um tubo de Prandtl colocado no túnel aerodinâmico do Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica Aplicada (LMFTA) do DEMI da FCT NOVA . A figura 3.7 ilustra em esquema esta montagem.

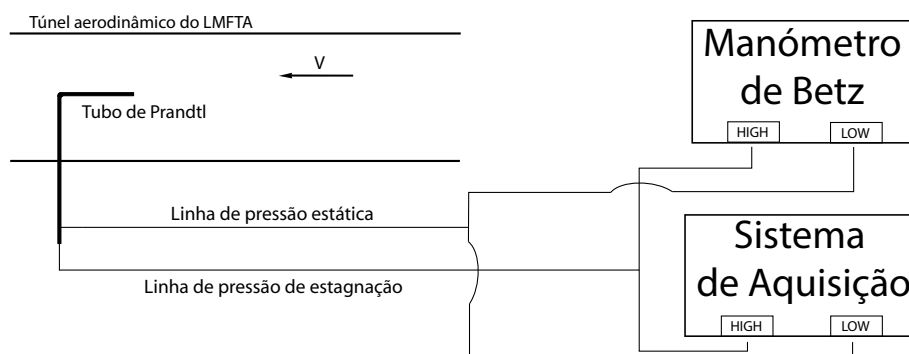


Figura 3.7: Esquema da montagem utilizada na calibração do transdutor de pressão

O transdutor de pressão contém dois potenciômetros que permitem a sua calibração, sendo que o primeiro ajusta o zero e o segundo ajusta o ganho. Fez-se corresponder o valor lido no Manómetro de Betz com o valor lido no LabVIEW, ajustando o potenciômetro do zero a 0 Pa e o potenciômetro do ganho a 100 Pa, dentro de uma incerteza de  $\pm 1$  Pa . O fabricante do manómetro de Betz assegura uma resolução de 0.1 Pa [1]. Tendo em conta que a menor escala analógica é de 1 Pa, considera-se uma incerteza na medição com o manómetro de Betz de 0.5 Pa.

A figura 3.2 mostra o ruído do sinal numa aquisição feita a 50 Hz. Verifica-se que uma média feita numa janela de 5 segundos reduz eficazmente o ruído. O programa RegVel capturou assim 250 amostras por ponto de calibração e fez a sua média. Após algumas iterações, o resultado final da calibração do transdutor de pressão foi resumido na tabela 3.1.

### 3.8.2 Verificação da precisão do barómetro digital

Este sensor não contém potenciômetros de ajuste pelo que foi feita uma verificação da sua precisão. Tomou-se como referência um Barómetro de Torricelli que se encontra no LMFTA

Tabela 3.1: Calibração do transdutor de pressão

Pressão (Manómetro de Betz) $\pm 0.5$ Pa	Pressão (Transdutor de Pressão) $\pm 0.6$ Pa	$\tilde{\chi}^2$ Pa
0	-0.499519	0.499519
50	50.1664	0.1664
100	99.9611	0.0389

o qual tem uma precisão nominal de 10 Pa [2]. Sendo que a pressão atmosférica é um valor que varia ao longo de grandes períodos de tempo foram registadas seis amostras em seis dias distintos. A tabela 3.2 lista as amostras recolhidas.

Tabela 3.2: Pressões obtidas com o Barómetro de Torricelli e o barómetro digital.

Pressão (Barómetro de Torricelli) $\pm 10$ Pa	Pressão (barómetro digital) $\pm 100$ Pa	Erro Pa
100779.2839	100885	-105.7161399
100789.2441	100904	-114.7558979
100550.1983	100662	-111.8017079
100458.9971	100565	-106,0028862
100904.0338	101014	-109.9661904
100900.3301	101014	-113.6699146

Tabela 3.3: Dados estatísticos - calibração do barómetro digital

Média do erro	Desvio Padrão $\sigma$	Variância $\sigma^2$
-110.3187895 [Pa]	3.822374844 [Pa]	14.61054945 [Pa]

Observa-se na tabela 3.3 que existe um erro sistemático cujo desvio padrão é baixo relativamente à precisão do barómetro digital. Assim, considerou-se adequada uma constante de correção igual à média da diferença entre o valor lido no Barómetro de Torricelli e o barómetro digital. Foi adicionada uma constante de correção igual a -110,318 Pa ao código do Arduino 1.

### 3.8.3 Verificação da precisão do termopar

Foi verificada a precisão do termopar colocando-o em meios cuja temperatura é antecipadamente conhecida. Nos três ensaios realizados ao nível do mar (Pressão atmosférica = 101929 Pa), foi utilizado um recipiente com gelo fundente, que se sabe estar a 0°C, e água em ebulição, que permanece a uma temperatura constante igual a 100 °C.

A tabela 3.4 mostra os resultados obtidos.

Detetou-se um erro sistemático que foi corrigido com a adição de uma constante de correção de -2 °C ao código do Arduino 1. A constante de correção é igual à média da diferença entre o valor lido com o termopar e a temperatura tabelada.

Tabela 3.4: Calibração do termopar

Temperatura tabelada [°C]	Temperatura no termopar $\pm 2$ [°C]	Erro [°C]
0	2	2
100	102.3	2.3
0	2.2	2.2
100	101.8	1.8
0	1.9	1.9
100	102.2	2.2



Figura 3.8: Termopar em gelo e em água em ebulição

## 4 | Ensaios Experimentais

Com o objetivo de demonstrar as potencialidades do sistema de aquisição desenvolvido, foram efetuados dois ensaios experimentais. O primeiro foi a determinação de perfis de velocidade à saída de uma conduta de ar e o segundo foi a detecção do desprendimento alternado de vórtices na esteira de um cilindro.

### 4.1 Determinação de perfis de velocidade à saída de uma conduta de ar

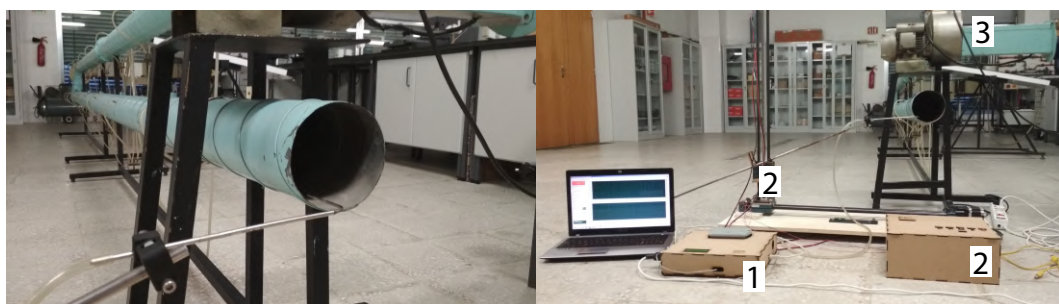
#### 4.1.1 Montagem

Foi utilizada uma conduta (tubo spiro) que já se encontrava montada no LMFTA. Tem 128 mm de diâmetro interior e tem um ventilador acoplado. O ventilador tem um mecanismo que permite controlar o caudal escoado na conduta.

Para obter a velocidade do escoamento à saída da conduta foi utilizado um tubo de Pitot conectado à tomada HIGH do transdutor de pressão, deixando a tomada LOW na atmosfera fora do escoamento. A pressão estática na secção de saída da conduta é a atmosférica.

O posicionamento do tubo de Pitot foi feito automaticamente, utilizando um sistema de deslocamento bi-axial [8].

Na figura 4.1 pode ser visualizada a montagem utilizada.



1. Sistema de aquisição 2. Sistema de deslocamento bi-axial 3. Ventilador

Figura 4.1: Esquerda, tubo de Pitot posicionado à saída da conduta de ar. Direita, vista geral da montagem.

#### 4.1.2 Atravessamento

Os perfis de velocidade foram registados utilizando o programa RegVel. Foram registados 30 pontos igualmente espaçados entre si, seguindo uma trajetória diagonal como ilustra a

figura 4.2.

Cada ponto resulta de uma média de 250 amostras capturadas a uma frequência de aquisição de 50 Hz, tal como se fez na calibração do transdutor de pressão, descrita no capítulo 3. Devido ao aquecimento do ventilador, esperou-se que a temperatura do escoamento estabilizasse antes de ser registado qualquer ponto.

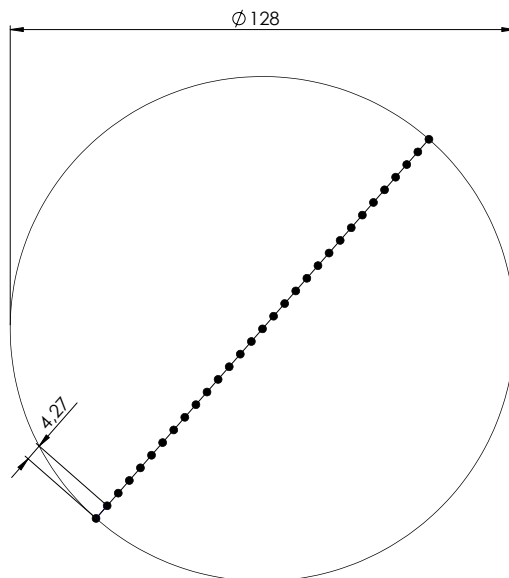


Figura 4.2: Trajetória diagonal - espaçamento de 4.3 mm entre cada ponto.

### 4.1.3 Incerteza na medição

Sendo o cálculo da velocidade função da medição da pressão diferencial, da temperatura e da pressão atmosférica, as quais têm as respetivas incertezas, torna-se necessário calcular a propagação da incerteza neste cálculo.

Seja R função de diferentes variáveis  $R(X,Y,..)$ , a incerteza de R depende da incerteza das suas variáveis através da seguinte relação [5]:

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\delta R}{\delta X} \Delta X\right)^2 + \left(\frac{\delta R}{\delta Y} \Delta Y\right)^2 + \dots} \quad (4.1)$$

#### Propagação de incerteza no cálculo da massa volúmica do ar

Aplicando a equação 4.1 à equação 3.1:

$$\Delta \rho = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{atm}}{RT}\right)^2 + \left(-\frac{P_{atm} \Delta T}{RT^2}\right)^2} \quad (4.2)$$

#### Propagação de incerteza no cálculo da velocidade do ar

Aplicando a equação 4.1 à equação 2.2:

$$\Delta V = \sqrt{\left(\Delta P \frac{\sqrt{P}}{P\sqrt{2}}\right)^2 + \left(-\frac{\sqrt{P}}{\rho\sqrt{2}}\right)^2 \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{atm}}{RT}\right)^2 + \left(-\frac{P_{atm} \Delta T}{RT^2}\right)^2}} \quad (4.3)$$

Foi utilizada a relação 4.3 para calcular a incerteza na medição da velocidade. A figura 4.3 permite observar que esta incerteza diminui com o aumento da velocidade.

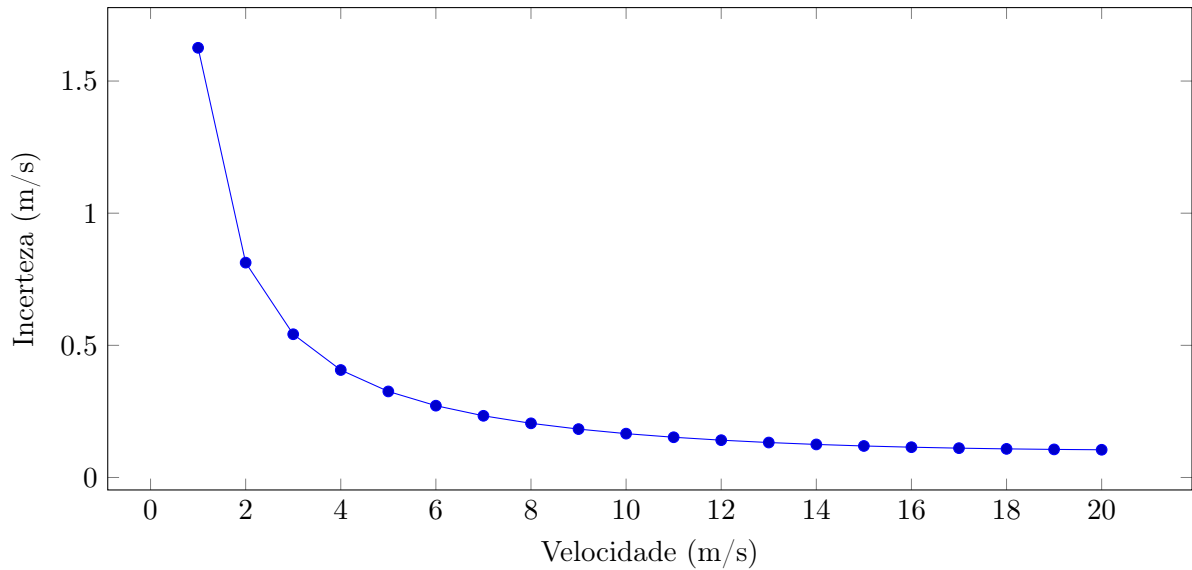


Figura 4.3: Incerteza no cálculo da velocidade mantendo a massa volúmica constante a  $1.14 \text{ kg/m}^3$

#### 4.1.4 Resultados

Foram traçados dois perfis de velocidade segundo uma trajetória diagonal. Foi feita a adimensionalização dos resultados, dividindo as ordenadas pela velocidade máxima registada e as coordenadas pelo raio da conduta. No primeiro, que se encontra ilustrado na figura 4.4, utilizou-se o caudal máximo permitido pelo ventilador que resultou num perfil de turbulento com  $Re_D = 9.15 \cdot 10^4$ . No segundo, que se encontra ilustrado na figura 4.5, reduziu-se o caudal escoado pelo ventilador e resultou também num perfil turbulento com  $Re_D = 3.09 \cdot 10^4$ . A análise do Diagrama de Moody (Moody 1944) permitiu verificar que o escoamento em ambos os ensaios se encontra na zona turbulenta não completamente desenvolvida.

$$\text{Rugosidade relativa} = \frac{\epsilon}{D} = \frac{0.05}{128} = 0.000390625$$

Os perfis obtidos são semelhantes e apresentam alguma imprecisão, sendo que esta é mais forte no perfil registado com o caudal mais baixo. Alguns fatores que poderão ter contribuído para esta imprecisão são: a secção de saída da conduta não ser perfeitamente circular; a conduta em chapa construída em espiral, poderá ter dado alguma rotação ao escoamento e, conseqüentemente, introduzido um ângulo de ataque em relação ao tubo de Pitot, aumentando o erro na medição. Também é necessário referir que pela figura 4.3, conclui-se que a propagação da incerteza em velocidades inferiores a 2 m/s não é desprezível, e torna-se evidente no perfil representado na figura 4.5, em que as medições em velocidades inferiores a 80 por cento da velocidade máxima são muito pouco precisas.

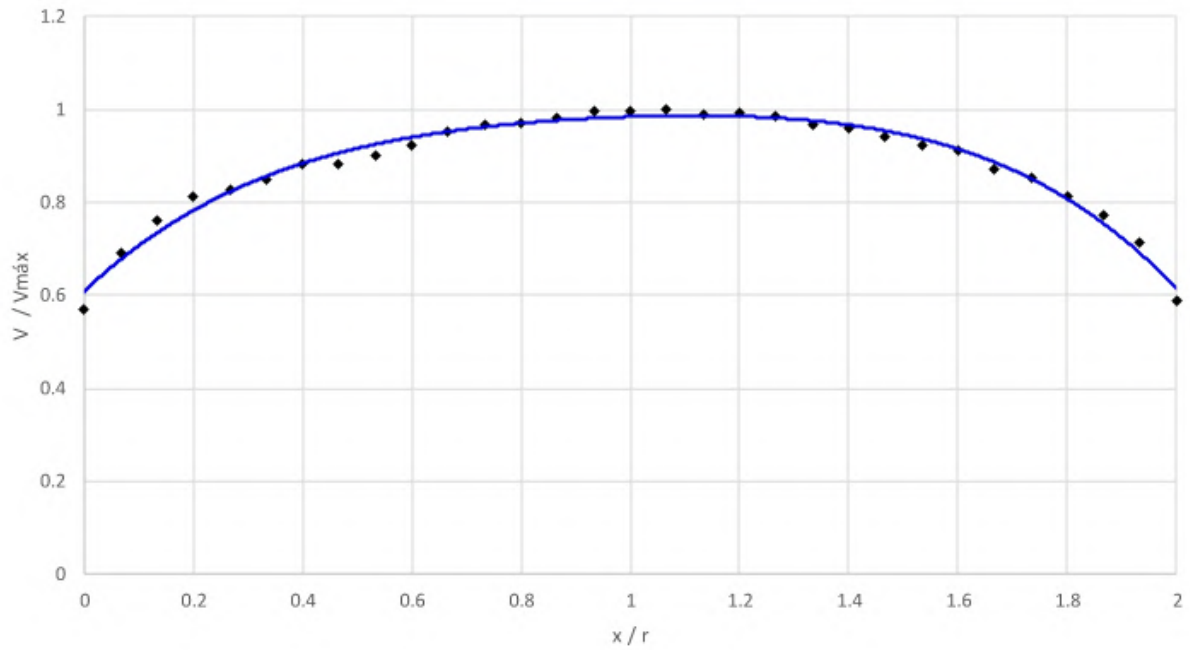


Figura 4.4: Perfil de velocidades adimensional.  $V_{max} = 10.7 \text{ m/s}$   $Re_D = 9.15 \cdot 10^4$

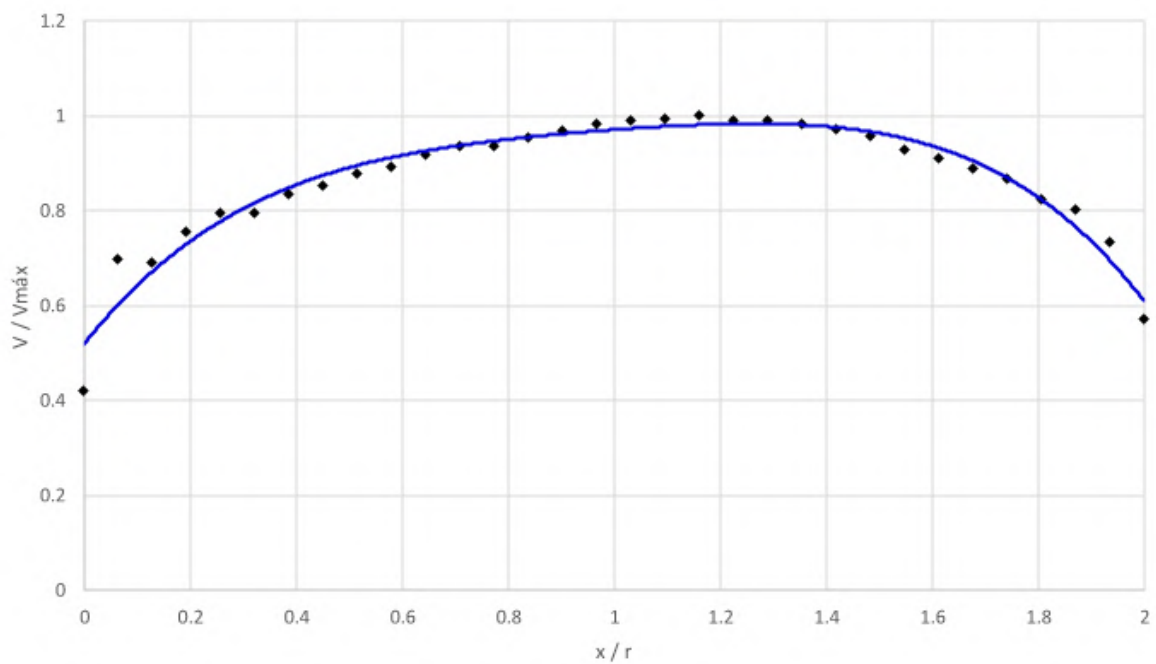


Figura 4.5: Perfil de velocidades adimensional com redução de caudal.  $V_{max} = 3.6 \text{ m/s}$   $Re_D = 3.09 \cdot 10^4$

## 4.2 Detecção do desprendimento de vórtices a jusante de um cilindro

Esta experiência tem como objetivo detetar, com o sistema de aquisição desenvolvido, o desprendimento alternado de vórtices a jusante de um cilindro, quando este é imerso num escoamento de ar normal à sua superfície. Como já foi referido na secção 3.6.2 o sistema de aquisição

quando associado ao programa VortFreq, permite determinar a frequência fundamental de uma variação de pressão, evidenciando o desprendimento periódico de vórtices, que é característico da Estrada de Vórtices de Von Karman.

#### 4.2.1 Escolha do diâmetro do cilindro

O fabricante do transdutor de pressão utilizado garante um tempo de resposta de 100 milissegundos. Assim, considera-se que este poderá detetar variações de pressão até 10 Hz. A relação 2.3 permite escolher um cilindro criteriosamente, para que a uma dada velocidade de ar, se crie um desprendimento passível de ser detetado com o sistema desenvolvido. Na literatura considera-se que para valores de Número de Reynolds entre  $10^2$  e  $10^5$  o Número de Strouhal é aproximadamente igual a 0.21 [12].

Selecionou-se um cilindro em pvc com 11 cm de diâmetro e 1 m de comprimento que se encontrava disponível no LMFTA. Para um cilindro com diâmetro igual a 11 cm, inserido num escoamento com uma velocidade de 4 m/s (a 20°C,  $\nu = 1.5 \cdot 10^{-5} m^2/s$ ) tem-se um Número de Reynolds:

$$Re = \frac{VL}{\nu} = \frac{4 \cdot 0.11}{1.5 \cdot 10^{-5}} = 2.93 \cdot 10^4$$

Considera-se um Número de Strouhal igual a 0.21 e resolve-se a relação 2.3 em ordem à frequência do desprendimento dos vórtices, obtendo-se:

$$f = \frac{St V}{D} = \frac{0.21 \cdot 4}{0.11} = 7.64 \text{ Hz}$$

Esta frequência é detetável com o transdutor de pressão utilizado.

O cilindro foi então montado no túnel aerodinâmico do LMFTA com a sua superfície normal ao escoamento. A figura 4.6 mostra esta montagem.



Figura 4.6: Cilindro em pvc montado no túnel aerodinâmico do LMFTA.

#### 4.2.2 Resultados

Nestes ensaios utilizou-se o programa VortFreq, respeitando os critérios de aquisição descritos no anexo A. Pretendendo-se detetar uma frequência de 7.6 Hz, utilizou-se uma frequên-

cia de aquisição de 83 Hz.

Foi posicionado um tubo de Pitot na esteira do cilindro como mostra a figura 4.7, no centro da secção do túnel aerodinâmico. Esperava-se uma variação periódica positiva na velocidade do ar captada pelo tubo de Pitot, pelo que se ligou o tubo de Pitot à tomada HIGH do transdutor de pressão, deixando a tomada LOW na atmosfera fora do escoamento. Não se considera que o comprimento e o material do tubo que conecta o tubo de Pitot ao transdutor de pressão seja uma limitação neste ensaio experimental pois: não se pretende medir a energia dos vórtices, pelo que fenómenos de atenuação não invalidam resultados; o atraso devido à propagação do sinal no tubo apenas gerará uma mudança de fase no sinal, e não influenciará a análise em frequência. Foi assim utilizado um tubo maleável em silicone com 240 cm de comprimento e 5 mm de diâmetro interior para conectar o tubo de Pitot. Não se obtendo resultados coerentes nesta posição, fizeram-se ensaios variando as dimensões  $5D$  e  $D/4$  representadas na figura 4.7, mas sem sucesso.

Após a análise de uma simulação em CFD, foi identificada uma região com uma variação periódica de grande amplitude negativa, onde se colocou o tubo de Pitot, como ilustra a figura 4.8. Obteve-se desta forma a frequência de desprendimento esperada. Sendo esta uma variação negativa na pressão, o tubo de Pitot foi conectado à tomada LOW do transdutor de pressão, deixando a tomada HIGH na atmosfera fora do escoamento. A existência de forte recirculação nesta zona faz com que o escoamento nunca esteja devidamente alinhado com o tubo de Pitot e induz erros na medição da velocidade. Assim, foi tomada a decisão de montar uma tomada estática na parede do cilindro nesta zona. A figura 4.9 ilustra a posição da tomada estática. A tomada estática consiste num tubo de latão de 2 cm de comprimento e 2 mm de diâmetro interior, acoplado a 45 cm de tubo maleável em silicone com 2 mm de diâmetro interior, e finalmente, a 240 cm de tubo maleável em silicone com 5 mm de diâmetro interior.

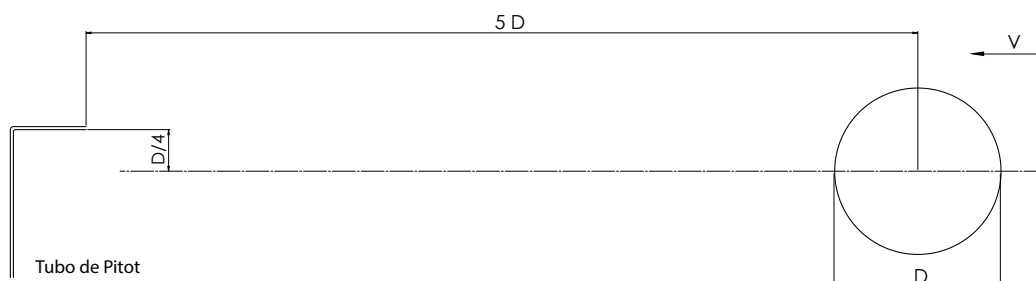


Figura 4.7: Posição do tubo de Pitot em relação ao cilindro em pvc, montado no túnel aerodinâmico do LMFTA.

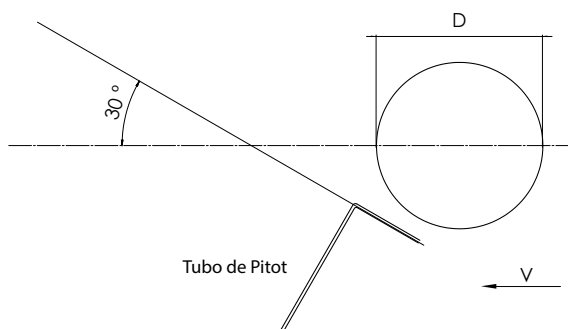


Figura 4.8: Posição do tubo de Pitot que gerou resultados positivos.

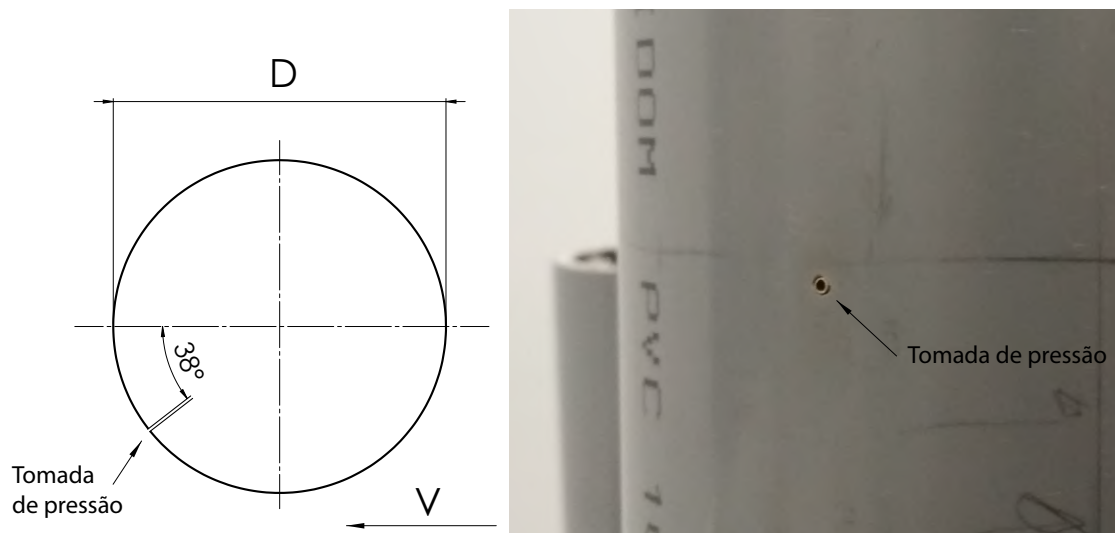


Figura 4.9: Posição da tomada estática montada no cilindro em pvc.

Os espectros de amplitude foram obtidos retirando a componente DC do sinal e foi feita uma filtragem do espectro com uma média de 12 amostras, que permite uma melhor visualização do mesmo.

O resultado do primeiro ensaio com a tomada estática, a 4 m/s, pode ser observado nas figuras 4.10 e 4.11; observa-se um pico a aproximadamente 7.4 Hz; apresenta também um pico em baixas frequências cuja origem não foi possível determinar e que se suspeita ser uma frequência natural do túnel aerodinâmico ou do seu ventilador.

Por forma a confirmar os resultados obtidos foram feitos mais dois ensaios. Um a 3 m/s, a que corresponde um desprendimento teórico de 5.73 Hz, e outro a 5 m/s com um desprendimento de 9.55 Hz. Os resultados encontram-se nas figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15, e permitiram identificar picos em 5.5 Hz e 9.3 Hz respetivamente. Observa-se que o pico em baixas frequências detetado no primeiro ensaio é consistente em todos os ensaios, reforçando a hipótese de este ser uma frequência natural do túnel aerodinâmico ou do seu ventilador.

Confirma-se assim que o sistema de aquisição é capaz de detetar o desprendimento vorticular na esteira de um cilindro, bem como a correta determinação experimental da frequência deste desprendimento.

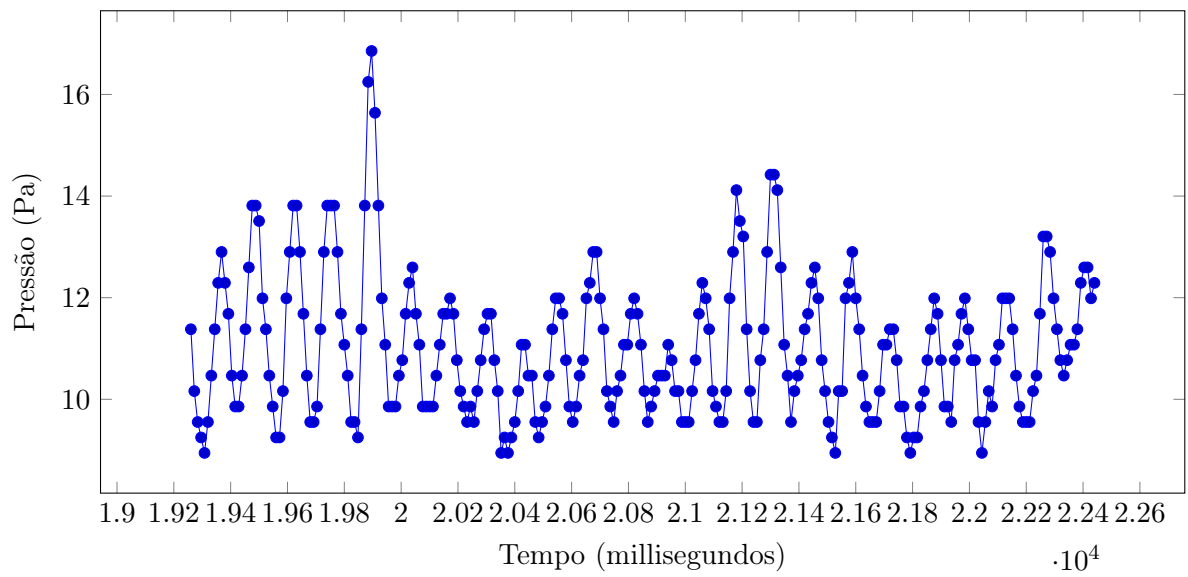


Figura 4.10: Série temporal do ensaio a 4 m/s

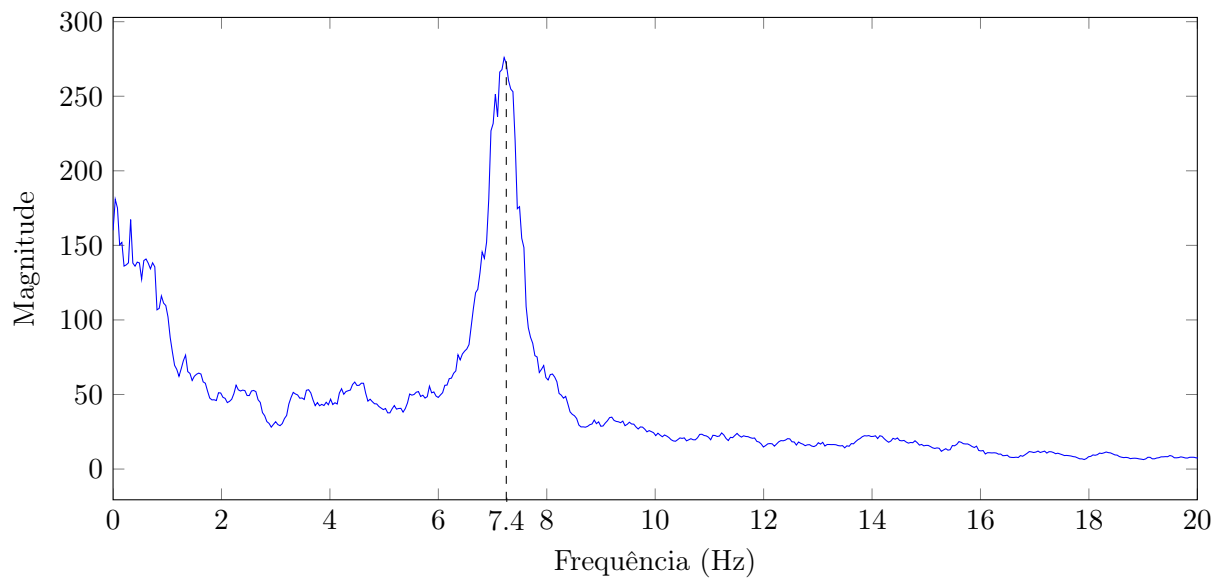


Figura 4.11: Espectro de amplitude do ensaio a 4 m/s (desprendimento teórico: 7.64Hz)

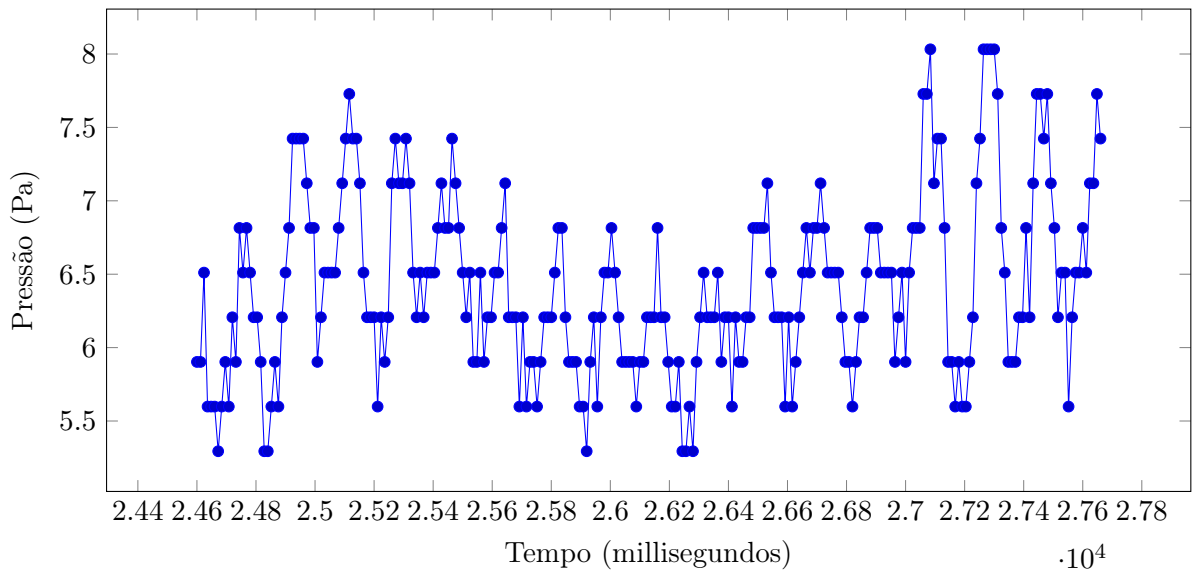


Figura 4.12: Série temporal do ensaio a 3 m/s

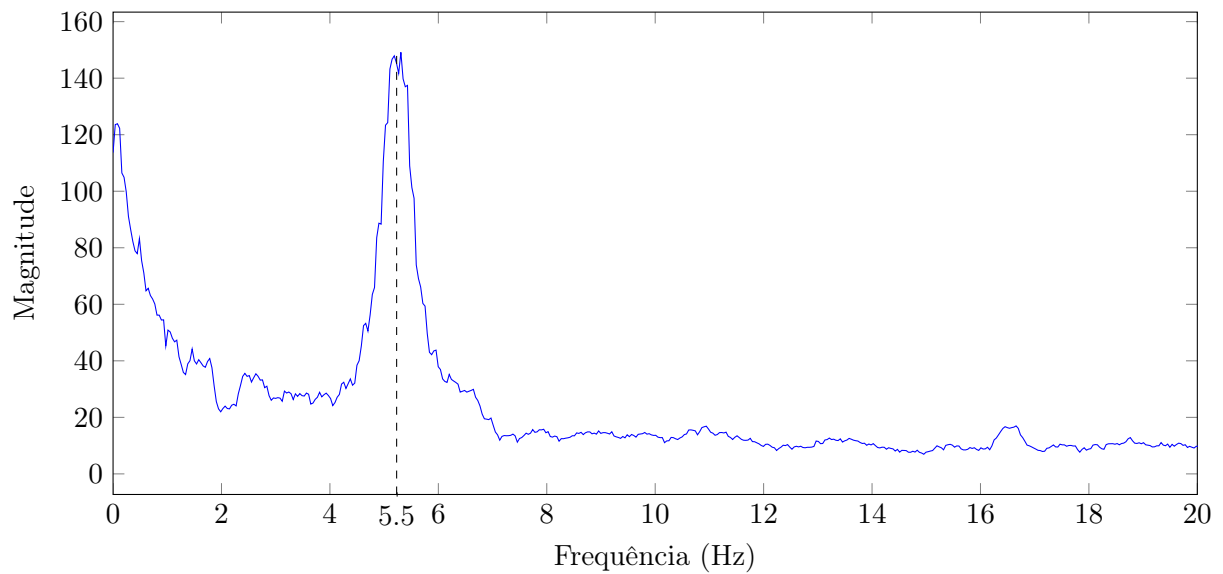


Figura 4.13: Espectro de amplitude do ensaio a 3 m/s (desprendimento teórico: 5.73Hz)

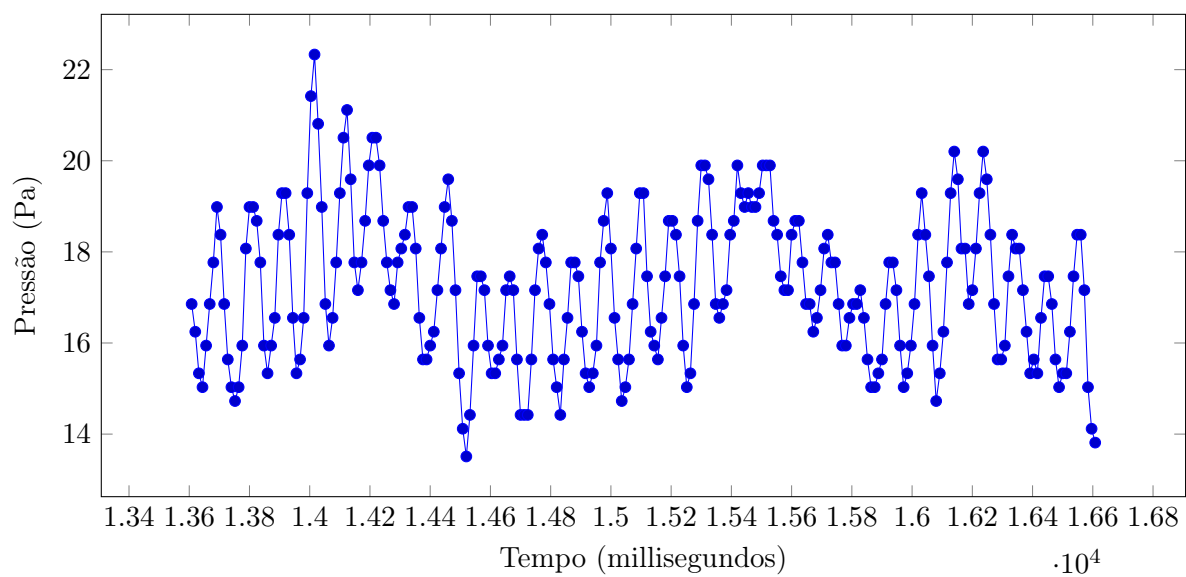


Figura 4.14: Série temporal do ensaio a 5 m/s

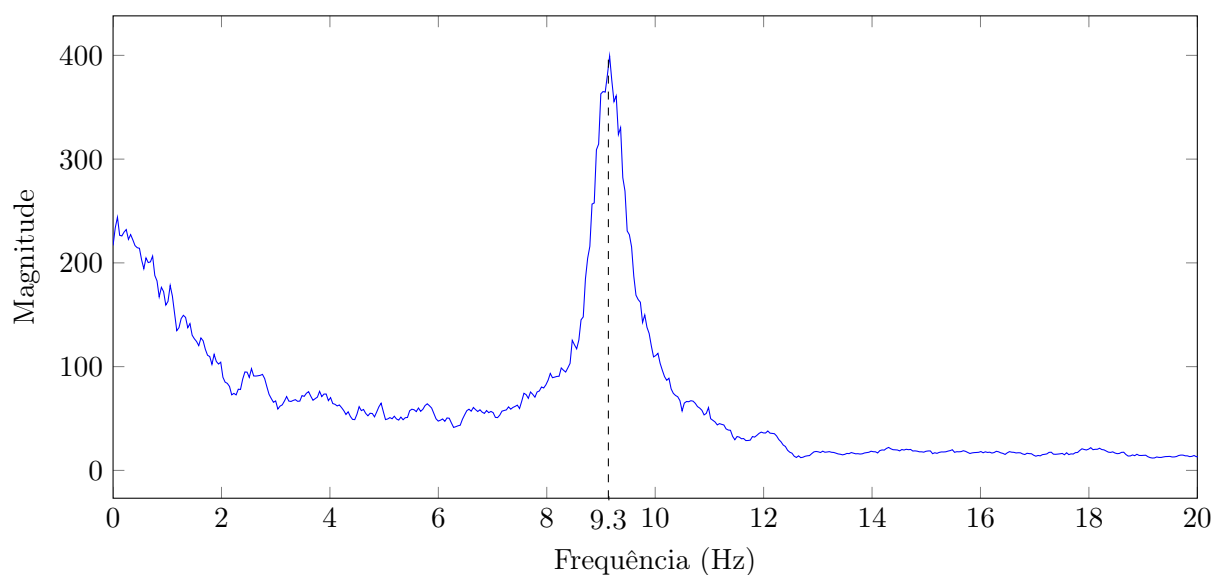


Figura 4.15: Espectro de amplitude do ensaio a 5 m/s (desprendimento teórico: 9.55Hz)

# 5 | Conclusões

## 5.1 Conclusão

Os objetivos propostos foram globalmente atingidos. O acoplamento entre a placa Arduino Uno e o transdutor de pressão foi efetuado, permitindo medir e registar sob a forma de ficheiro digital séries temporais de pressão e de velocidade do ar.

A integração da placa Arduino Uno com o software LabVIEW revelou-se versátil, permitindo obter interfaces de utilizador que interagem com sistemas físicos. As potencialidades deste tipo de sistema são diversificadas. O sistema desenvolvido possibilita uma taxa de aquisição máxima de 83 Hz.

Este sistema permite medir velocidades de ar até 20 m/s, tendo uma incerteza que aumenta com a diminuição da velocidade, sendo que em velocidades inferiores a 3 m/s a sua incerteza torna-se superior a 1/6 do valor medido.

Verificou-se que as medições feitas pelo transdutor de pressão ficaram limitadas pela sua precisão de referência e não pelo conversor digital-analógico do Arduino Uno.

No que ao trabalho experimental diz respeito, foram traçados dois perfis de velocidade turbulentos à saída de uma conduta. Suspeita-se que a imprecisão presente em ambos os perfis poderá dever-se a: a secção de saída da conduta não ser perfeitamente circular; a conduta em chapa construída em espiral poderá ter dado alguma rotação ao escoamento e, consequentemente, introduzido um ângulo de ataque em relação ao tubo de Pitot, aumentando o erro na medição. No perfil relativo ao menor caudal tornou-se evidente que, em velocidades muito baixas, a incerteza da medição torna-se relevante. O sistema de aquisição foi capaz de detetar o desprendimento vorticular na esteira de um cilindro, bem como a correta determinação experimental da frequência deste desprendimento. Foi detetado um pico nas baixas frequências que se suspeita ser consequência de uma frequência natural do túnel aerodinâmico ou do seu ventilador.

O sistema desenvolvido fica disponível para trabalhos futuros no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica Aplicada do DEMI da FCT NOVA e poderá ser utilizado na medição de escoamentos permanentes ou transitórios com variações temporais moderadas, com uma pressão diferencial máxima de 249 Pa e uma precisão de  $\pm 1.9 Pa$ .

## 5.2 Trabalhos futuros

Integrar no programa RegVel, desenvolvido para LabVIEW, o cálculo do intervalo de confiança do conjunto de amostras registadas em cada ponto.

Sugere-se que o código desenvolvido para comunicação com o *add on* para Microsoft Excel PLX-DAQ (anexo B) seja otimizado; tal poderá ser possível manipulando a linguagem

que constitui as funções da programação Arduino, permitindo à partida frequências de aquisição superiores a 83 Hz.

Finalmente, também poderá ser feita uma integração deste sistema de aquisição com o sistema de deslocamento bi-axial [8], utilizando um critério que permita a completa automatização do registo de perfis de velocidade.

# Bibliografia

- [1] Acin. *Betz micromanometer Handleiding Manual, model 2500/250, model 5000/500*. Acin.
- [2] DEMI. *Barómetro de Torricelli - Manual de instruções - Leitura de valores e correções a efectuar*. FCT NOVA - Departamento de Engenharia Mecânica.
- [3] Omega Engineering. *What is a pressure transducer?* URL: <https://www.omega.com/prodinfo/pressure-transducers.html>. (accessed: 01.19.2019).
- [4] National Instruments. *Determining Size and Sample Frequency for Analyzing Analog Signals*. URL: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z0000019MIYSA21>. (accessed: 17.09.2018).
- [5] lectureonline. *Error Propagation*. URL: <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/labs/error/e2.htm>. (accessed: 20.09.2018).
- [6] Brigham E. O. *Fast Fourier Transform and it's Applications*. Prentice-Hall, 1988. ISBN: 0-13-307505-2.
- [7] Omega. *Wet/Wet Low Differential Pressure Transmitter*. URL: <https://www.omega.com/pptst/PX154.html>. (accessed: 17.09.2018).
- [8] Luís Gonzaga dos Reis Ramos. *Desenvolvimento de um Sistema de Deslocamento Bi-axial para Aplicação em Túnel Aerodinâmico - Tese de mestrado*. FCT NOVA, Monte da Caparica, 2018.
- [9] Bosh Sensortec. *BMP280 Barometric Pressure Sensors*. URL: [https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all\\_products/bmp280](https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bmp280). (accessed: 20.09.2018).
- [10] Sparkfun. *SparkFun Thermocouple Breakout - MAX31855K*. URL: [https://www.sparkfun.com/products/13266?\\_ga=2.165042687.1936285997.1537150439-404601848.1528416424](https://www.sparkfun.com/products/13266?_ga=2.165042687.1936285997.1537150439-404601848.1528416424). (accessed: 17.09.2018).
- [11] Sparkfun. *Thermocouple Type-K - Stainless Steel*. URL: <https://www.sparkfun.com/products/13715>. (accessed: 17.09.2018).
- [12] F. M. White. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, 1999. ISBN: 978-0-07-352934-9.



## 6 | Anexos

### Anexo A - Fast Fourier Transform e cuidados a ter na amostragem de um sinal

A FFT é um algoritmo que, como o nome indica, permite calcular rapidamente a Transformada de Fourier Discreta. A Transformada de Fourier Discreta é dada por:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_0(k)e^{-j2\pi n \frac{k}{N}} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad [6] \quad (6.1)$$

em que  $X(n)$  representa a amostra em frequência,  $x_0$  representa a amostra no tempo,  $k$  o índice no tempo,  $n$  o índice em frequência e  $N$ , o número de amostras a analisar. Para o funcionamento correto da FFT é necessário uma amostragem periódica em que o número de amostras a analisar seja uma potência de dois.

#### Cuidados a ter na amostragem

Embora o teorema de Nyquist defina que por forma a medir eficazmente a frequência de um sinal é necessária uma frequência de aquisição igual ao dobro da frequência do sinal a analisar, deverá ser utilizada uma frequência de aquisição dez vezes superior se o objetivo for capturar eficazmente a forma do sinal. [4] Deverá ser adquirido pelo menos um período inteiro do sinal em análise.

### Anexo B - Código desenvolvido para permitir comunicação entre o Arduino 2 e o *add on* para Microsoft Excel PLX-DAQ

```
int periodo = 12 ; //milisegundos
unsigned long tempo2=0;
unsigned long tempo1=0;

void setup() {
  Serial.begin(2000000) ;
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL, Time, Millisegundos , Voltagem ");
}

void loop() {
  tempo1=millis();
  if (tempo1 >= tempo2+periodo){
    Serial.print("DATA, TIME, ");
```

```

Serial.print(tempo1);
Serial.print(",");
Serial.println(analogRead(A0));
tempo2=tempo1;}
}

```

## Anexo C - Código desenvolvido para controlar o Arduino 1, que controla o LCD e permite o funcionamento independente de um computador

```

//Termopar
/*****
This is an example for the Adafruit Thermocouple Sensor w/MAX31855K

Designed specifically to work with the Adafruit Thermocouple Sensor
——> https://www.adafruit.com/products/269

These displays use SPI to communicate, 3 pins are required to
interface
Adafruit invests time and resources providing this open source code,
please support Adafruit and open-source hardware by purchasing
products from Adafruit!

Written by Limor Fried/Ladyada for Adafruit Industries.
BSD license, all text above must be included in any redistribution
*****/
//BMP280
/*****
This is a library for the BMP280 humidity, temperature & pressure sensor

Designed specifically to work with the Adafruit BMEP280 Breakout
——> http://www.adafruit.com/products/2651

These sensors use I2C or SPI to communicate, 2 or 4 pins are required
to interface.

Adafruit invests time and resources providing this open source code,
please support Adafruit and open-source hardware by purchasing products
from Adafruit!

Written by Limor Fried & Kevin Townsend for Adafruit Industries.
BSD license, all text above must be included in any redistribution
*****/
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include "Adafruit_MAX31855.h"
#include <LiquidCrystal.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>

// Example creating a thermocouple instance with software SPI on any three

```

```

// digital IO pins.
#define MAXDO 3
#define MAXCS 4
#define MAXCLK 5

// Initialize the Thermocouple
Adafruit_MAX31855 thermocouple(MAXCLK, MAXCS, MAXDO);
// Initialize BMP280
Adafruit_BMP280 bme; // I2C

// initialize the library with the numbers of the interface pins
LiquidCrystal lcd(7, 8, 9, 10, 11, 12);

#if defined(ARDUINO_ARCH_SAMD)
// for Zero, output on USB Serial console, remove line below if using programming
#define Serial SerialUSB
#endif

//botao para trocar o lcd
int state = HIGH; // the current state of the output pin
int reading; // the current reading from the input pin
int previous = LOW; // the previous reading from the input pin
long time = 0; // the last time the output pin was toggled
long debounce = 200; // the debounce time, increase if the output flickers
float r= 287.05;
double previousc=0;

//medias moveis
//temperatura

const int numReadingsT = 30;
float readingsT[numReadingsT]; // the readings from the analog input
int readIndexT = 0; // the index of the current reading
float totalT = 0; // the running total
float averageT = 0; // the average

//pressao

const int numReadingsP = 30;
float readingsP[numReadingsP]; // the readings from the analog input
int readIndexP = 0; // the index of the current reading
float totalP = 0; // the running total
float averageP = 0; // the average

//analogread

const int numReadingsA = 30;
float readingsA[numReadingsA]; // the readings from the analog input
int readIndexA = 0; // the index of the current reading
float totalA = 0; // the running total
float averageA = 0; // the average

```

```

    //densidade.
    //Se se pretender introduzir um valor de densidade manual, eliminar o calculo

void setup() {
  #ifndef ESP8266
    while (!Serial);    // will pause Zero, Leonardo, etc until serial console
  #endif
  Serial.begin(9600);
  // set up the LCD's number of columns and rows:
  lcd.begin(16, 2);

  lcd.clear();
  lcd.print("MAX31855 test");
  // wait for MAX chip to stabilize
  delay(500);

  Serial.println(F("BMP280 test"));

  if (!bme.begin()) {
    Serial.println("Could not find a valid BMP280 sensor, check wiring!");
    while (1);
  }

  pinMode(2,INPUT);
  pinMode(13,OUTPUT);
  pinMode(A1,INPUT);

  //medias moveis

  for (int thisReadingT = 0; thisReadingT < numReadingsT; thisReadingT++) {
    readingsT[thisReadingT] = 0;
  }

  for (int thisReadingP = 0; thisReadingP < numReadingsP; thisReadingP++) {
    readingsP[thisReadingP] = 0;
  }

  for (int thisReadingA = 0; thisReadingA < numReadingsA; thisReadingA++) {
    readingsA[thisReadingA] = 0;
  }

}

void loop() {
  // basic readout test, just print the current temp
  double ce = thermocouple.readCelsius();
  if(isnan(ce)){
    ce=previousc;}
  previousc=ce;
  double tp = bme.readTemperature();

```

```

    double pe = bme.readPressure();
    double p = pe -110 ;
    double c= ce -2;

//medias moveis
    //pressao

    totalP = totalP - readingsP[readIndexP];
    readingsP[readIndexP] = p;
    totalP = totalP + readingsP[readIndexP];
    readIndexP = readIndexP + 1;
    if (readIndexP >= numReadingsP) {
        readIndexP = 0;
    }
    averageP = totalP / numReadingsP;

    //temperatura

    totalT = totalT - readingsT[readIndexT];
    readingsT[readIndexT] = c;
    totalT = totalT + readingsT[readIndexT];
    readIndexT = readIndexT + 1;
    if (readIndexT >= numReadingsT) {
        readIndexT = 0;
    }
    averageT = totalT / numReadingsT;

    int sensorValue = analogRead(A0);

//media movel analog read

    totalA = totalA - readingsA[readIndexA];
    readingsA[readIndexA] = sensorValue;
    totalA = totalA + readingsA[readIndexA];
    readIndexA = readIndexA + 1;
    if (readIndexA >= numReadingsA) {
        readIndexA = 0;
    }
    averageA = totalA / numReadingsA;

    float voltage = averageA * (5.0 / 1023.0);
    float pressao = (voltage*(249/4))-(249/4);
    float ck=averageT+273.15;
    float densidade= averageP/(r*ck);
    float velocidade= sqrt(2*(pressao/densidade));

    reading = digitalRead(2);
    Serial.println(reading);
    // if the input just went from LOW and HIGH and we've waited long enough

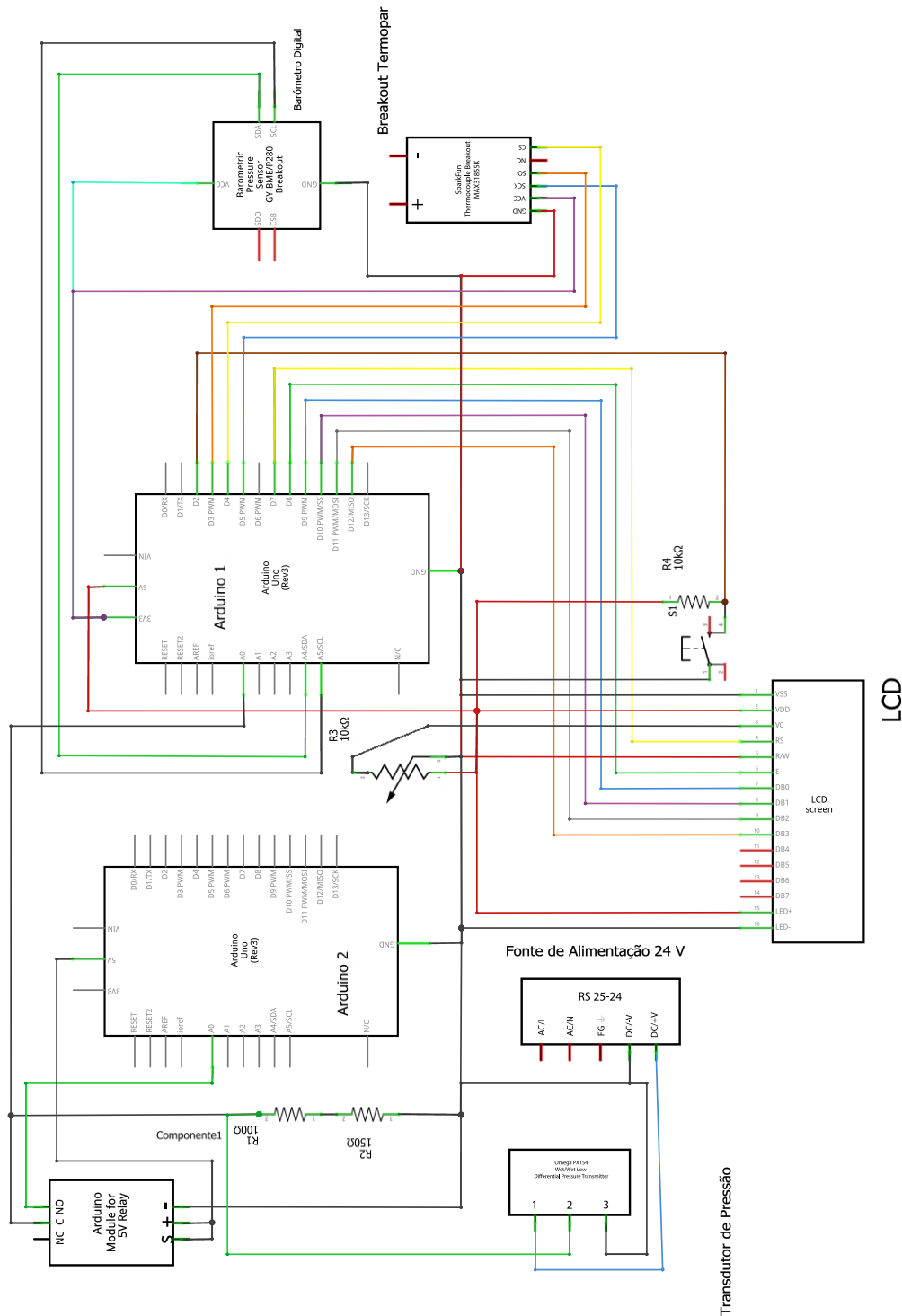
```

```

// to ignore any noise on the circuit , toggle the output pin and remember
// the time
if (reading == HIGH && previous == LOW && millis() - time > debounce) {
  if (state == HIGH)
    state = LOW;
  else
    state = HIGH;

  time = millis();
}
previous = reading;
if (state == HIGH){
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  if (isnan(averageT)){
    lcd.print("T/C Problem");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("P = ");
    lcd.print(averageP);
    lcd.print(" Pa");}
  else {
    lcd.print("C = ");
    lcd.print(averageT);
    lcd.print(" C");
    lcd.print((char) 223);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("P = ");
    lcd.print(averageP);
    lcd.print(" Pa");}}
  else{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("V = ");
    lcd.print(velocidade);
    lcd.print(" m/s");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("P = ");
    lcd.print(pressao);
    lcd.print(" Pa");}
}

```



fritzing

Figura 6.1: Anexo D - Ligações do sistema de aquisição

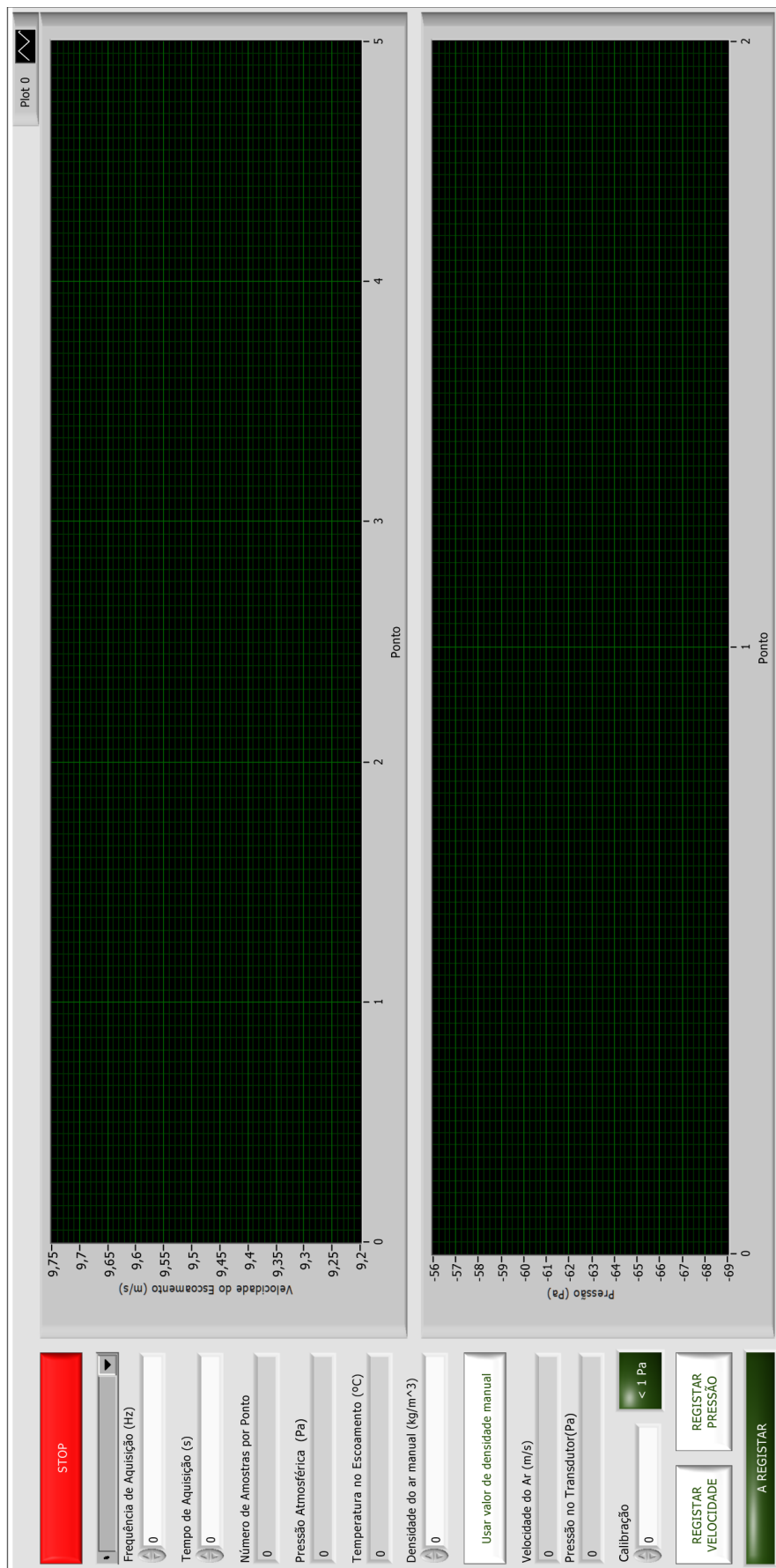


Figura 6.2: Anexo E - Painel de utilizador do programa RegVel feito em LabVIEW.

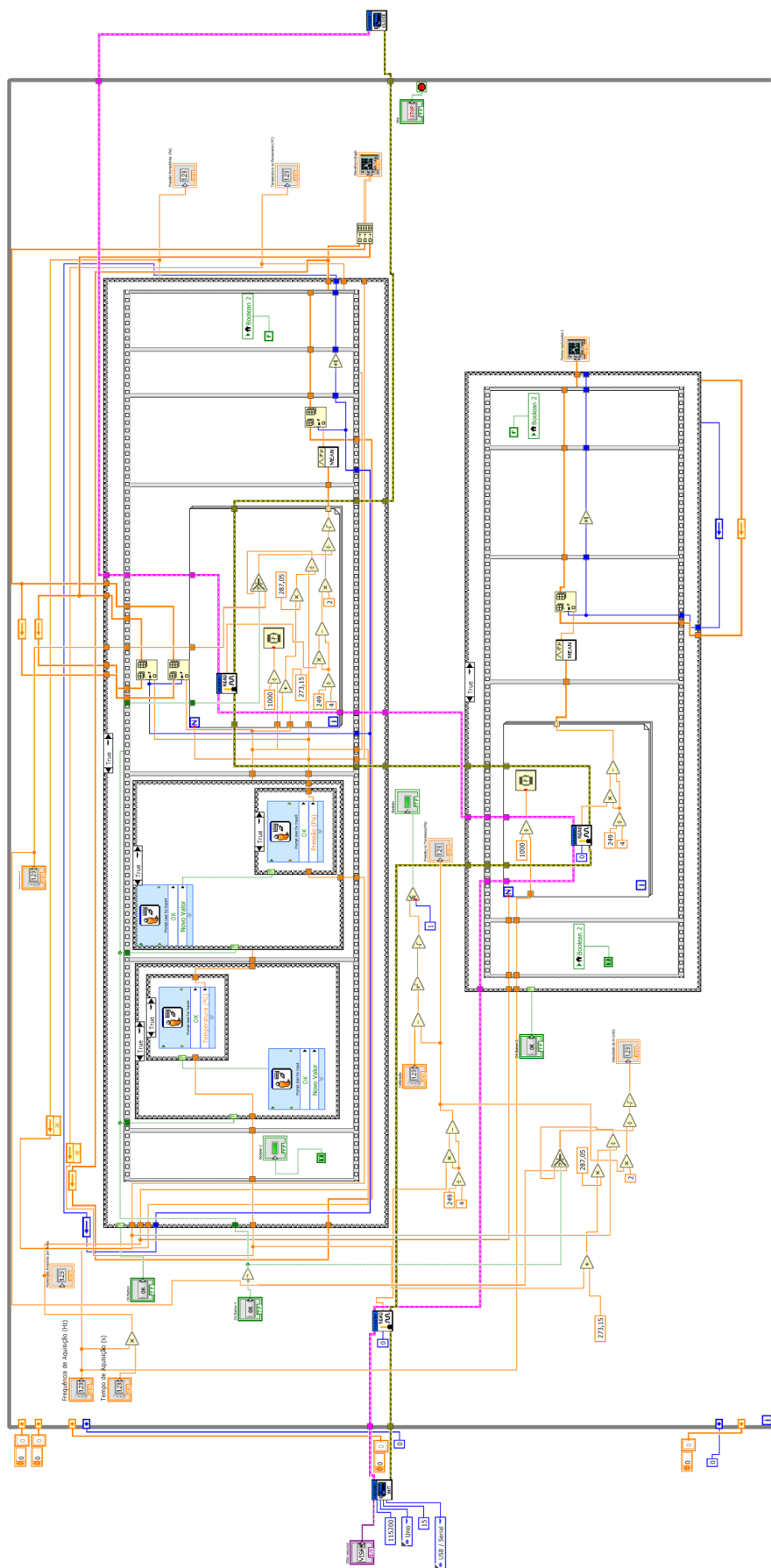


Figura 6.3: Anexo F - Esquema de blocos do programa RegVel feito em LabVIEW.

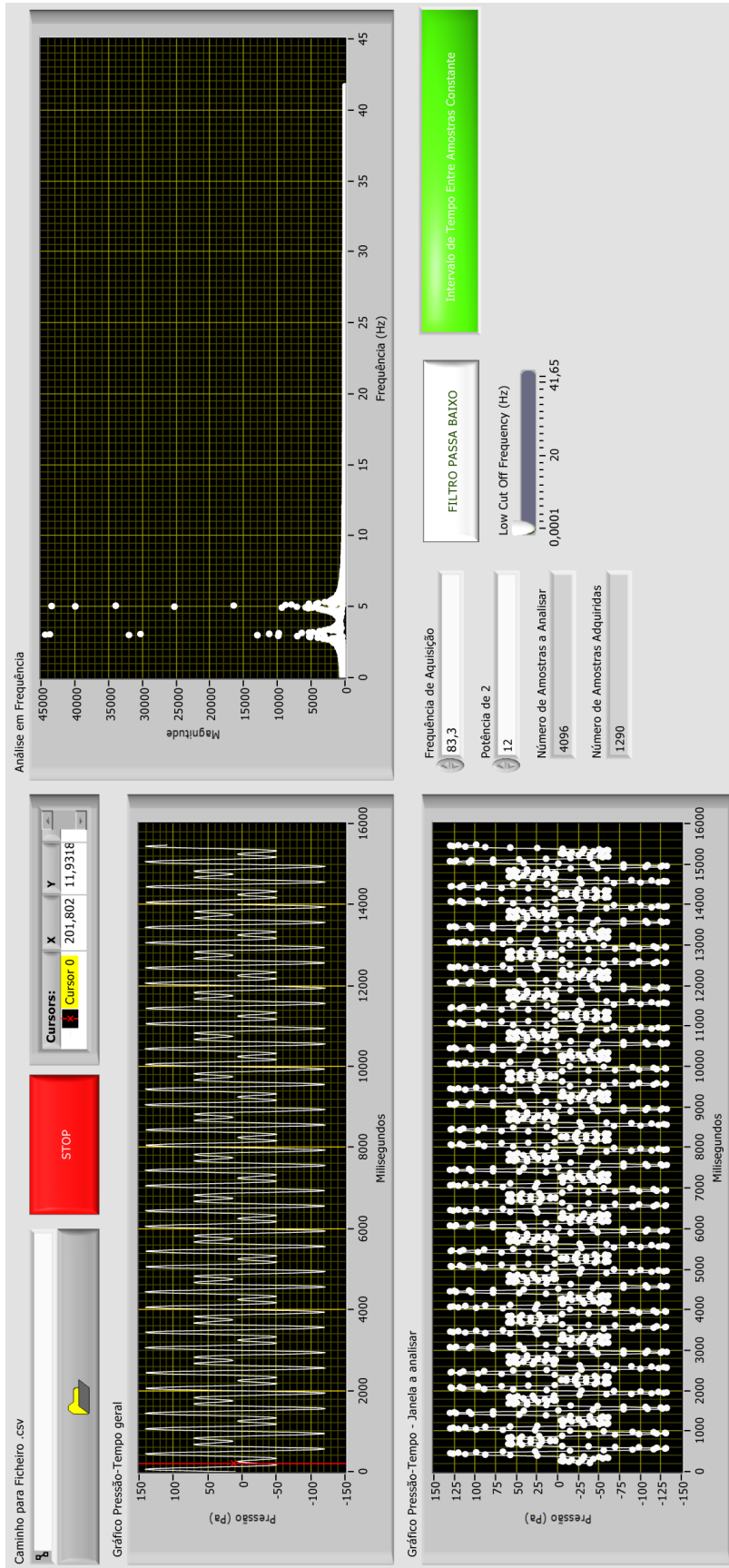


Figura 6.4: Anexo G - Painel de utilizador do programa VortFreq feito em LabVIEW.

