

# Relatório Final

Sistema de Medição de Vibrações

**Equipa H**



Projeto realizado no âmbito da unidade curricular de  
Engenharia de Sistemas



Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de  
Computadores  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Portugal  
2022/2023

# Índice

<b>1</b>	<b>Desafio</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Estudo do Mercado</b>	<b>4</b>
2.1	Análise individual dos produtos . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Lista de requisitos</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>System Breakdown Structure</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Ferramentas Utilizadas no Projeto</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>Arquitetura funcional</b>	<b>12</b>
<b>7</b>	<b>KPI's Técnicos</b>	<b>13</b>
<b>8</b>	<b>Work Breakdown Structure</b>	<b>14</b>
<b>9</b>	<b>Planeamento Temporal</b>	<b>16</b>
<b>10</b>	<b>Gestão de Riscos</b>	<b>18</b>
<b>11</b>	<b>Gestão de Equipa</b>	<b>20</b>
11.1	Elementos . . . . .	20
11.2	Responsabilidade e Organização . . . . .	20
11.3	Gestão de Conflitos . . . . .	23
11.4	Avaliações Interpares . . . . .	24
11.5	KPI's Gestão de Projeto . . . . .	24
<b>12</b>	<b>Trabalho desenvolvido</b>	<b>26</b>
12.1	Trabalho Realizado . . . . .	26
12.1.1	Montagem do Sensor e Circuito . . . . .	26
12.1.2	Aquisição de Dados . . . . .	27
12.1.3	Comunicação Arduino Uno WiFi R2 - Raspberry Pi 2 . . . . .	28
12.2	Tratamento de Dados . . . . .	28
12.2.1	Comunicação Raspberry Pi 2 - InfluxDB . . . . .	30
12.3	Ligação InfluxDB - Grafana . . . . .	30

<b>13 Resultados</b>	<b>32</b>
<b>14 Recomendações para a cadeira</b>	<b>33</b>

# 1 Desafio

O mercado das fontes de energia renováveis está a crescer rapidamente, com a eólica a ser uma das principais fontes de energia renovável. A monitorização da vibração é importante para garantir a segurança e a eficiência das torres de turbina eólica.

No âmbito da unidade curricular “Engenharia de Sistemas” foi nos proposto um desafio que consiste no desenvolvimento de um sistema de medição de vibrações capaz de ser utilizado para efeitos de monitorização da vibração de uma torre de turbina eólica.

O sistema deverá efetuar medições e transmitir a informação que recolhe para uma base de dados através da *Internet*. O utilizador poderá ter acesso aos dados a qualquer momento através de uma interface gráfica, onde estes serão exibidos para a sua comodidade de visualização.

## 2 Estudo do Mercado

O estudo de mercado é uma ferramenta crucial para compreender a demanda, necessidades e tendências do mercado, e para tomar decisões bem informadas sobre o desenvolvimento de um projeto. Permite a avaliação da viabilidade económica de um projeto, a identificação de oportunidades e riscos, e o desenvolvimento de estratégias de sucesso. Para realizar o estudo de mercado, é importante identificar o público alvo, concorrentes, desejos do cliente, principais tendências de mercado, e a viabilidade económica do projeto proposto.

Dado o rápido crescimento na área de desenvolvimento das fontes de energias renováveis e, por sua vez, a consequente necessidade da implementação de sistemas de monitorização que garantam a sua segurança e eficiência, o desenvolvimento de um sistema de medição de vibrações para torres de turbinas eólicas representa uma oportunidade de mercado significativa. O público-alvo deste mercado é principalmente constituído por organizações que gerem e mantêm torres de turbinas eólicas, bem como pelos engenheiros e técnicos responsáveis pela manutenção destas torres.

A análise do mercado relativo a sistemas de medição e registo de vibrações revelou que tem havido uma tendência para o desenvolvimento de sistemas para monitorização remota e manutenção preditiva. Existem vários sistemas de monitorização de vibrações no mercado, mas a maioria são sistemas de medição de vibrações para a indústria automóvel, naval e de construção. Alguns sistemas de monitorização de vibrações para torres de turbina eólica estão disponíveis, mas não são tão populares e a maioria deles são dispendiosos. Os principais concorrentes são empresas que já têm sistemas de monitorização de vibrações para torres de turbina eólica, como a *National Instruments* e a *Wilcoxon Sensing Technologies*. No entanto, existem algumas vantagens competitivas que o sistema proposto pode ter, como preço mais acessível, fácil utilização e acesso à informação através da *Internet*.

De acordo com o estudo de mercado, existem numerosos sistemas de medição e registo de vibrações no mercado que podem ser categorizados por aplicabilidade, versatilidade e custo. Inicialmente, foram estudadas soluções para uma gama mais ampla de problemas que podem ou não estar diretamente ligados à monitorização de vibrações em turbinas eólicas, mas que envolvem componentes comparáveis ao projeto proposto e proporcionam um ponto de comparação interessante. Na Tabela 1, são apresentadas algumas destas soluções, assim como duas das suas características mais importantes.

Produto	Utilizações preferenciais	Custo
Microstrain's G-Link-200 [1]	Aplicações ao ar livre	Solicitação de cotação
Dynapar OnSiteTM Monitoring [1]	Análise em frequência detalhada	Solicitação de cotação
Fluke 3563 Vibration Analysis Sensor [2]	Análise de condição de equipamento em tempo real	Solicitação de cotação
DEWESoft's Wind Turbine Monitoring [3]	Plano de monitorização de turbinas eólicas	Solicitação de cotação
Bently Nevada Ranger Pro [1]	Previsão de manutenção para operações de grande escala	Solicitação de cotação
PCB's Echo Wireless [1]	Operações a grande escala com base de dados local	\$6400
enDAQ's W-Series Sensors [1]	Operações a grande escala com personalização	\$2500 ou mais
Erbessd 3X Wireless [1]	Monitorização no local com uma <i>app</i> para <i>tablets</i>	\$1995

Tabela 1: Resultados da pesquisa de mercado

## 2.1 Análise individual dos produtos

Nesta secção, são abordadas com mais detalhe as soluções mais direccionadas para utilização na área eólica.

Os *wireless nodes G-Link 200* da *Microstrain* fornecem informação sob formas de onda pouco ruidosas e são ideais para aplicações capazes de medir vibração, impacto e inclinação, permitindo monitorização de longo prazo e manutenção preditiva do equipamento onde são instalados. Este produto incorpora acelerómetros *ADXL357*, que pretendemos utilizar no nosso projeto, e é capaz de captar frequências até aos 1KHz com *sampling rates* de 4KHz. Esta solução também inclui um sensor de temperatura.

Os *nodes Bently Nevada Ranger Pro* fornecem os mesmos serviços, mas apresentando *sampling rates* na ordem dos 10Khz. Em contrapartida, possuem metade do tempo de vida relativamente à solução anterior (cerca de 5 anos).

Nenhum dos *nodes* destes produtos tem ligação direta à Internet e, portanto, ambos necessitam da utilização de *gateways* externas. O mesmo não se verifica para as restantes soluções listadas, uma vez que, estes são capazes de fornecer os seus próprios serviços de comunicação, base de dados e interface gráfica para interpretação dos dados recolhidos, assim como maiores tempos de vida, *sampling rates* e largura de banda de frequência. São, naturalmente, mais dispendiosos que os

anteriores. Entre estes destaca-se o sistema *DEWESoft's Wind Turbine Monitoring*, pela sua capacidade de fornecer diagnósticos profundos sobre a condição estrutural das turbinas eólicas e pela possibilidade de operação remota. Para além disso, este utiliza uma base de dados construída sobre o projeto *open-source InfluxDB*, que também decidimos incluir no nosso produto.

Em resumo, o mercado de sistemas de medição e registo de vibrações para aplicações eólicas oferece várias opções, mas o projeto proposto pode se destacar pela sua versatilidade e preço competitivo, utilizando componentes semelhantes aos utilizados pelos principais concorrentes.

### 3 Lista de requisitos

Nesta secção, estão identificados os requisitos que a equipa definiu com base no pedido do cliente e o que ele considera fundamental. Para este projeto, essas características encontram-se enumeradas abaixo:

- O sistema deverá conseguir registar vibrações com frequências entre os 0.1 Hz e os 100 Hz.
- Três sensores serão necessários: um para medir as vibrações no topo da turbina eólica, outro a meio e o restante na parte inferior.
- As medições efetuadas deverão ser transferidas por Wi-Fi.
- Os dados deverão ser guardados numa base de dados.
- A aplicação deverá apresentar os dados, bem como uma análise básica dos mesmos, preferencialmente por gráficos.

Tendo em conta estas características, os requisitos definidos entre a equipa encontram-se divididos em funcionais (F) e não funcionais (N). Os requisitos funcionais descrevem funções que o sistema deverá implementar; por sua vez, os não funcionais indicam características ou restrições ao modo de funcionamento do sistema. Além disso, conforme o subsistema em que se inserem, cada um dos requisitos é classificado como referente ao subsistema de medição (M), do servidor (S) ou da aplicação (A). Os requisitos definidos entre a equipa estão expostos na tabela 7.



Tabela 2: Requisitos funcionais e não funcionais

Código	Requisito	Prioridade	Estado
MF1	O sensor deve ser capaz de medir vibrações entre 0.1Hz e 100Hz	Alta	Cumprido
MF2	Comunicação entre o módulo Arduino e o Raspberry Pi realizar-se por Wi-Fi	Alta	
MN3	O conjunto Arduino + Sensor estar protegido das condições ambientais	Média	Não Cumprido
SF1	Estabelecer comunicação entre o Raspberry Pi e a base de dados	Alta	Cumprido
SN2	Formatação da informação durante comunicação com o cliente	Baixa	Cumprido
SN3	Os dados transmitidos devem ser menos de 5MB/5 minutos	Média	Cumprido
AN1	A aplicação deve conseguir aceder à base de dados	Alta	Cumprido
AF2	Visualização dos dados recorrendo a gráficos	Média	Cumprido
AF3	Análise básica dos dados e respetiva representação	Alta	Cumprido
AN4	Acesso à aplicação através de um <i>web browser</i>	Média	Cumprido

## 4 System Breakdown Structure

O nosso sistema pode ser dividido em 4 componentes principais. Uma Unidade de Medições, que deve ser montada na turbina e é responsável por recolher os dados em bruto. Uma Unidade Central (ou de Processamento), que pode ser ou não também montada na turbina, e que é utilizada para processar os dados em bruto e transformá-los em frequências. Uma Base de Dados (DB) na *Cloud*, para armazenar os dados processados. E por fim, uma Interface Gráfica, a qual irá apresentar os dados armazenados na DB, para a apresentá-los de forma clara e intuitiva a um utilizador.

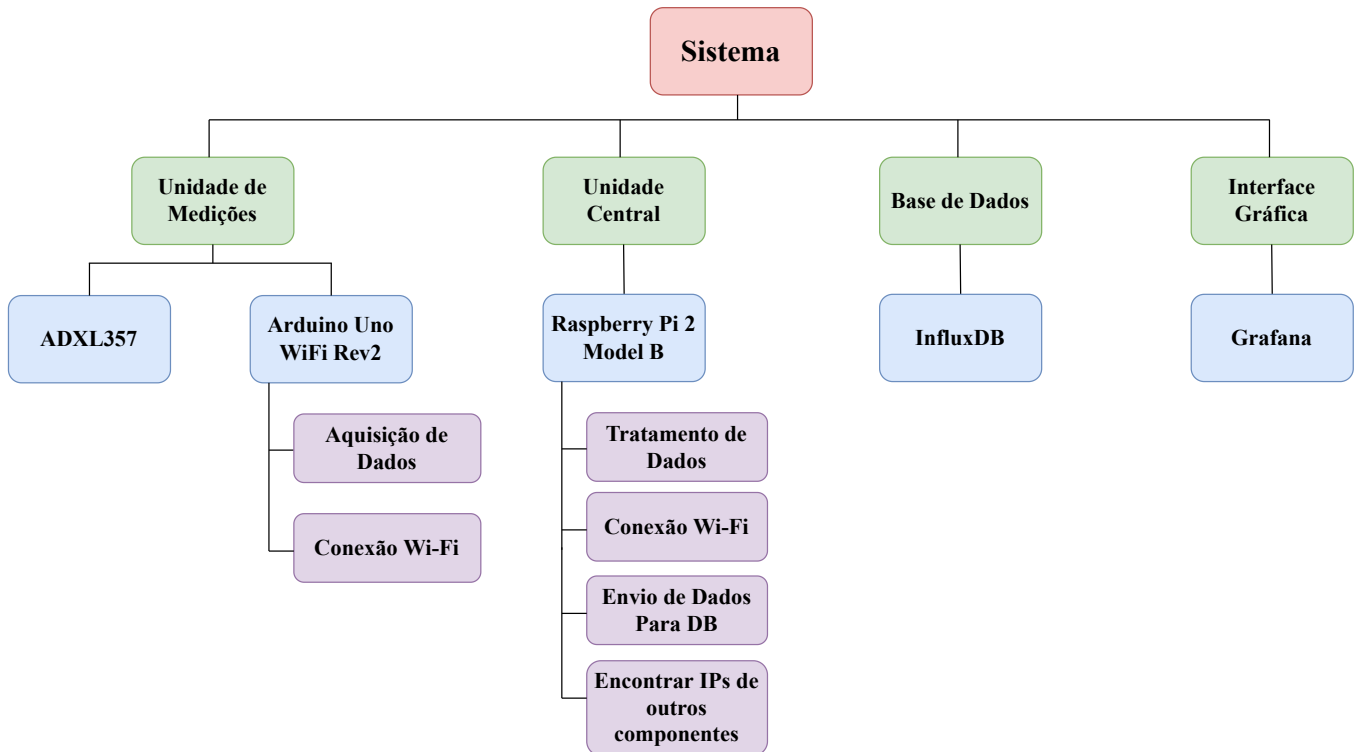


Figura 1: System Breakdown Structure

A Unidade de Medições é composta por dois componentes principais, um sensor de acelerações de 3 eixos, ADXL357, que será o componente responsável por fazer as medições, e um Arduino Uno WiFi Rev2, responsável por recolher as medições do sensor e enviá-las para a Unidade Central via *WiFi*.

A Unidade Central é constituída por um Raspberry Pi 2 Model B, responsável por encontrar os endereços IP de receber os dados das acelerações via *WiFi*, processá-los obtendo frequências e enviá-los para a DB. Para a Base de Dados é utilizado o InfluxDB que é capaz de armazenar os dados recebidos da Unidade Central, atribuindo a cada dado *timespamps*. Por fim, a Interface Gráfica é implementada recorrendo à ferramenta Grafana, que através de *queries* à DB, consegue adquirir os dados armazenados e apresentá-los sobre a forma de gráficos temporais e apresentar estatísticas sobre os dados.

## 5 Ferramentas Utilizadas no Projeto

Nesta secção apresentamos algumas ferramentas utilizadas para auxiliar a coordenação e evolução do projeto.

Estas ferramentas são, nomeadamente, o *GitHub* para controlar versões de código, *Google Drive* para organização, documentação adicional, partilhada com toda a equipa e o *Discord* para comunicação entre todos os elementos da equipa.

## 6 Arquitetura funcional

Este modelo arquitetônico tem como principal objetivo identificar a função de sistema e as suas respectivas interações. Por outras palavras, define como as funções funcionarão em conjunto de modo a atingir os objetivos do sistema. Algumas das suas vantagens estão relacionadas com maior eficiência e consistência, melhor desempenho e redução de trabalho a longo prazo.

Na Figura 2 está representada arquitetura funcional deste projeto. Os principais módulos desta arquitetura, em específico, são a unidade de medições, a unidade central e a interface gráfica. A unidade de medições é responsável pela aquisição de dados brutos, provenientes de um acelerômetro de três eixos. O MicroControlador é responsável por agir como um servidor, onde este recebe pedidos através da interface *WiFi*. Após receber um pedido de dados, o MicroControlador estrutura um conjunto de medições e envia estas como resposta.

A unidade central é composta por um cliente e o processamento de dados. O cliente é responsável por descobrir o servidor da unidade de medições na rede em que estes se encontram. Após encontrar o servidor, este vai pedir as medições ao servidor, de modo a extrapolar a frequência atual. Para realizar esta extrapolação, a unidade central possui um bloco de processamento de dados, onde se realiza uma Fast Fourier Transform (FFT) dos dados de aceleração obtidos. Com a frequência obtida, o cliente é também responsável por enviar estes valores para uma base de dados, de modo armazená-los.

A interface gráfica permite ao utilizador visualizar os valores de vibração guardados na base de dados sob a forma de gráficos, assim como pedir outros valores relevantes, tal como a média, valores máximos e mínimos e o atual.

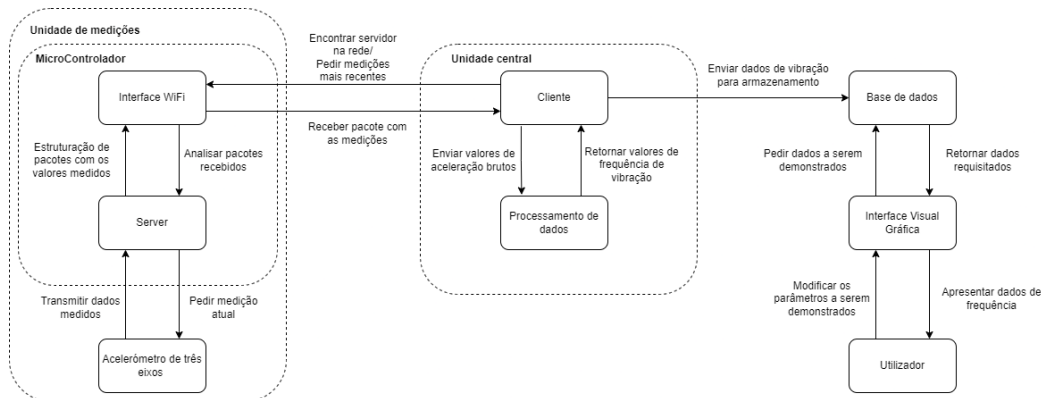


Figura 2: Diagrama de arquitetura funcional

## 7 KPI's Técnicos

Os índices de performance (KPI's) foram ferramentas fundamentais para avaliar o protótipo desenvolvido. Utilizamos KPIs técnicos para analisar 4 métricas importantes do desempenho do protótipo.

O Time to Boot, que mede o tempo que leva para o sistema iniciar, no caso apresentado é de aproximadamente 1 minuto e 13 segundos, o que é um tempo razoável e dentro dos padrões aceitáveis para este tipo de sistema.

Mean Time to Recover (MTTR) é uma métrica que mede o tempo médio necessário para recuperar um sistema depois de uma falha. O MTTR da Unidade de medições é de aproximadamente 14 segundos, o que é um bom desempenho, indicando que o protótipo é rápido e eficiente na recuperação de falhas na unidade de medições.

Já o MTTR da Unidade central é de 1 minutos 13 segundos, o que é um pouco mais alto que o anterior, mas ainda dentro dos padrões aceitáveis.

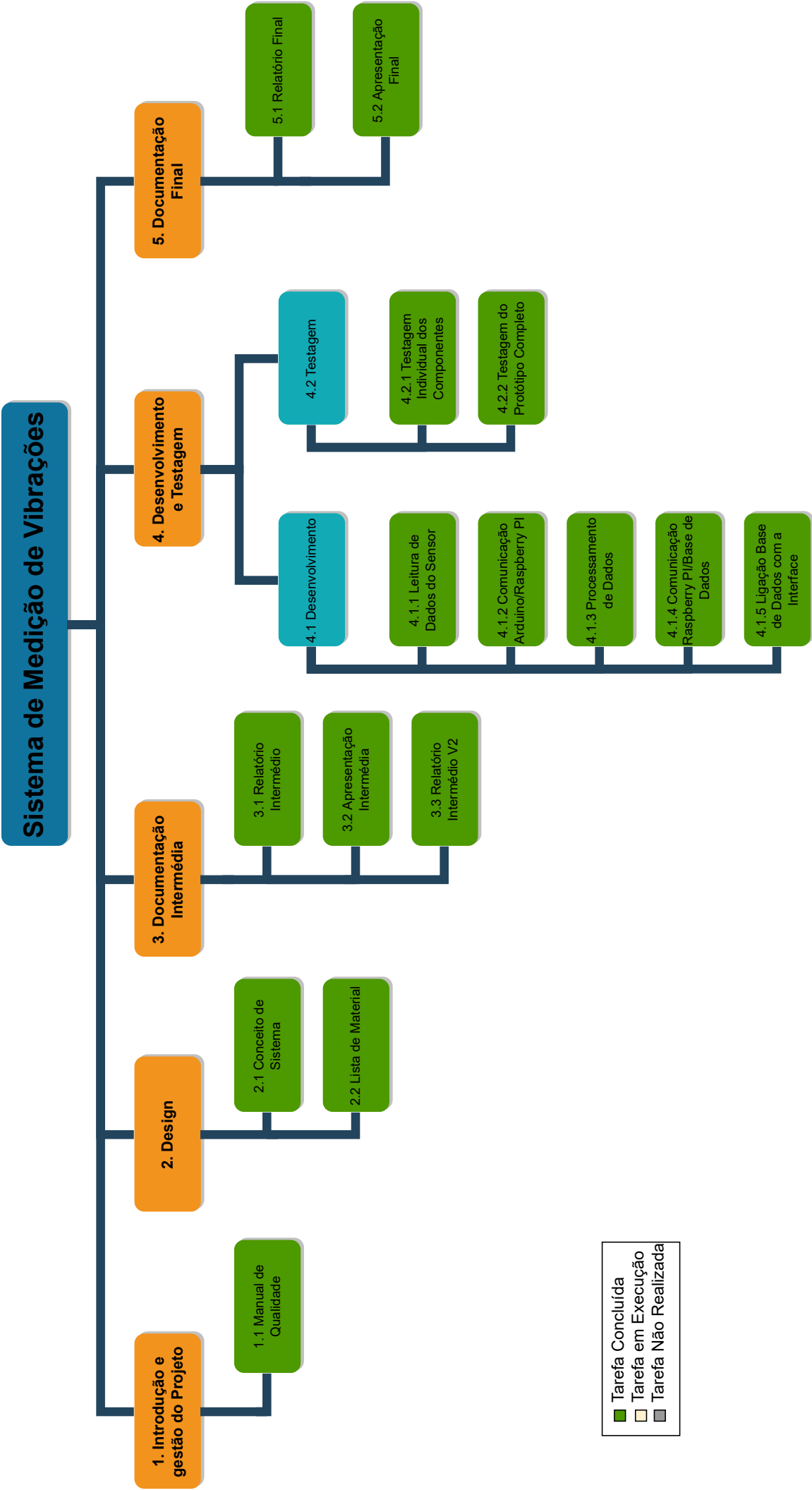
O último KPI utilizado avalia o tempo de resposta do sistema que no pior dos casos é 10 segundos.

## **8 Work Breakdown Structure**

A Work Breakdown Structure (WBS), também chamada estrutura analítica do projeto, é a divisão do projeto na totalidade em partes mais pequenas e simples de modo a facilitar a gestão do mesmo.

O objetivo desta divisão é identificar os elementos-chave do projeto e definir subequipas responsáveis por um elemento. A partir do momento em que as subequipas são definidas, cabe a cada uma discutir entre si e determinar o que é necessário para atingir o pretendido.

A estrutura pode ser vista na figura seguinte:



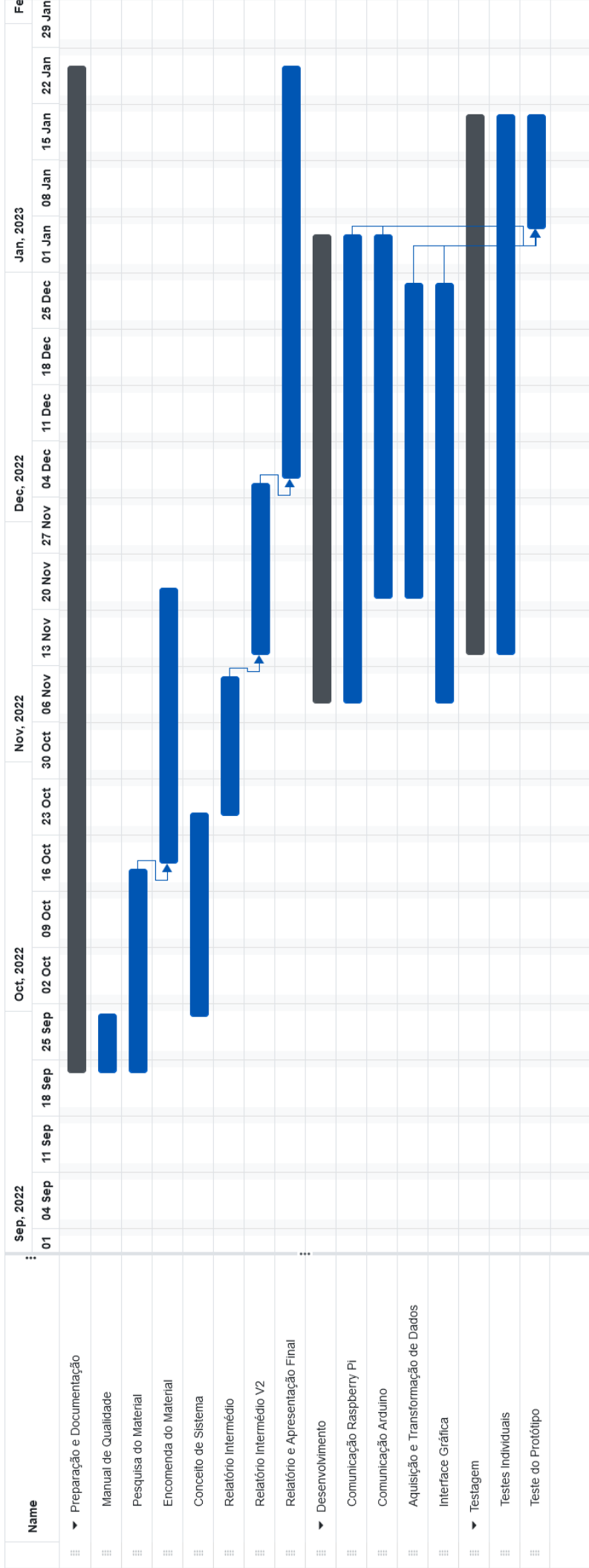


## 9 Planeamento Temporal

Após a decomposição do projeto em tarefas mais simples, houve a necessidade de se estimar o esforço necessário para a resolução de cada uma. Algumas dessas tarefas estarão, porventura, dependentes de outras para que possam ser levadas a cabo. Assim, de modo a ajudar na monitorização do projeto, procedeu-se ao planeamento temporal do projeto.

A calendarização do projeto define datas de início e de fim de cada tarefa conforme os recursos alocados e duração de tempo estimada. Serve também como uma espécie de *checklist*, garantindo que cada tarefa é realizada. Por outro lado, e em conjugação com a gestão de riscos, esta calendarização deve ser constantemente ajustado e revisto pela equipa de modo a garantir que reflete as necessidades e o estado atual do projeto.

Para este trabalho, a equipa representa este calendário sob a forma de um diagrama de Gantt. Uma representação detalhada e visual das tarefas a realizar e realizadas, este diagrama demonstra claramente os prazos do projeto, agrupando toda a informação necessária. O diagrama de Gantt desenvolvido pela equipa está exposto na figura seguinte.



## 10 Gestão de Riscos

Com cada decisão tomada pela equipa e com cada tarefa a executar está associado um risco intrínseco. Deste modo, é expetável que ocorram situações prejudiciais ao normal desenvolvimento do projeto. Tendo isto em conta, é preciso avaliar a probabilidade de ocorrência e a severidade ou impacto que a situação terá na eventualidade de ocorrer.

Após esta análise, devem ser definidas estratégias para mitigar os efeitos que as ocorrências possam ter sobre a equipa e/ou projeto.

Uma análise de algumas destas situações pode ser vista na figura e tabela seguintes:

		IMPACTO		
PROBABILIDADE		ACEITÁVEL	SÉRIO	CRÍTICO
	IMPROVÁVEL			
	POSSÍVEL			
	PROVÁVEL			

Figura 3: Matriz de Risco

Tabela 3: Plano de Gestão de Risco

Causa	Risco	Probabilidade	Impacto	Estratégia
Datas	Atraso na conclusão de uma tarefa	Provável	Aceitável	Rever e redefinir a distribuição de tarefas
	Atraso na entrega do material	Possível	Crítico	Procurar material alternativo emprestado e começar por realizar as tarefas que não dependem de material
Material	Escolha incorreta de método ou solução	Possível	Crítico	Estudar novamente e mais aprofundadamente o tópico
	Material danificado	Improvável	Crítico	Tentar ter material extra ou soluções alternativas
	Falta de conhecimento sobre a tecnologia	Possível	Crítico	Estudar mais sobre a tecnologia a utilizar antes de realizar as tarefas
Equipa	Falta de comunicação entre a equipa	Possível	Aceitável	Aumentar o contacto entre membros da equipa e realização mais frequente de reuniões de equipa e subequipa
	Conflito entre membros da equipa	Improvável	Aceitável	Tratar o assunto entre os membros em questão. Caso isto não seja possível, comunicar o problema ao líder de equipa

## 11 Gestão de Equipa

Nesta secção, pretende-se clarificar a organização da equipa, mais especificamente os cargos existentes, as respetivas funções, e sua distribuição.

### 11.1 Elementos

Nome	Número Estudante	Especialização
Catarina Reste	201806184	Automação
Diogo Andrade	201806693	Automação
Francisco Sousa	201806136	Automação
Gonçalo Queirós	201806758	TEC
João Freixo	201806867	Automação
Pedro Barros	201806365	Automação
Ricardo Silva	201809483	Automação
Sérgio Silva	201806456	TEC
Vitória Correia	201806870	TEC

Tabela 4: Elementos

### 11.2 Responsabilidade e Organização

Foram criados cargos dentro da equipa, com responsabilidades bem definidas, por forma a garantir o seu bom funcionamento. Estes cargos estão representados na tabela 5, assim como as responsabilidades a eles associadas.

Cargo	Funções
Líder	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Divisão das tarefas e definição dos prazos de entrega</li> <li>• Distribuição das tarefas pelos membros da equipa</li> <li>• Agendamento das reuniões</li> <li>• Realizar a comunicação com o docente/cliente</li> </ul>
Sub-líder	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Substituição do líder da equipa na possível eventualidade de este ficar impossibilitado de exercer as suas funções</li> </ul>
Secretário	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elaboração das atas das reuniões</li> <li>• Responsável por tomar notas sobre os assuntos discutidos nas reuniões de equipa</li> </ul>
Facilitador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moderação das reuniões semanais entre a equipa</li> <li>• Garantia de que todos os elementos da equipa tenham oportunidade de intervir na sessão</li> </ul>
Responsável pela validação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gestão do repositório <i>GitHub</i> associado ao projeto</li> <li>• Testar e verificar possíveis alterações ao <i>main branch</i> do projeto</li> </ul>
Responsável pela documentação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisão da escrita da documentação a ser produzida pela equipa</li> <li>• Responsável por garantir a execução de toda a documentação necessária para o projeto</li> </ul>

Tabela 5: Cargos criados dentro da equipa

Após a criação dos cargos, procedeu-se à sua distribuição entre os elementos da equipa. O seu resultado encontra-se exposto na tabela 6.

<b>Nome</b>	<b>Número Estudante</b>	<b>Cargo atribuído</b>
Catarina Reste	201806184	Secretária
Diogo Andrade	201806693	Sub-líder
Francisco Sousa	201806136	—
Gonçalo Queirós	201806758	Responsável pela documentação
João Freixo	201806867	Responsável pela validação
Pedro Barros	201806365	Facilitador
Ricardo Silva	201809483	—
Sérgio Silva	201806456	Líder
Vitória Correia	201806870	—

Tabela 6: Constituição da equipa e respetivos cargos

Já na parte de desenvolvimento do projeto, a equipa foi dividida em sub-equipas. Em que por vezes foram alocados mais ou menos recursos a cada subequipa tendo em conta o trabalho proposto. A divisão das sub-equipas está apresentado na seguinte tabela 7.

Sub-Equipa	Elemento
Aquisição de Dados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Catarina Reste</li> <li>• Diogo Andrade</li> <li>• Francisco Sousa</li> </ul>
Comunicação para Raspberry	<ul style="list-style-type: none"> <li>• João Freixo</li> <li>• Ricardo Silva</li> <li>• Vitória Correia</li> </ul>
Comunicação para DB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gonçalo Queirós</li> <li>• Sérgio Silva</li> </ul>
GUI - Grafana	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pedro Barros</li> </ul>

Tabela 7: Cargos criados dentro da equipa

### 11.3 Gestão de Conflitos

- A equipa deverá estar preparada para enfrentar eventuais conflitos que possam surgir entre um ou mais membros.
- No caso em que as partes interessadas não consigam resolver o conflito existente entre si, esta situação deverá ser endereçada na próxima reunião entre os membros da equipa. Nesta, todas as partes envolvidas deverão ter a oportunidade de expressão e/ou justificação para que, em conjunto, a equipa consiga solucionar o problema.
- O cenário a que se pretenderá chegar primeiro é a resolução do conflito. Este cenário é atingido quando se garante, com todos os envolventes, que uma solução foi encontrada e que todos estão verdadeiramente de acordo com ela, podendo retomar o trabalho sem impedimentos.
- Caso tal não seja possível, a base de resolução do conflito será a negociação, em que, com a solução encontrada, poder-se-á ou não ter de se comprometer algo de modo a atingir um consenso e satisfazer as partes envolventes.



## 11.4 Avaliações Interpares

A avaliação foi efetuada quinzenalmente por todos os elementos, recorrendo a um documento *Excel* partilhado com toda a equipa. O método consistiu na atribuição, por cada membro, de uma nota entre -2 e +2, aos restantes, sendo que a soma de todas as notas deveria ser nula. Caso a soma não fosse zero, o líder era responsável por rever e corrigir a avaliação para se adequar a este critério. Na tabela abaixo encontram-se expressas as avaliações dadas internamente por todos os elementos a equipa.

Avaliações	Catarina	Diogo	Francisco	João	Gonçalo	Pedro	Ricardo	Sérgio	Vitória	Soma
Catarina Reste	0	-1	-1	0	1	1	0	0	0	0
Diogo Andrade	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Francisco Sousa	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Gonçalo Queirós	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0
João Freixo	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0
Pedro Barros	0	0	-1	0	-1	0	1	1	0	0
Ricardo Silva	0	0	1	0	0	0	0	-1	0	0
Sérgio Silva	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
Vitória Correia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## 11.5 KPI's Gestão de Projeto

Os índices de performance (KPI's) foram ferramentas fundamentais para a gestão da nossa equipa, porque nos permitiram medir o desempenho da equipa e identificar áreas de melhoria. Em geral, achamos que os resultados foram bastante positivos.

Em primeiro lugar, os requisitos completos foram aproximadamente 95%, o que significa que a equipa foi capaz de cumprir praticamente todas as metas estabelecidas. Faltou o requisito que garantia que a unidade de aquisição aguenta as condições climáticas de uma turbina eólica. Apesar de termos colocado a unidade dentro de uma caixa, não tivemos como testar as condições. Este KPI foi particularmente útil durante o decorrer do projeto para verificar que estávamos no caminho certo e em progresso contínuo.

Em segundo lugar, as tarefas entregues fora do prazo representam cerca de 10%, o que foi um resultado aceitável, visto que estamos todos em cursos com percursos diferentes e há picos de trabalho imprevisíveis.

Por último, o orçamento gasto foi de 54%. Isso significa que a equipa conseguiu manter as despesas dentro dos limites estabelecidos, o que é um ótimo indicador de competitividade da nossa solução.

## 12 Trabalho desenvolvido

### 12.1 Trabalho Realizado

#### 12.1.1 Montagem do Sensor e Circuito

Devido ao facto de o sensor ADXL357 ser um *Surface-Mounted Device* (SMD), foi necessário desenvolver uma *Pinout Board*, Figura 4, de forma a conectar o sensor a outros componentes.

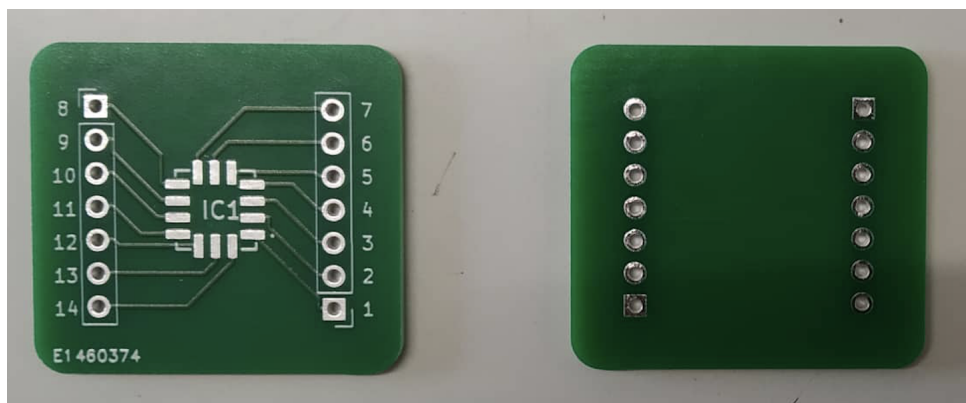


Figura 4: *Pinout Board* utilizada para o sensor ADXL357

Foi utilizado o circuito recomendado pela data-sheet do sensor, de modo a alimentar e criar canais de conexão com o mesmo. O diagrama do circuito pode ser observado na figura 5 e uma imagem da montagem na Figura 6.

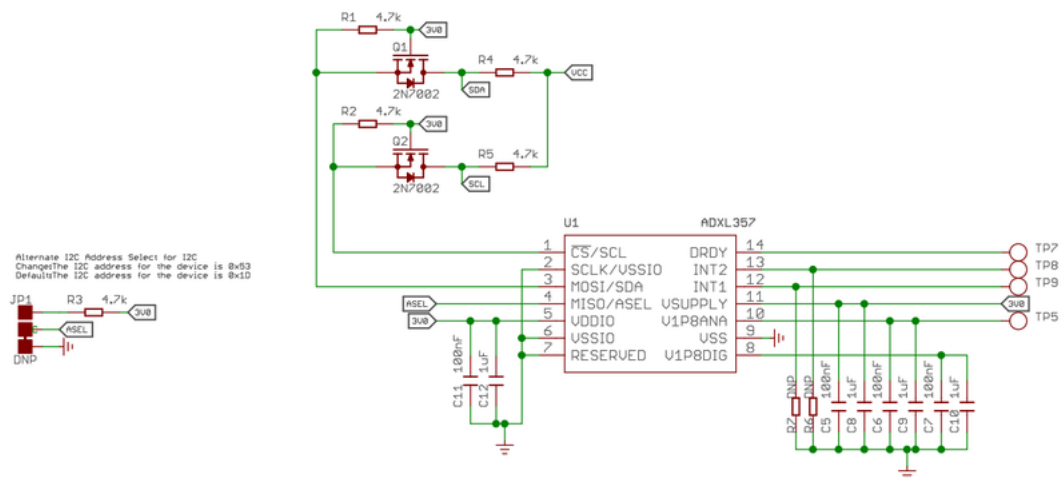


Figura 5: Esquema de montagem

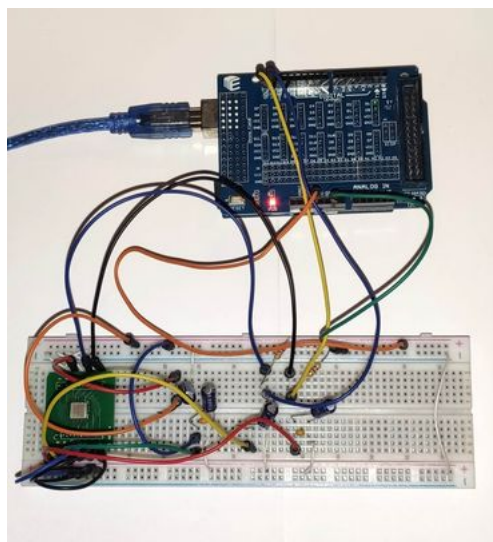


Figura 6: Montagem do arduino e sensor

### 12.1.2 Aquisição de Dados

A aquisição de dados entre o sensor ADXL357 no Arduino é efetuada pelo protocolo I2C. O sensor foi calibrado para uma frequência de amostragem de

500Hz, ou seja, uma amostra a cada 2ms. Os dados adquiridos são os da aceleração em Gs três eixos X, Y, e Z.

### 12.1.3 Comunicação Arduino Uno WiFi R2 - Raspberry Pi 2

De forma a estabelecer a ligação entre o *Arduino UNO WiFi R2* e o *Raspberry Pi 2* foi utilizado um modelo do tipo cliente-servidor. Neste caso, o cliente corresponde ao *script* de Python alojado no *Raspberry Pi 2* e o servidor corresponde ao *Arduino UNO WiFi R2*.

Optou-se por realizar a comunicação através de transmissões de datagramas via protocolo UDP, principalmente devido a duas razões. A primeira razão está relacionada com o facto de não ser necessário estabelecer uma conexão. No caso de ocorrer um problema tanto no servidor como no cliente, a conexão é restaurada automaticamente; deste modo, não existem atrasos significativos relativamente ao instante de tempo em que os dados chegam ao *Arduino UNO WiFi R2* e o instante de tempo em que os dados são recebidos pelo *Raspberry Pi 2*. Por sua vez, a segunda razão está relacionada com o facto da possível perda de datagramas não afetar o desempenho do sistema, tendo em conta a grande quantidade de medições realizadas por intervalo de tempo.

Os datagramas enviados pelo Arduino são constituídos por 64 medições, sendo que cada medição contém a informação da aceleração dos três eixos, e uma checksum, calculada através do XOR de todos os bytes do datagrama. Estas medições de aceleração são transformadas de "floats" para arrays de "chars", onde o sinal é traduzido para um "char" final, onde "P" representa um número positivo, e o N representa um número negativo. Assim, uma medição é exprimida, como exemplo, da seguinte forma:

0.23P0.45N3.23P

O Raspberry Pi inicia a comunicação com um scan rede onde se encontra, onde este descobre o seu próprio IP, e através de uma máscara de rede de 24 bits, percorre todos os IPs da rede local possíveis, até encontrar o Arduino. Após encontrar o Arduino, este procede a pedir os dados de aceleração num ciclo infinito.

## 12.2 Tratamento de Dados

Após a confirmação e estabelecimento de ligação com o Arduino, começam a ser recebidos pacotes UDP com 64 amostras dos valores da aceleração em X, Y e

Z. Estes pacotes contêm também um checksum no final de modo a garantir que os dados estão corretos.

Antes de qualquer análise ser realizada, são pedidas 256 amostras, o correspondente a 4 pacotes, à unidade de medições. Este número de amostras foi escolhido, pois não só permite uma maior resolução espectral em comparação as 64 amostras que a unidade de medições consegue armazenar, mas também uma análise espectral realizada rapidamente o suficiente de modo a tentar evitar períodos em que medições não são feitas.

A seguir, é utilizada realizada uma Fast Fourier Transform (FFT) discreta para valores reais nos dados de cada eixo. Ao utilizar a função para valores reais (RFFT ao contrário do mais comum FFT) apenas a parte positiva do eixo das frequências é calculado, diminuindo o número de cálculos que é necessário realizar. As FFTs dos vários eixos são realizadas em threads separadas para acelerar o processo de obtenção dos dados necessários.

Finalmente, com a FFT de cada eixo obtida, os valores de magnitude são analisados para determinar a que frequência corresponde o maior valor. No entanto, existem algumas medidas que foram tomadas de modo a melhorar a qualidade dos resultados e diminuir outliers:

- Um threshold é aplicado à magnitude da FFT, para evitar que valores de ruído, ou seja, valores com magnitudes pouco significantes e próximas dos valores em descanso, sejam tomados como valores de frequência. Se nenhum valor com magnitude acima do threshold for encontrado, a frequência é definida como sendo 0 Hz.
- Se o maior pico de magnitude for detetado como sendo acima dos 100 Hz desejados, é descartado e um novo valor mais elevado é obtido. Este mecanismo repete-se até um valor na gama dos 0.1-100Hz ser encontrado. Isto foi implementado para garantir resultados dentro da gama para o qual o sensor foi pensado e calibrado, e não uma possível anomalia resultante da análise espectral.
- Qualquer pico no valor de 0 Hz não é considerado válido, devido ao potencial dos valores obtidos pelo sensor serem afetados pela gravidade, representando uma força constante exercida no sensor e assim não relevante para as nossas medições.

No fim deste processo de tratamento e processamento de dados, são obtidos os dados válidos de frequência a serem enviados para a base de dados.

### 12.2.1 Comunicação Raspberry Pi 2 - InfluxDB

O processo de envio de dados do Raspberry Pi 2 para a base de dados InfluxDB consiste na utilização da biblioteca `influxdb_client` para Python. Para isto é inicialmente definida a organização registada com o InfluxDB, assim como o url para a cloud onde os dados estão guardados e um API token correspondente à organização de modo a autorizar o envio de dados sem revelar as credenciais de acesso.

Após o setup inicial do cliente da base de dados, e com os valores de frequência obtidos, cada valor é inserido num `point` a ser enviado. Cada `point` contém vários campos que permitem, por exemplo, a identificação de vários dispositivos ou de vários campos diferentes.

Um exemplo da atribuição e definição destes `points` é visível no excerto seguinte:

```
pointX = (Point("Arduino_1")
          .tag("Frequency_tag", "FrequencyValue")
          .field("FrequencyX", result_x))

pointY = (Point("Arduino_1")
          .tag("Frequency_tag", "FrequencyValue")
          .field("FrequencyY", result_y))

pointZ = (Point("Arduino_1")
          .tag("Frequency_tag", "FrequencyValue")
          .field("FrequencyZ", result_z))
```

Com todos os pontos de dados definidos, é utilizada a função `write` do API para enviar simultaneamente os dados.

### 12.3 Ligação InfluxDB - Grafana

O Grafana acede aos dados armazenados no InfluxDB através de queries feitas na linguagem Flux. Estas queries podem ser alteradas para obter várias representações de dados tais como o valor máximo, o valor mínimo, a média e o valor mais recente.

Um exemplo de query para obter o valor médio pode ser visto no excerto seguinte:

```
from(bucket: "Vibration Measurements")
```

```
|> range(start: v.timeRangeStart, stop: v.timeRangeStop)
|> filter(fn: (r) => r["Frequency_tag"] == "FrequencyValue")
|> filter(fn: (r) => r["_field"] == "FrequencyZ")
|> aggregateWindow(every: v.windowPeriod, fn: mean, createEmpty: false)
|> yield(name: "mean")
```



## 13 Resultados

Os resultados das medições são apresentados numa dashboard do Grafana que representa os valores atuais e máximos de vibração para os diferentes eixos do referencial de orientação do sensor (*Figura 7*). Esta dashboard inclui ainda um gráfico que permite verificar um histórico das vibrações medidas para janelas temporais ajustáveis entre diferentes escalas, desde os últimos minutos até aos últimos meses. De referir que a aplicação permite definir alertas com diferentes graus de severidade para, notificando o cliente assim que valores pré-definidos de vibração são atingidos. Em relação à acuidade dos dados, não foi possível testar a montagem com uma ferramenta capaz de produzir frequências constantes similares às existentes em turbinas eólicas. Ainda assim, e recorrendo a outros métodos, foi possível verificar que a secção do tratamento de dados descrita no *Capítulo 12* é capaz de filtrar grande parte ruído, com a exceção de picos na ordem dos 100Hz (máximo detetável) quando há toques abruptos na caixa de proteção.

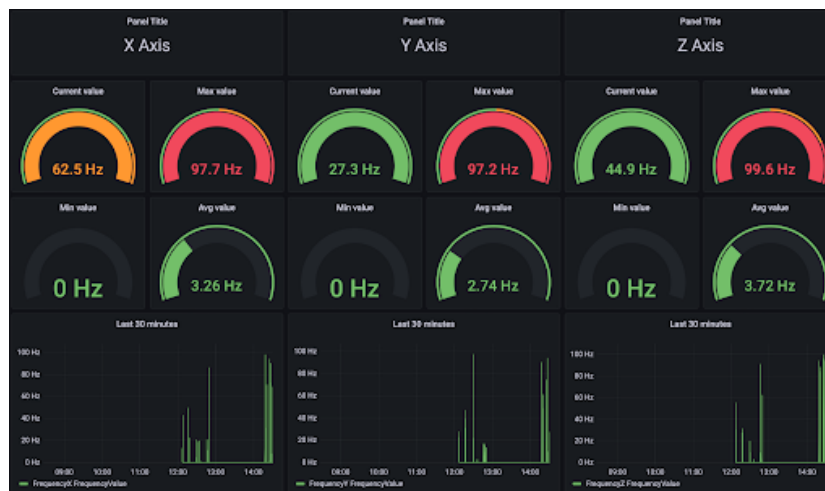


Figura 7: Representação gráfica dos resultados numa dashboard do Grafana

## 14 Recomendações para a cadeira

De uma forma geral, Engenharia de Sistemas promoveu os conceitos a que se propôs, nomeadamente o trabalho em equipa com recurso a técnicas de gestão de projetos para incrementar a produtividade, calendarizar o desenvolvimento de um produto e gerir recursos. Ao longo do semestre, foi possível agendar reuniões com o cliente sempre que necessário, sob diferentes tipos de formato (presencial, à distância e misto), permitindo à equipa ter *feedback* constante em relação às decisões tomadas.

Em relação à nossa proposta em particular e com a experiência obtida no desenvolvimento da mesma, teria sido positivo se tivéssemos definido requisitos funcionais menos genéricos e adequados às normas da indústria, algo que desconhecíamos inicialmente. As normas internacionais relacionadas com a medição e avaliação de frequências de vibração em turbinas eólicas *IEC 61400-1* e *61400-11*, por exemplo, não estão disponíveis abertamente. Da mesma forma, o standard da indústria para medições varia de acordo com as dimensões das turbinas e com o posicionamento dos sensores nos seus diferentes componentes, não tendo sido possível avaliar da melhor forma os resultados obtidos. Assim, sugerir aos estudantes, no início do semestre, a procura das normas industriais relativas a cada projeto e a definir objetivos mais concretos pode, em alguns casos, ajudar na avaliação dos resultados dos obtidos.

## Referências

- [1] “Top 9 accurate wireless vibration monitoring systems.” <https://blog.endaq.com/top-accurate-wireless-vibration-monitoring-systems/>. Accessed: 19-10-2022.
- [2] “Fluke 3563 vibration analysis sensor: Your command center for condition monitoring.” <https://info.fluke.com/fs-0621-fluke-3563-analysis-vibration-sensor-lp-1-a>. Accessed: 19-10-2022.
- [3] “Wind turbine monitoring structural health monitoring and condition monitoring of wind turbines”.” <https://dewesoft.com/applications/monitoring/wind-turbine-monitoring>. Accessed: 19-10-2022.