



Sistema distribuído para a monitorização e comunicação de dados da aplicação Pavement Energy Harvesting

LUÍS FILIPE ROCHA ARAÚJO

novembro de 2021

Sistema distribuído para a monitorização e comunicação de dados da aplicação Pavement Energy Harvesting

Luís Filipe Rocha Araújo - 1171277
8 de novembro de 2021



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2021

Este relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Luís Filipe Rocha Araújo, Nº 1171277, 1171277@isep.ipp.pt

Orientação científica: Professora Doutora Cecília Reis, cmr@isep.ipp.pt

Corientação científica: Professor Nuno Dias, nnd@isep.ipp.pt

Empresa: Pavnext – Technological Pavements, Lda

Supervisão: Francisco João Anastácio Duarte, fd.pavnext@gmail.com



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Agradecimentos

Na realização deste projeto de Mestrado recebi o apoio e ajuda de diversas pessoas que tornaram a finalização deste trabalho possível. Quero agradecer de forma particular a algumas pessoas pelo grande apoio ao longo desta jornada.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Dr. Francisco Duarte pela oportunidade, apoio e disponibilidade que apresentou ao longo do desenvolvimento de todo o projeto.

Agradeço de igual forma, aos professores Cecília Reis e Nuno Dias pela ajuda indispensável para me orientar e aconselhar ao longo do projeto.

Gostaria de agradecer aos meus pais por sempre me apoiarem e motivarem neste percurso académico, que por mais complicado tenha sido sempre pude contar com o apoio deles.

Aos meus amigos e colegas pela amizade, ajuda e união que me ajudaram, ao longo dos meus anos como universitário, a chegar onde estou hoje.

Por fim, quero agradecer em especial à minha namorada, que sempre esteve pronta a apoiar-me e a motivar-me para conseguir enfrentar as dificuldades que encontrei ao longo do meu percurso. Com certeza, sem o seu apoio e ajuda este trabalho não seria possível.

Resumo

O projeto em questão surge da necessidade da implementação de um sistema de monitorização e comunicação de dados nos equipamentos Pavement Energy Harvesting da Pavnext, com o objetivo de monitorizar o fluxo rodoviário e os dados adquiridos na passagem de carros.

Os equipamentos Pavement Energy Harvesting consistem em vários módulos mecânicos dispostos em pares lado a lado numa rodovia, que visam reduzir a velocidade da passagem de automóveis, ao converter a energia desperdiçada na travagem em energia elétrica. Para tal, foi desenvolvido um sistema distribuído capaz de fazer a recolha, processamento e envio de dados recolhidos quando ocorrer a passagem de um carro.

O sistema distribuído é composto por três tipos de módulos. O módulo de aquisição de dados está instalado nos módulos mecânicos e tem por objetivo detetar e efetuar as leituras dos sensores ao longo da passagem de um carro e, de seguida, realizar o envio dos dados de cada um dos módulos de aquisição para o módulo agregador.

De seguida, o módulo agregador realiza o agrupamento e analisa todos os dados enviadas por cada um dos módulos de aquisição, a fim de processar estas mensagens em informação relevante tais como erros detetados, velocidade do carro e cálculo energético total.

Este conjunto de módulos é capaz de monitorizar veículos numa única estrada. Assim, para tornar o sistema capaz de monitorizar veículos em diferentes rodovias é ainda necessário a existência de um último módulo, o módulo universal, que visa receber as mensagens geradas pelos vários módulos agregadores e enviar esta informação para uma base de dados.

Para além disto, foi desenvolvido um *software* de monitorização capaz de fazer a interface entre o computador e cada um dos módulos desenvolvidos, sendo desta forma possível realizar a monitorização através de gráficos e tabelas da informação recebida e enviada.

Por fim, com o intuito de verificar o funcionamento do trabalho desenvolvido foram ainda realizados testes em laboratório e em estrada. Com estes testes foi possível verificar que o sistema é capaz de realizar a aquisição, comunicação e análise da informação enviada, o que torna assim exequível a monitorização do tráfego rodoviário.

Palavras-Chave

Microcontrolador, *Pavement Energy Harvesting*, *Smart Cities*, Pavnext, STM32, Monitorização de tráfego.

Abstract

The project in question arises from the need to implement a monitoring and data communication system in Pavnext's Pavement Energy Harvesting equipment, with the purpose of monitoring the road flow and data acquired when cars pass.

The Pavement Energy Harvesting equipments consist of several mechanical modules arranged in pairs side by side on a highway, which aim to reduce the speed of passing cars by converting the energy wasted in braking into electrical energy. For this purpose, a distributed system was developed that is capable of collecting, processing and sending the data collected when a car passes.

The distributed system is composed of three types of modules. The data acquisition module is installed in the mechanical modules and its purpose is to detect and perform the sensor readings along the passage of a car and then send the data from each of the acquisition modules to the aggregator module.

Afterwards, the aggregator module groups and analyzes all the data sent by each of the acquisition modules, in order to process these messages into relevant information such as detected errors, car speed and total energy calculation.

This set of modules is capable of monitoring vehicles on a single road. Thus, to make the system capable of monitoring vehicles on different roads it is still necessary the existence of a last module, the universal module, which aims to receive the messages generated by the various aggregator modules and send this information to a database.

Besides this, a monitoring software was developed capable of interfacing the computer with each of the developed modules to be able to monitor the information received and sent through graphs and tables.

Finally, in order to verify the operation of the developed system, laboratory and road tests were also performed. With these tests it was possible to verify that the system is able to perform the acquisition, communication and analysis of the information sent, thus making it feasible to monitor road traffic.

Keywords

Microcontroller, Pavement Energy Harvesting, Smart Cities, Pavnext, STM32, Traffic Monitoring.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 MOTIVAÇÃO	2
1.3 OBJETIVOS	4
1.4 CALENDARIZAÇÃO	5
1.5 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	5
2 ESTADO DA ARTE	7
2.1 SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO	7
2.2 SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO DE TRÁFEGO	8
2.3 APLICAÇÕES EXISTENTES ATUALMENTE	10
3 ANÁLISE DE REQUISITOS	13
3.1 INTRODUÇÃO	13
3.2 PROTÓTIPO ANTERIOR	15
3.3 REQUISITOS DO SISTEMA	16
3.3.1 Módulo de aquisição Local	16
3.3.2 Módulo Agregador	17
3.3.3 Módulo Universal	17
4 ARQUITETURA DO SISTEMA	19
4.1 INTRODUÇÃO	19
4.2 MICROCONTROLADOR	20
4.3 COMUNICAÇÃO USART	22
4.4 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO PARA SENSORES	23
4.4.1 Interface SPI vs I2C	24
4.4.2 Trama de dados SPI vs I2C	26
4.4.3 Protocolo mais adequado	26
4.5 SENSORES	27
4.5.1 Acelerómetro	27

4.5.2	<i>Sensor Temperatura e Humidade</i>	29
4.5.3	<i>Medição da Tensão e Corrente do gerador</i>	30
4.5.4	<i>Medição do Peso</i>	34
5	IMPLEMENTAÇÃO	37
5.1	<i>HARDWARE</i>	37
5.1.1	<i>Módulo Aquisição</i>	37
5.1.2	<i>Módulo Agregador</i>	45
5.1.3	<i>Módulo Universal</i>	49
5.1.4	<i>Alimentação dos módulos</i>	51
5.1.5	<i>Design final das PCBs</i>	52
5.2	<i>FIRMWARE</i>	54
5.2.1	<i>Algoritmo do módulo de aquisição</i>	54
5.2.2	<i>Algoritmo do módulo agregador</i>	69
5.2.3	<i>Algoritmo do módulo de universal</i>	79
5.2.4	<i>Software de monitorização</i>	85
6	RESULTADOS	89
6.1	<i>TESTES EM LABORATÓRIO</i>	89
6.1.1	<i>Módulo de aquisição</i>	90
6.1.2	<i>Módulo agregador</i>	94
6.1.3	<i>Módulo universal</i>	95
6.2	<i>TESTES NO TERRENO</i>	96
6.2.1	<i>Módulo de aquisição e agregador</i>	97
6.2.2	<i>Passagem de carro com 1 módulo agregador e 4 de aquisição</i>	97
6.2.3	<i>Passagem de carro com dois módulos agregadores com dois de aquisição para cada</i>	101
7	CONCLUSÃO	105
7.1	<i>OBJETIVOS REALIZADOS</i>	105
7.2	<i>LIMITAÇÕES E MELHORIAS FUTURAS</i>	106
8	REFERÊNCIAS	107

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Logo da empresa Pavnext [7]	2
Figura 1.2 – Esquema da disposição do sistema a ser colocado numa rodovia	4
Figura 1.3 – Gráfico de Gantt da planificação do projeto	5
Figura 2.1 – Diagrama do processo geral de monitorização	7
Figura 2.2 – Tipos de sensores de sistemas de monitorização intrusiva [17].....	9
Figura 2.3 – Tipos de sensores de sistemas de monitorização não intrusiva [17].....	10
Figura 2.4 – Sistema de monitorização de vídeo da Swarco [19]	11
Figura 2.5 – Sistema de monitorização por tubagens pneumáticas [20]	11
Figura 2.6 – Sistemas de monitorização ALL TRAFIC SOLUTIONS [21].....	12
Figura 3.1 – Diagrama da interligação entre módulos de aquisição e o módulo agregador.....	14
Figura 3.2 – Diagrama da interligação entre os módulos agregadores e módulo universal.....	15
Figura 3.3 – Esquema final da disposição de cada módulo no sistema.....	15
Figura 3.4 - Módulo de Aquisição do protótipo anterior [14].....	16
Figura 3.5 – Módulo Agregador do protótipo anterior [14]	16
Figura 4.1 – Diagrama da arquitetura geral do sistema.....	19
Figura 4.2 – Módulo de desenvolvimento NUCLEO-G431KB [25]	21
Figura 4.3 – Módulo de desenvolvimentos NUCLEO-L476RG[26].....	21
Figura 4.4 – <i>Transceiver</i> max485 [30]	23
Figura 4.5 – Barramento de uma comunicação I2C.....	25
Figura 4.6 – Barramento de uma comunicação SPI.....	25
Figura 4.7 – Trama de comunicação I2C	26
Figura 4.8 – Trama de comunicação SPI [35].....	26
Figura 4.9 – Acelerómetro ADX345[37]	28
Figura 4.10 – Placa soldada do sensor ADXL345 [38].....	28
Figura 4.11 – Sensor de temperatura e humidade HTS221 [40]	29
Figura 4.12 – Placa soldada do HTS221[41]	30
Figura 4.13 – Sensor de corrente ACS725[42]	31
Figura 4.14 – Amplificador operacional LM358P [45]	32
Figura 4.15 – Inversor TPS6040DBVT [46].....	33
Figura 4.16 – Conversor analógico-digital MCP3004 [49].....	34
Figura 4.17 – Biela com extensómetros	35
Figura 4.18 – Conversor analógico-digital MCP3002 [51].....	35

Figura 5.1 – Esquema do circuito de conectores e max485 do Módulo de Aquisição.....	37
Figura 5.2 – Esquema do circuito de potência do Módulo de Aquisição.....	38
Figura 5.3 – Esquema do circuito de conector de sensores.....	38
Figura 5.4 – Esquema do Cristal externo do módulo de aquisição.....	39
Figura 5.5 – Esquema do circuito do MAX485.....	40
Figura 5.6 – Esquema do circuito da ponte retificadora AC/DC.....	41
Figura 5.7 – Esquema do divisor de tensão do gerador.....	42
Figura 5.8 – Esquema do <i>header</i> para a carga.....	42
Figura 5.9 – Esquema de um filtro passa baixo <i>Sallen-Key</i> [53].....	43
Figura 5.10 – Esquema do circuito do inversor de 5 V.....	43
Figura 5.11 – Esquema do filtro passa baixo <i>Sallen-Key</i>	44
Figura 5.12 – Esquema do circuito do conversor MCP3004.....	44
Figura 5.13 – Esquema do circuito do Nucleo-G431KB.....	45
Figura 5.14 – Esquema do circuito do Módulo Agregador.....	46
Figura 5.15 – Esquema do Cristal Oscilador externo do módulo agregador.....	47
Figura 5.16 – Esquema do circuito dos <i>transceivers</i> MAX485.....	47
Figura 5.17 – Esquema do circuito dos conetores de comunicação.....	48
Figura 5.18 – Esquema das conexões do módulo agregador com Nucleo-STM32L476RG.....	49
Figura 5.19 – Esquema do circuito do módulo Universal.....	50
Figura 5.20 – Esquema do circuito dos conetores de comunicação do módulo universal.....	50
Figura 5.21 – Esquema das conexões do módulo universal com Nucleo-STM32L476RG.....	51
Figura 5.22 – Circuito PCB do módulo de aquisição.....	52
Figura 5.23 – Circuito conector entre os sensores e módulo de aquisição.....	52
Figura 5.24 - Circuito PCB do módulo de agregador.....	52
Figura 5.25 – Circuito PCB do módulo de universal.....	52
Figura 5.26 - PCB de módulo de aquisição.....	53
Figura 5.27 – PCB do módulo agregador.....	53
Figura 5.28 – PCB do módulo universal.....	53
Figura 5.29 – Algoritmo <i>Main</i> do módulo de aquisição.....	55
Figura 5.30 – Algoritmo da interrupção externa do ADXL345.....	56
Figura 5.31 – Algoritmo referente ao temporizador de contagem de microssegundos.....	56
Figura 5.32 – Algoritmo da interrupção do por UART.....	57
Figura 5.33 – Configuração da frequência de funcionamento utilizada no módulo de aquisição....	62
Figura 5.34 – Mapeamento dos pinos do microcontrolador do módulo de aquisição.....	63

Figura 5.35 - Configurações de UART1 e 2	64
Figura 5.36 – Configurações de SPI.....	65
Figura 5.37 – Configurações do TIM1	66
Figura 5.38 – Fluxograma relativo ao código principal do módulo de agregador	70
Figura 5.39 – Algoritmo da interrupção UART 1	71
Figura 5.40 – Algoritmo da interrupção UART 3	72
Figura 5.41 – Configuração da frequência de funcionamento utilizada no módulo agregador.....	73
Figura 5.42 – Mapeamento dos pinos do microcontrolador do módulo agregador.....	74
Figura 5.43 - Configurações de UART 1 e 3 do módulo agregador	74
Figura 5.44 – Configurações do TIM1	75
Figura 5.45 – Fluxograma do código principal do módulo universal	80
Figura 5.46 – Fluxograma da interrupção do temporizador de 10 segundos	80
Figura 5.47 – Fluxograma da interrupção da interface UART 1.....	81
Figura 5.48 – Configuração da frequência de funcionamento utilizada no módulo universal	82
Figura 5.49 – Mapeamento dos pinos do microcontrolador do módulo agregador.....	83
Figura 5.50 - Configurações de UART 1 do módulo universal	84
Figura 5.51 – Configurações do TIM1	85
Figura 5.52 – Aparência do programa de monitorização para o módulo de aquisição	86
Figura 5.53 – Aparência do programa de monitorização para o módulo agregador	86
Figura 5.54 – Aparência do programa de monitorização para o módulo universal.....	87
Figura 6.1 – Sensores instalados no módulo mecânico.....	89
Figura 6.2 – Módulos dispostos em laboratório para testes	90
Figura 6.3 – Conjunto de gráficos um do programa de monitorização	91
Figura 6.4 – Conjunto de gráficos 2 do programa de monitorização	91
Figura 6.5 – Gráficos de acelerações aplicadas no módulo mecânico	92
Figura 6.6 – Gráfico de tensão e correntes dos dois geradores	93
Figura 6.7 – Gráficos de potência dos geradores	93
Figura 6.8 – Gráfico de energia gerada pelos geradores	94
Figura 6.9 – Tabela das mensagens do programa de monitorização do Módulo Agregador	94
Figura 6.10 - Tabela das mensagens do programa de monitorização do Módulo Universal	95
Figura 6.11 – Tabela do Módulo Universal da receção de mensagens de dois Módulos Agregadores	96
Figura 6.12 – Montagem dos protótipos mecânicos no terreno	96
Figura 6.13 – Módulos mecânicos instalados na rua.....	97
Figura 6.14 – Mensagens recebidas pelo Módulo Agregador a 20 km/h.....	98

Figura 6.15 – Mensagem recebida pelo Módulo Universal a 20 km/h.....	98
Figura 6.16 – Mensagens recebidas pelo Módulo Agregador a 30 km/h	99
Figura 6.17 – Mensagem recebida pelo Módulo Universal a 30 km/h.....	100
Figura 6.18 – Mensagens recebidas pelo Módulo Agregador a 40 km/h.....	100
Figura 6.19 – Mensagem recebida pelo Módulo Universal a 40 km/h.....	101
Figura 6.20 – Mensagens recebidas pelo Módulo Agregador 1	102
Figura 6.21 – Mensagens recebidas pelo Módulo Agregador 2.....	102
Figura 6.22 - Mensagens recebidas pelo Módulo Universal	103

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 – Comparações das comunicações SPI e I2C.....	24
Tabela 4.2 - Caraterísticas do acelerómetro ADXL345 [36]	28
Tabela 4.3 – Caraterísticas do sensor Temperatura e Humidade HTS221 [39]	29
Tabela 4.4 - Características do sensor de corrente ACS725LLCTR-10AB-T [43]	32
Tabela 4.5 – Características do amplificador operacional LM358P [44].....	32
Tabela 4.6 – Características do inversor TPS6040DBVT [47]	33
Tabela 4.7 – Características do conversor analógico-digital MCP3004 [48].....	34
Tabela 4.8 – Características do conversor analógico-digital MCP3002 [50].....	35
Tabela 5.1 - Conexões entre o Nucleo-G431kb e a PCB de aquisição	45
Tabela 5.2 – Conexões entre o Nucleo-L476RG e a PCB do agregador	49
Tabela 5.3 – Conexões entre o Nucleo-L476RG e a PCB do módulo universal.....	51
Tabela 5.4 – Registos de configuração do acelerómetro [36]	59
Tabela 5.5 – Configurações do sensor HTS221[39]	59
Tabela 5.6 – Conjuntos de registos a serem lidas para calibração [39].....	60
Tabela 5.7 – Linearização do sensor de corrente	61
Tabela 5.8 – Pacote de dados utilizado na comunicação com o módulo agregador.....	67
Tabela 5.9 - Pacote de dados utilizado na comunicação com o programa de monitorização.....	68
Tabela 5.10 – Descrição do formato da mensagem formulada	76
Tabela 5.11 – Código de erros relativos a cada módulo de aquisição.....	77
Tabela 5.12 – Pacote de dados utilizado na comunicação com o módulo universal.....	78

Acrónimos

ADC	–	<i>Analog to Digital Converter</i>
CPU	–	<i>Central Processing Unit</i>
CS	–	<i>Chip Select</i>
CSMA/CD	–	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>
CPHA	–	<i>Clock Phase</i>
CPOL	–	<i>Clock Polarity</i>
CRC	–	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
GPIO	–	<i>General-Purpose Input/Output</i>
GUI	–	<i>Graphical User Interface</i>
IDE		<i>Integrated Development Environment</i>
I2C	–	<i>Inter – Integrated Circuit</i>
IOT	–	<i>Internet of Things</i>
ISEP	–	Instituto Superior de Engenharia do Porto
Lidar	–	<i>Laser Infrared Detection and Ranging</i>
MISO	–	<i>Master in Slave out</i>
MOSI	–	<i>Master out Slave in</i>
MCU	–	<i>Microcontroller Unit</i>
MEEC	–	Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

PCB	–	<i>Printed Circuit Board</i>
PPM	–	Partes Por Milhão
SCLK	–	<i>Serial Clock</i>
SDA	–	<i>Serial Data</i>
SMD	–	<i>Surface-Mount Device</i>
SPI	–	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SS	–	<i>Slave Select</i>
USART	–	<i>Universal Synchronous and Asynchronous Receiver Transmitter</i>
UAV	–	<i>Unmanned Aerial Vehicles</i>

1 Introdução

Neste capítulo é demonstrada a contextualização e elucidação do projeto desenvolvido explicando o objetivo da implementação deste. De seguida, foram expostos os diversos objetivos a cumprir na realização do projeto. Por último, também foi feita uma breve descrição dos capítulos deste relatório como também a calendarização final do trabalho.

1.1 Contextualização

Atualmente, com o aumento de veículos, a monitorização de tráfego tornou-se em algo essencial. A informação sobre o número de veículos, velocidade e tipo de veículo permite uma maior facilidade na redução em tempos de viagem, como também a diminuição da emissão de gases nocivos[1]. Para além dos motivos já referidos, o aumento da presença de veículos nas estradas faz com que haja um aumento dos acidentes rodoviários, que são derivados maioritariamente do excesso de velocidade e da má visibilidade. Estes têm um impacto anual de aproximadamente 1,35 milhões de mortes e de 20 a 50 milhões de feridos graves a cada ano [2]. Para que seja possível recolher este tipo de informação é necessária a utilização de sistemas de monitorização rodoviária que estão normalmente embebidos nas infraestruturas das estradas.

Smart cities é um conceito que visa a utilização de vários tipos de tecnologia através do uso de energia, materiais, serviços e recursos de forma sustentável de forma a melhorar a qualidade de vida dos cidadãos [3]. Esta é uma tecnologia que se baseia principalmente nas tecnologias de informação e comunicação como forma de promover práticas de desenvolvimento sustentável, de modo a enfrentar os crescentes desafios da urbanização [4].

Neste sentido, um dos movimentos relacionados com as *smart cities* é as *smart roads* que têm como objetivo a criação de infraestruturas em estradas capazes de monitorizar os veículos e armazenar diferentes tipos de informação desde velocidade, peso, entre outros. Com os atuais desafios relacionados com o desenvolvimento de rodovias, o conceito de *smart cities* é algo essencial para a modernização das cidades. Deste modo, *smart roads* é algo essencial para o desenvolvimento de um ecossistema inteligente [5].

Devido às grandes necessidades de comunicação e armazenamento de dados, esta tecnologia trabalha lado a lado com a *Internet of Things* (IOT), visto que o armazenamento e a comunicação de dados necessitam de ser realizados de forma eficiente. Neste sentido, IOT tem como objetivo habilitar o armazenamento de informação e comunicação de uma forma mais eficiente através da interligação de dispositivos físicos e veículos através de dispositivos sensoriais e a internet [6]. Assim, através da interligação de *smart roads* em cidades construídas com tecnologias de IOT, é possível que as cidades consigam recolher e analisar dados de forma a melhorar a gestão do tráfego.

1.2 Motivação

Este projeto surgiu no âmbito de um projeto em desenvolvimento pela Pavnext (figura 1.1), que é uma empresa *start-up* portuguesa que está a desenvolver um produto para implementação em pavimentos rodoviários.



Figura 1.1 – Logo da empresa Pavnext [7]

Esta solução consiste na implementação de um sistema de monitorização intrusivo no pavimento com 10 módulos mecânicos colocados dois a dois numa faixa ao longo da rodovia sequencialmente, de modo a permitir a recolha de informações sobre os veículos que circulam em determinadas rodovias.

Para além disto, também possibilita a diminuição da velocidade de um veículo em zonas de baixa velocidade. Esta diminuição de velocidade acontece sem qualquer interação por parte do condutor e sem causar qualquer tipo de impacto no veículo ou passageiros, promovendo assim a segurança nas estradas em zonas de baixa velocidade. Além disto, estas infraestruturas apresentam a capacidade de extração e conversão da energia cinética dos veículos em energia elétrica sem que a emissão de CO₂ seja gerada no processo. A energia convertida pode, posteriormente, ser utilizada para alimentar postes de iluminação, estações de carregamento para bicicletas, sensores, entre outros.

Por fim, os dados serão enviados e agrupados por zona para, posteriormente, serem enviados para a *cloud* e armazenados de forma que seja possível realizar a monitorização em tempo real, tanto do tráfego rodoviário, como da geração energética.

Existem vários benefícios para implementação destes sistemas que irão ser abordados de seguida:

- **Deteção de problemas:** Através do controlo da boa atuação de um equipamento, no caso de um sistema não se encontrar a comportar da forma desejada, o sistema de monitorização irá detetar esse problema e gerar um alerta de reparo;
- **Notificações em tempo real:** As notificações em tempo real são uma ferramenta muito útil para estes sistemas pois, para além de apresentarem se o sistema está a comportar-se de maneira desejada, também tornaram fácil a análise e a resolução dos problemas;
- **Facilidade de visualização da informação:** Para facilitar a visualização da informação, a ferramenta de monitorização cria gráficos com os dados armazenados de fácil compreensão e entendimento;
- **Informação arquivada:** Com a informação arquivada é possível analisar a informação atual com informação arquivada, de forma a comparar a performance do sistema e a verificar a existência de algum gargalo [8][9][10].

Neste sentido, existe a necessidade do desenvolvimento de um sistema de monitorização para este projeto que seja capaz de adquirir a informação da passagem de cada carro tais como o peso, velocidade, classe e energia gerada pelos geradores. Isto permite a que, por fim, seja possível visualizar esta informação numa base de dados em tempo real.

As vantagens que esta solução proposta pela Pavnext apresenta baseiam-se não só nas características já mencionadas, mas também na sua rápida instalação e manutenção na estrada e pela sua elevada resistência tanto às condições atmosféricas, como também à passagem de veículos [11]. Um esquema do sistema descrito anteriormente pode ser visualizado na figura 1.2 que apresenta uma maquete da aplicação deste sistema num cruzamento rodoviário.

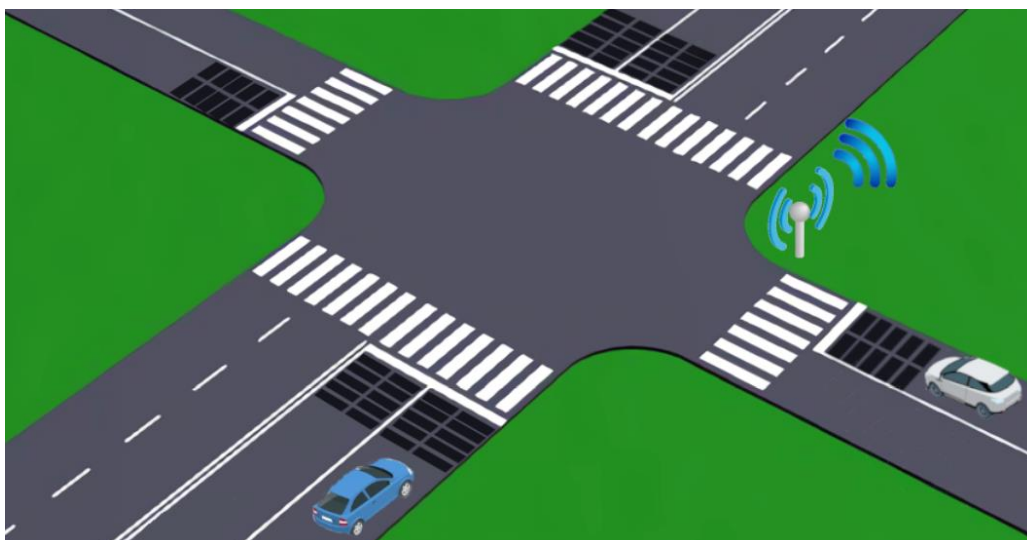


Figura 1.2 – Esquema da disposição do sistema a ser colocado numa rodovia

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste projeto baseia-se no desenvolvimento de um sistema de monitorização capaz de recolher informação da passagem de veículos num determinado local de forma que esta informação seja possível de ser visualizada e trabalhada no futuro. Deste modo, para ser possível o desenvolvimento deste sistema é necessário, primeiramente, desenvolver um sistema que tem como objetivo recolher toda a informação sensorial da passagem dos carros.

De seguida, é necessário realizar o agrupamento de toda a informação recolhida no sistema de aquisição de dados, na passagem de cada carro, para que seja possível então agrupar os dados lidos ao longo da passagem do carro em uma única mensagem.

Por último, é necessário realizar um agrupamento da informação de cada veículo adquirida em todas as rodovias para posteriormente ser possível enviar e armazenar na *cloud* toda a informação adquirida.

Dada a complexidade inerente a este objetivo, sentiu-se a necessidade de o subdividir em múltiplas tarefas de realização mais simples, tais como:

- Estudo dos sensores, microcontroladores e dos protocolos mais adequados para realizar a comunicação com os sensores;

- Desenvolvimento do *firmware* capaz de realizar a aquisição de dados dos sensores;
- Estudo e escolha do protocolo a ser utilizado na comunicação entre os microcontroladores;
- Desenvolvimento do *firmware* que irá agrupar toda a informação captada na passagem de um carro e processá-la numa única mensagem;
- Desenvolvimento de um *firmware* capaz de adquirir e agrupar a informação de diferentes módulos de aquisição em diferentes locais;
- Desenvolvimento de um *software* capaz de ler e apresentar as informações em tempo real para cada módulo.

1.4 Calendarização

Para uma melhor representação do trabalho realizado é possível ver a calendarização que se encontra apresentada na figura 1.3. Esta inclui um conjunto de tarefas, como por exemplo: o estudo de protocolos de comunicação e sensores para o projeto, testes com o protocolo de comunicação SPI para os sensores, testes com o protocolo RS485 para a comunicação entre os microcontroladores, etc.

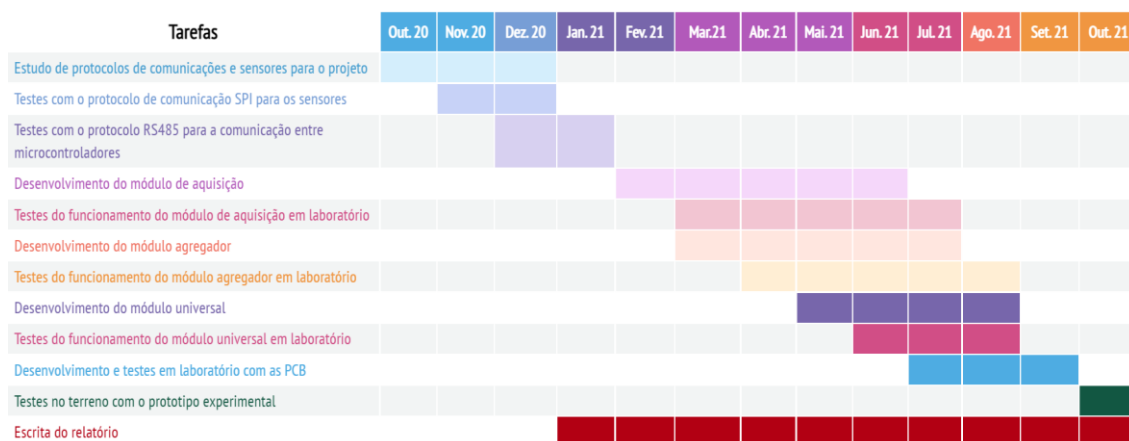


Figura 1.3 – Gráfico de Gantt da planificação do projeto

1.5 Organização do relatório

No capítulo 1 é feita uma introdução ao tema do projeto. No capítulo seguinte, 2, é apresentado um estado de arte das tecnologias utilizadas. No terceiro capítulo são apresentadas todas os requisitos e objetivos propostos pela empresa na realização do

estágio. No capítulo seguinte é apresentada a arquitetura geral do projeto tal como o fluxograma geral, os sensores utilizados, etc. No capítulo 5 são mostrados todos os esquemas elétricos, *Printed Circuit Board* (PCB) e microcontroladores utilizados e são abordados todos os algoritmos de *firmware* e *softwares* desenvolvidos ao longo do projeto. No capítulo 6 são realizados os estudos dos resultados de ensaios e testes. Por último no capítulo 7 são retiradas algumas conclusões de relevância relativamente ao estágio realizado.

2 Estado da arte

Neste capítulo é realizada uma explicação do que são sistemas de monitorização e como se subdividem por tipos, no ramo da monitorização de tráfego. Para além disto, ainda é feita uma abordagem a algumas aplicações já implementadas que realizam esta função.

2.1 Sistemas de monitorização

Com os avanços tecnológicos é muito comum que as empresas recorram ao uso de tecnologias para o seu funcionamento. Desta forma, é essencial que os equipamentos, redes ou sistemas mantenham o bom funcionamento para que não haja paragens na sua operação. Apesar disso, devido ao aumento da complexidade das tecnologias, existe a necessidade de ser realizada uma monitorização dinâmica de modo a que seja possível realizar a verificação de sistemas e aplicações em tempo real para evitar períodos de inoperação.

Um sistema de monitorização na sua forma mais simples é composto por uma componente sensorial que tem como objetivo detetar o estado atual de uma qualquer variável que se deseje analisar e realizar o envio desta informação, convertendo os dados analógicos em dados digitais para serem, posteriormente, processados tal como pode ser visualizado no diagrama da figura 2.1.

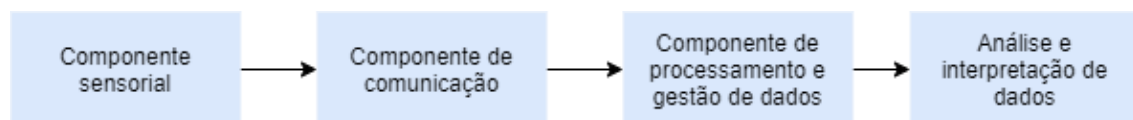


Figura 2.1 – Diagrama do processo geral de monitorização

Para que seja possível detetar erros e falhas num equipamento é conveniente recorrer ao uso de um bom sistema de monitorização. Os sistemas de monitorização são responsáveis por controlar a tecnologia utilizada por uma empresa, no sentido, de ser possível analisar a sua operação, desempenho, detetar e alertar os erros encontrados [12].

Deste modo, a monitorização de um sistema é algo que permite, de uma maneira prática, recolher e visualizar em tempo real as alterações que vão acontecendo num sistema na forma visual com gráficos e mapas. Este tem como objetivo auxiliar na deteção de

eventos indesejáveis e propiciar a gestão correta das intervenções de modo a alcançar os objetivos com o tempo e custos mais adequados [13]

2.2 Sistemas de monitorização de Tráfego

Devido ao tremendo crescimento de veículos nas rodovias, a monitorização de tráfego e controlo de congestionamento tornou-se num dos problemas mais desafiantes na circulação rodoviária nas grandes cidades [14]. Neste sentido, a monitorização de tráfego é capaz de recolher informações detalhadas sobre os veículos que circulam, tal como o tamanho, a sua velocidade, peso, entre outros. Assim, é possível emitir alertas no caso deste estar acima ou perto de uma violação de velocidade informando os condutores desta infração.

Para além disto, com estes sistemas de monitorização em tempo real é possível implementar sistemas de tráfego inteligente que permitem a gestão de estratégias dinâmicas para o controlo de semáforos. Além disto, os condutores irão planear melhor as suas viagens e possivelmente reduzir ainda mais o congestionamento nas estradas o que trará benefícios também para a redução de poluição do ambiente [15].

Existem várias soluções para que seja possível a monitorização de tráfego rodoviário, desde soluções mais tecnologicamente avançadas e outras mais eficientes. Com isto, existem dois tipos de soluções utilizadas nesta área sendo estas as intrusivas e não intrusivas. Importa, então, especificar as diferenças entre estes dois tipos.

Os sistemas de monitorização intrusivos instalam sensores no pavimento ou sob o pavimento de uma estrada. Diferentes tipos de sensores são utilizados neste tipo de sistemas tais como sensores piezoelétricos, magnetómetros, sensores de vibração e detetores de laço. Um esquema com estes sensores pode ser observado na figura 2,2. Vários tipos de informação são extraídos dos dados dos sensores, incluindo o comprimento do veículo e a contagem dos eixos. Os sistemas intrusivos apresentam uma elevada precisão de classificação dos veículos visto que os sensores apresentam contacto próximo com os carros e conseguem detetar, de forma eficaz, um veículo em movimento. No entanto, uma grande desvantagem é o elevado custo para instalação e manutenção, uma vez que o pavimento de uma estrada precisa de ser serrado para instalar os sensores sob a estrada. O custo aumenta significativamente devido à perturbação do tráfego e ao

encerramento da faixa de rodagem para proporcionar segurança aos trabalhadores rodoviários [16].

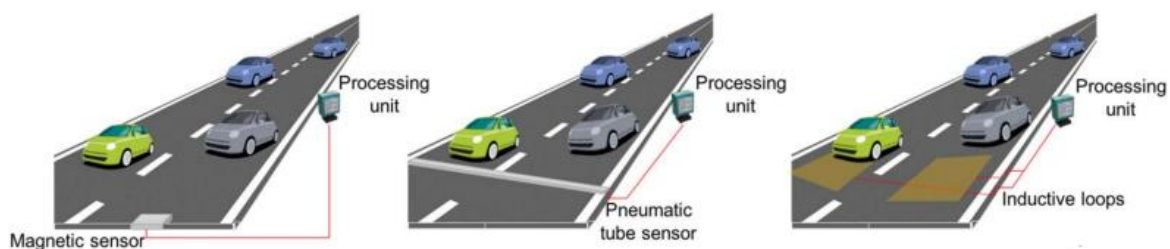


Figura 2.2 – Tipos de sensores de sistemas de monitorização intrusiva [17]

Os sistemas não intrusivos são sensores de monitorização de tráfego que, para além de terem um rápido período de instalação e manutenção, não trazem qualquer perturbação ao tráfego na zona durante a instalação, operação ou manutenção devido a não serem colocados na estrada. Como se pode averiguar pelo nome, estes sensores são não intrusivos pelo facto de não haver necessidade de os instalar dentro do pavimento podendo ser colocados ao lado da estrada na superfície da rodovia [18].

Dentro dos sistemas baseados em monitorização não intrusiva existem os sistemas implementados na via dos carros que utilizam sensores instalados sobre a estrada, sendo assim capaz de cobrir múltiplas faixas em simultâneo. Por exemplo, *unmanned aerial vehicles* (UAVs) e satélites são utilizados nestes sistemas. A tecnologia mais prevalente nesta categoria é o sistema baseado em câmaras com *image recognition*. Um esquema com estes sensores pode ser observado na figura 2,3. Estes sistemas apresentam uma elevada precisão de classificação, mas o seu desempenho é afetado pelas condições meteorológicas e de iluminação. Outro problema importante é a preocupação com a privacidade do condutor, uma vez que há muitas pessoas que não se sentem confortáveis em ser expostas a câmaras. Algumas das soluções deste tipo tentam abordar estas preocupações de privacidade através da adoção de diferentes tipos de sensores tal como sensores infravermelhos e *Laser Infrared Detection and Ranging* (LIDAR).



Figura 2.3 – Tipos de sensores de sistemas de monitorização não intrusiva [17]

Outro tipo de sistema baseado em monitorização não intrusiva são os sistemas implementados nas vias laterais que abordam a questão do custo dos sistemas de classificação de veículos intrusivos, visto que os sensores são instalados à beira da estrada, excluindo as necessidades de fecho e construção na via. À semelhança dos sistemas intrusivos, estes adotam diferentes tipos de sensores para a classificação de veículos. Alguns dos sensores mais amplamente utilizados incluem magnetómetros, acelerómetros e sensores acústicos. Recentemente, foram utilizados sensores avançados como sensores infravermelhos, e *transceivers* Wi-Fi. Apesar de possuir os benefícios de uma instalação mais fácil e de um custo mais reduzido, os sistemas instalados nas vias laterais requerem esforços extras para serem ajustados precisamente nas direções e nas colocações dos sensores. Um problema mais crítico é que a maioria dos sistemas não conseguem classificar com precisão os veículos sobrepostos. Além disso, um algoritmo para calibrar os dados dos sensores é necessário para mitigar o impacto do ruído e aumentar a precisão do sistema.

2.3 Aplicações existentes atualmente

A contagem e classificação de veículos é algo que ainda se encontra numa fase inicial de desenvolvimento por parte das empresas, mas já existem algumas soluções de possível implementação em estradas atualmente, tais como:

- **Swarco - Traffic Monitoring & Information**

A implementação desenvolvida pela Swarco [19], apresenta um sistema distribuído tanto intrusivo como não intrusivo capaz de realizar tanto a contagem de veículos, como também, detetar o tipo de veículo, categoria, velocidade, direção através do uso de sensores de laço indutivo, câmaras, radares entre outros que estão instalados na rodovia.

Para além disto, como possui uma câmara, este sistema também é capaz de detetar acidentes e congestionamentos. É possível visualizar pela figura 2.4 o sistema de monitorização com inteligência artificial utilizado.



Figura 2.4 – Sistema de monitorização de vídeo da Swarco [19]

- **MetroCount - RoadPod® VT4**

A implementação desenvolvida pela *MetroCount* [20], é uma solução intrusiva ao pavimento que recorre à contagem de veículos através do uso de 4 tubos pneumático instalados nas vias rodoviárias. Esta implementação permite, de forma precisa, monitorizar as vias com mais de um sentido permitindo, assim, detetar o tipo, velocidade e sentido do veículo. Na figura 2.5 é possível visualizar a solução *RoadPod®* VT4.



Figura 2.5 – Sistema de monitorização por tubagens pneumáticas [20]

- **ALL TRAFIC SOLUTIONS**

A solução apresentada pela *ALL TRAFIC SOLUTIONS* [21] é uma solução completamente não intrusiva. Para realizar a contagem e classificação de veículos apresenta disponível diferentes produtos como podem ser visualizados pela figura 2.6, desde produtos mais simples como o QueTrak, que utiliza um sensor de feixe duplo para reconhecer o espaço entre os veículos quer estejam eles em movimento ou parados de modo a realizar a contagem de veículos funcionando apenas até 40 km/h [22]. O StatTrak utiliza uma unidade de rastreamento de radar Doppler, que possui a capacidade tanto de realizar a contagem de veículos a uma maior velocidade que o produto anterior, como também consegue medir o seu volume [23]. E por último, um produto mais avançado, o SpeedLane Pro que, através de um radar FMCW de disparo lateral, é capaz de adquirir informação da velocidade, volume, congestionamento, direção e espaçamento entre veículos [24]. Para além disto, também tem implementada uma câmara para visualização do tráfego em tempo real.



Figura 2.6 – Sistemas de monitorização ALL TRAFIC SOLUTIONS [21]

3 Análise de Requisitos

Neste capítulo é realizada um estudo mais pormenorizado dos requisitos propostos para o sistema pela Pavnext, de forma a ser possível entender melhor o sistema. Para além disto, ainda é feita uma menção ao trabalho anteriormente realizado na empresa.

3.1 Introdução

O sistema distribuído a ser desenvolvido, foi subdividido em três diferentes módulos que têm por base uma configuração *Master-Slave*. Para haver uma maior facilidade de compreensão os módulos serão referidos como:

- Módulo de aquisição;
- Módulo Agregador;
- Módulo Universal.

Para a realização do projeto proposto existem três grandes desafios. Primeiramente, a aquisição de dados através de sensores tem como requisito ser capaz de detetar o momento em que o carro dá entrada no primeiro conjunto de módulos mecânicos e inicializar de seguida a captação sensorial de aceleração da tampa, peso do carro, corrente, tensão e potência gerada em cada um dos protótipos mecânicos aplicados nos terrenos. De modo a garantir uma precisão nos dados lidos, é necessário realizar a leitura destes dados a uma taxa de frequência na ordem dos 1 milissegundos para que seja possível adquirir informação precisa, tanto de potência como posicionamento do carro ao longo do sistema. Após realizar estas leituras ciclicamente durante a passagem do carro pelos protótipos, para finalizar terá de ser possível detetar o momento em que o carro terminou a passagem pelo último conjunto de módulos mecânicos e agrupar todos os dados captados numa única mensagem. Periodicamente também serão lidos valores de humidade e temperatura dos módulos mecânicos de modo a verificar o estado destes.

De seguida, é necessário realizar o agrupamento das mensagens de cada módulo de aquisição e agrupar todas as informações recebidas numa única mensagem característica da passagem de cada carro pelo sistema de forma a processar informação como a velocidade de entrada, velocidade de saída, classe, entre outros. Será também necessário

realizar uma verificação dos valores lidos, no sentido de tentar detetar algum tipo de erro existente na instalação do sistema mecânico. Deste modo, o módulo de aquisição irá armazenar mensagem a mensagem e irá enviar para o módulo agregador a informação através de um dos periféricos de comunicação existente entre os dois módulos, quando for solicitado. Um esquema da interligação dos módulos de aquisição e módulos de agregadores pode ser visualizado pela figura 3.1.

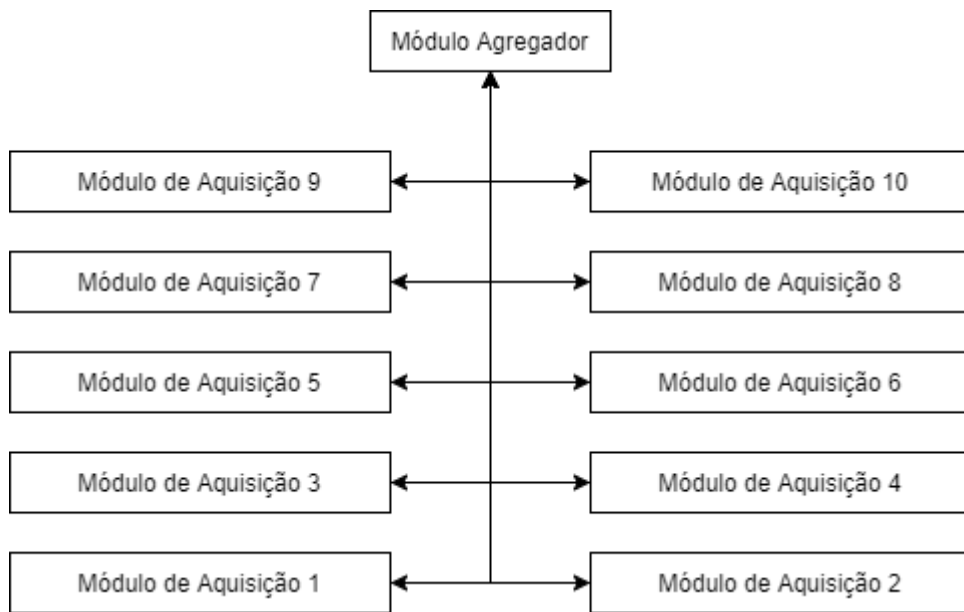


Figura 3.1 – Diagrama da interligação entre módulos de aquisição e o módulo agregador

Por fim, é necessário realizar o envio da informação da passagem de carro para a *Cloud*. Devido à existência de diversos módulos de aquisição em diferentes locais, é necessário também agrupar periodicamente a informação da passagem de cada carro em diferentes locais, de modo que seja possível armazenar informação de diferentes locais e posteriormente serem enviados para a *Cloud*. Um esquema da interligação dos diversos Módulos agregadores com o módulo Universal pode ser visualizado pela figura 3.2.

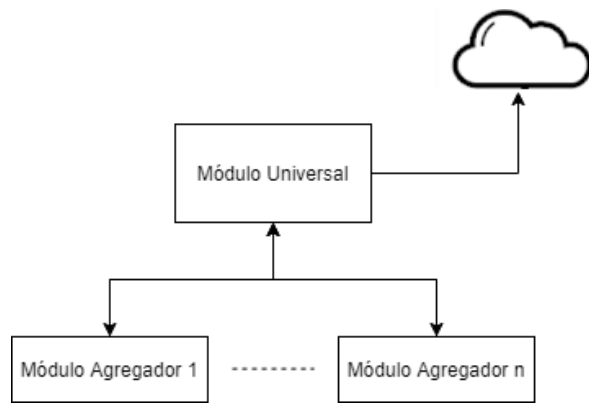


Figura 3.2 – Diagrama da interligação entre os módulos agregadores e módulo universal

Por fim, com todos os sistemas interligados tem-se o esquema final apresentado na figura 3.3.

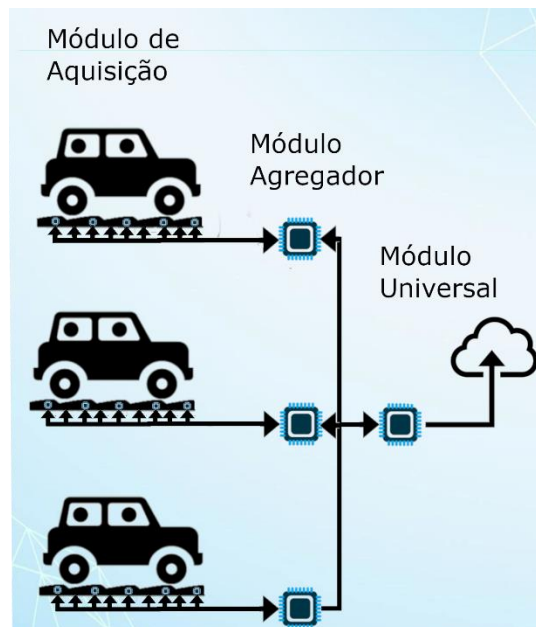


Figura 3.3 – Esquema final da disposição de cada módulo no sistema

3.2 Protótipo anterior

Anteriormente, foi desenvolvida uma versão dos Módulos de aquisição e do módulo Agregador de dados com ATmega328P. O módulo de aquisição apresentava um razoável funcionamento em laboratório, com a leitura dos sensores na ordem dos 2 ms por ciclo. O módulo Agregador de dados foi desenvolvido também de forma a ser capaz de

- Sistema de detecção instantânea do início passagem do carro para acordar todo o sistema no instante inicial.
- Sistema de detecção do fim da passagem do carro pelo sistema e envio da informação para o módulo Agregador.
- Verificação de temperatura e humidade para verificar o estado do sistema.

3.3.2 Módulo Agregador

O módulo agregador tem a necessidade de apresentar as seguintes funcionalidades:

- Implementação de um protocolo de comunicação capaz de receber a informação da passagem do carro por cada módulo de aquisição ciclicamente;
- Receção e reformatação dos dados recebidos pelos módulos de aquisição;
- Verificação de valores recebidos de forma a detetar algum erro em algum dos valores enviados;
- Detecção de classe, velocidade de entrada e saída do veículo;
- Agrupar toda a informação relevante relativamente a cada veículo e aos erros detetados no módulo mecânico;
- Armazenar as mensagens sequencialmente para serem posteriormente enviadas quando necessário.

3.3.3 Módulo Universal

O módulo universal tem a necessidade de apresentar as seguintes funcionalidades:

- Implementação de um protocolo de comunicação capaz de receber a informação armazenada por cada módulo Agregador;

Através deste conjunto de objetivos será possível implementar esta solução de forma a ser desenvolvido um sistema distribuído capaz de realizar toda a aquisição e comunicação de dados entre todos os módulos.

4 Arquitetura do sistema

No presente capítulo é feita uma explicação mais detalhada da arquitetura do sistema, apresentando também uma amostra do diagrama que complementa a explicação. De seguida, são explicadas as escolhas dos vários componentes para a realização do projeto tais como: microcontrolador, sensores e atuadores.

4.1 Introdução

Numa fase inicial do desenvolvimento deste projeto, foi estruturada uma arquitetura geral do sistema a ser implementada, de forma a que fosse possível existir um seguimento mais sequencial e mais visual no desenvolvimento dos objetivos propostos ao longo do estágio.

Como pode ser visualizado pela figura 4.1, em cada local irão existir 10 módulos de aquisição de dados que irão realizar a leitura dos valores captados pelos diversos sensores que fazem parte deste sistema. No fim da passagem do carro por cada módulo de aquisição, toda a informação será agregada e processada pelos módulos agregadores que posteriormente irão guardar a informação de cada veículo recebida sequencialmente. Por fim, o módulo universal irá realizar o pedido de nova informação a todos os módulos Agregadores que irão encaminhar a informação para posteriormente ser enviada para a *Cloud*.

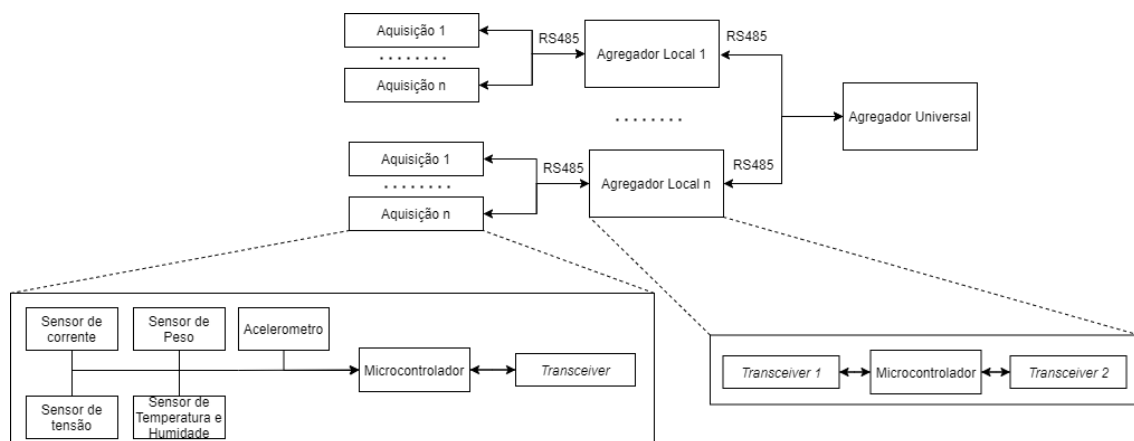


Figura 4.1 – Diagrama da arquitetura geral do sistema

4.2 Microcontrolador

O microcontrolador, também designado por *microcontroller unit* (MCU), consiste num único circuito integrado que contem um *Central Processing Unit* (CPU), memórias e *general-purpose input/output* (GPIO), ou seja, é um componente muito pequeno capaz de realizar determinadas tarefas de forma bastante eficaz. Para tal, existem vários requisitos que necessitam de ser analisados para a escolha deste componente, principalmente relacionados com o módulo de aquisição. No caso do módulo de aquisição de dados, os requisitos essenciais são os de uma elevada frequência de funcionamento para rápida aquisição e tratamento de dados, assim como a capacidade de interligação com protocolos de comunicação *serial*, tais como *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter* (USART), *Serial Peripheral Interface* (SPI) e *Inter-Integrated Circuit* (I2C) para a comunicação entre microcontroladores e sensores. No caso do módulo de Agregador, é necessário um microcontrolador com uma elevada capacidade de armazenamento de dados e a existência de pelo menos 2 canais UART para possibilitar a comunicação entre os módulos Agregadores e o módulo Universal. Por fim, o módulo Universal apenas tem a necessidade de apresentar a capacidade de comunicação por canal UART.

Posto isto, após o estudo de diferentes microcontroladores com estas características foram encontrados os microcontroladores STM32 que, para além de apresentarem todas estas características na maioria dos seus produtos, também apresentam a possibilidade de compra dos microcontroladores em módulos de desenvolvimentos prontos para uso, de modo a facilitar a fase inicial de programação. Devido à vasta variedade de microcontroladores foram testados os seguintes:

- STM32F103;
- STM32G431KB;
- STM32L476RG.

Dentro dos testes realizados entre estes microcontroladores, o que apresentou melhores resultados foi o STM32G431KB que possibilita a execução de mais operações em menos tempo devido à sua maior taxa de frequência e arquitetura ARM mais recente. Apesar de

possuir uma quantidade menor de GPIO's do que os restantes microcontroladores apresentados, é suficientemente capaz de desempenhar a função de módulo de aquisição. Em relação ao módulo Agregador de dados, o STM32L476 é o mais adequado, pois apresenta uma vasta quantidade de armazenamento de 1 *Mbyte* comparado com os 128 *Kbytes* do STM32G431. Neste sentido, foi optado por ser então utilizado o STM32G431 nos módulos de aquisição e o STM32L476 nos módulos Agregadores e Módulo Universal como podem ser visualizados pelas figuras 4.2 e 4.3 respetivamente.



Figura 4.2 – Módulo de desenvolvimento NUCLEO-G431KB [25]

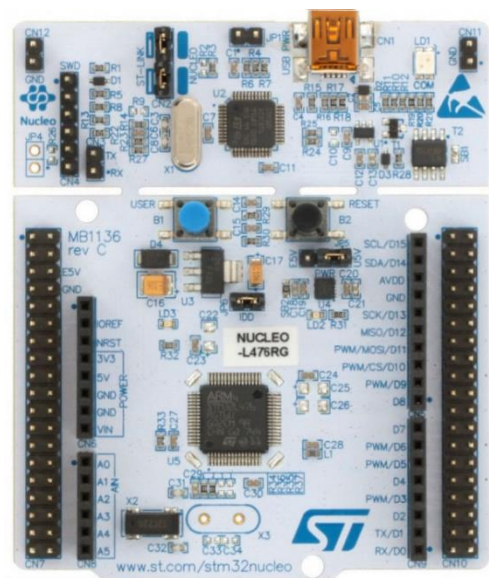


Figura 4.3 – Módulo de desenvolvimentos NUCLEO-L476RG[26]

Resumindo, as principais características que se teve em consideração para a escolha do microcontrolador para módulo de aquisição de dados, o STM32G431, são[27]:

- Frequência de funcionamento de até 170 MHz;
- Tensão de funcionamento entre 3,3 V e 5 V;
- Protocolos SPI e I2C para comunicação com sensores;
- Porta serie USART para comunicação com o módulo agregador.

Por fim, as principais características que foram tidas em consideração para a escolha do microcontrolador do módulo agregador e Universal, o STM32L476RG, são [28]:

- Frequência de funcionamento de 80 MHz;

- Microcontrolador *Low-Power*;
- Tensão de funcionamento entre 3,3 V e 5 V;
- Capacidade de comunicação com pelos 2 canais USART para comunicação entre cada grupo de módulos separadamente;
- Elevada quantidade de memória – 1 *Mbyte*.

4.3 Comunicação USART

A comunicação entre os microcontroladores é um processo muito importante pois deve ser preciso, eficiente e rápido para que seja possível realizar todo o envio de informação de forma contínua e sem interrupções. Foi analisada a utilização de vários tipos de protocolo, tais como I2C, SPI e USART, que são os protocolos de comunicação serie mais comuns. No entanto, todos estes apresentam desvantagens que os impossibilitam de serem utilizados nesta aplicação. O protocolo I2C e SPI apenas funcionam a curtas distâncias e a USART apenas consegue estabelecer a comunicação entre dois dispositivos o que não é o suficiente pois no mesmo *bus* de comunicação irão existir diversos participantes.

Após uma pesquisa optou-se pelo transceiver MAX485 utilizado para comunicações com o protocolo RS485, como pode ser observado na figura 4.4. Este integrado é capaz de realizar a comunicação entre um conjunto de dispositivos ligados por USART numa linha de *bus*, sendo capaz de realizar comunicações de até 10 *Mbits/s* com um cabo de 12 metros, mas suporta distâncias de até 1200 metros com velocidades de transferências até 100 *Kbits/s*. Outra grande vantagem deste integrado, é que como este apresenta linhas de comunicação balanceadas, a comunicação é feita através da comparação dos níveis lógicos de dois fios distintos, ou seja, quando a tensão nas linhas de comunicação no condutor A for maior que a do condutor B, a saída tem um valor lógico de 1 e vice-versa, sendo adicionada uma margem de ruído de ± 200 mV para aumentar a tolerância a interferências.

Através desta técnica, caso exista algum ruído induzido no meio este afetará as duas linhas simultaneamente fazendo com que a diferença de tensão entre os dois fios mantenha-se constante [29].

Nos vários testes realizados com este integrado foi possível interligar mais de 10 dispositivos com distâncias superiores a 5 metros com velocidades de transferência até aos 2 *Mbits/s*.



Figura 4.4 – *Transceiver* MAX485 [30]

4.4 Protocolo de comunicação para sensores

As leituras de sensores em microcontroladores podem ser realizadas de forma analógica ou digital. Apesar disto, a leitura de entradas analógicas é algo pouco prático quando existe a necessidade de leituras precisas, pois com o aumento do tamanho do fio em que o sinal está a ser transmitido também existe um aumento progressivo do ruído deste, o que leva a gerar valores imprecisos. Neste sentido, existem então sensores digitais que não apresentam estes problemas, recorrendo ao uso de protocolos de comunicação específicos, tais como:

- I2C
- SPI

Cada um destes apresenta vantagens e desvantagens relativamente à dificuldade de implementação, custos e performance como podem ser visualizadas na tabela 4.1 [31].

Tabela 4.1 – Comparações das comunicações SPI e I2C

I2C	SPI
Pode ter vários <i>masters</i> e vários <i>Slaves</i>	Apenas pode ter vários <i>Slaves</i> e apenas um <i>master</i>
Protocolo de comunicação <i>half-duplex</i>	Protocolo de comunicação <i>full-duplex</i> ou <i>half-duplex</i>
Apenas necessita de dois fios para qualquer número de <i>Slaves</i>	Necessita de três mais um fio por cada <i>Slave</i>
Taxas de comunicação de 100 kHz até 5 MHz mas depende dos integrados.	Taxas de comunicação podem ir até 10 MHz ou mais dependendo do integrado.
Menos suscetível a ruído.	Mais vulnerável a ruído.
É melhor para comunicações a curtas distâncias.	É melhor para comunicações a longas distâncias.
Garante que a informação é recebida pelo <i>Slave</i> .	Não garante que a informação é recebida pelo <i>Slave</i> .

4.4.1 Interface SPI vs I2C

A interface I2C apresenta um barramento simples de apenas dois condutores que realizam toda a comunicação entre o *master* e os *slaves*, sendo assim esta uma interface bastante simples e eficiente de ser montada. Os sinais da interface I2C são [32]:

- *Serial Clock* (SCL): Sinal transmitido pelo *Master* que estabelece a frequência de transmissão de dados;
- *Serial Data* (SDA): Sinal que transmite dados tanto do *Master* para *Slave* como vice-versa.

Na figura 4.5 é possível visualizar um típico barramento utilizado numa comunicação I2C.

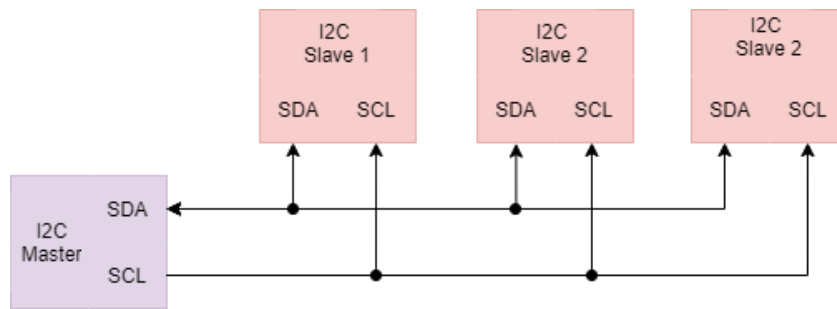


Figura 4.5 – Barramento de uma comunicação I2C

A interface SPI apresenta um barramento um pouco mais complexo com a existência de três sinais comuns entre todos os *masters* e *slave* e um extra por cada *slave*, sendo assim esta uma interface mais complexa e com um maior grau de dificuldade de montagem. Os sinais da interface SPI são [33]:

- *Serial Clock* (SCLK): Sinal transmitido pelo *Master* que estabelece a frequência de transmissão de dados;
- *Master Out Slave In* (MOSI): Sinal que transmite dados do *master* para o *slave*;
- *Master In Slave Out* (MISO): Sinal que transmite dados do *slave* para o *master*;
- *Chip Select* (CS) ou *Slave Select* (SS): Sinal que seleciona qual o *slave* a ser endereçado.

Na figura 4.6 é possível visualizar um típico barramento utilizado numa comunicação SPI.

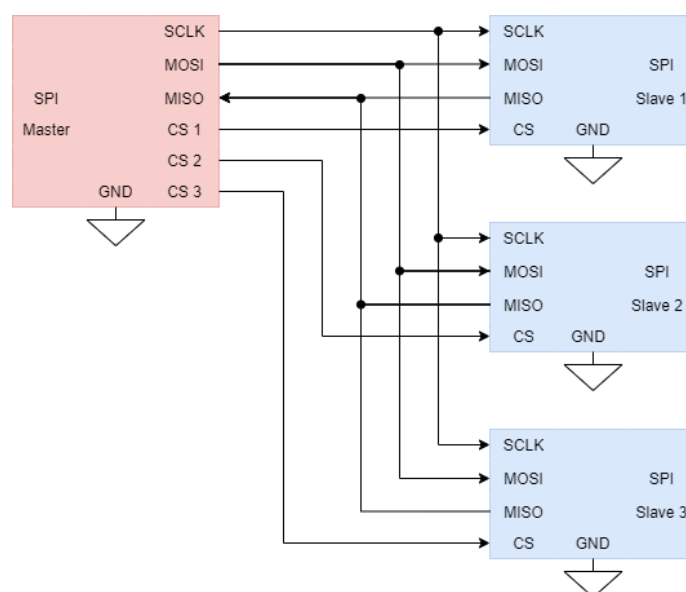


Figura 4.6 – Barramento de uma comunicação SPI

4.4.2 Trama de dados SPI vs I2C

Independentemente da quantidade de *slaves* existentes no barramento, apenas existem 2 sinais para a realização da comunicação, o que conseqüentemente irá tornar necessário a realização do endereçamento de cada *slave* específico para realizar a comunicação desejada. Para além disto, o uso de *start* e *stop bits* torna o *overhead* desta comunicação elevado como pode ser visualizado na figura

Master	ST	SAD+W		SUB		SR	SAD+R			MAK		MAK		NMAK	SP
Slave			SAK		SAK			SAK	DATA		DATA		DATA		

Figura 4.7 – Trama de comunicação I2C

Relativamente à trama de dados de SPI, devido à existencia dos pinos de CS não existe a necessidade de realizar o endereçamento dos slaves através da trama de comunicação e a ausencia de *start* e *stop bits* faz com que este protocolo apresente um *overhead* menor, facilitando assim a comunicação. Na figura 4.8 é possível visualizar a trama de dados de uma comunicação SPI [34].

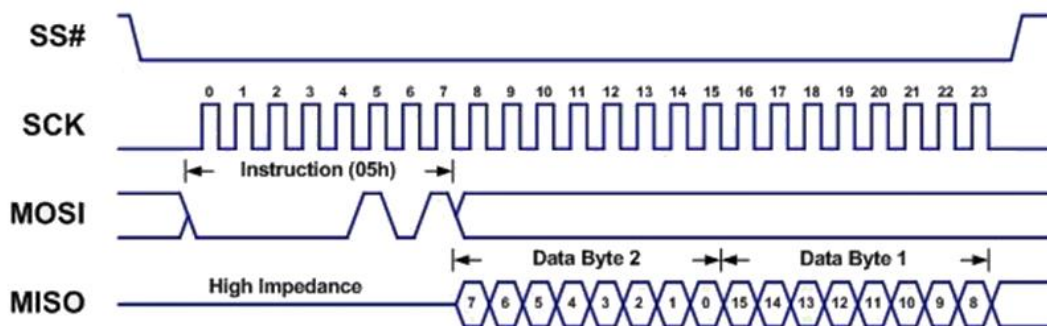


Figura 4.8 – Trama de comunicação SPI [35]

4.4.3 Protocolo mais adequado

Neste sentido, foi escolhido o protocolo de comunicação SPI pois apesar de necessitar de uma montagem mais complexa com quatro ou três fios em vez de apenas dois como em I2C, este apresenta um *overhead* mais baixo, uma maior facilidade de comunicação com os *slaves* sem necessidade de endereçamento por *software* e uma taxa de comunicação bastante mais alta do que I2C, o que possibilita leitura de sensores a taxas mais elevadas.

Resumindo, SPI é um protocolo de comunicação síncrono, *Full Duplex* ou *Half-Duplex* com uma interface *Master-Slave*. Este protocolo possibilita uma comunicação tanto bidirecional com quatro fios ou unidirecional com três fios. Por fim, apresenta taxas de comunicação de até 10 MHz ou mais.

4.5 Sensores

4.5.1 Acelerómetro

Os acelerómetros são sensores que têm como objetivo fazer uma medição da aceleração aplicada no sensor nos três eixos. Com isto, é possível haver um conhecimento das acelerações aplicadas na tampa em qualquer instante. O eixo z permite averiguar a posição atual da tampa, enquanto que os eixos x e y verificam a existência de alguma avaria mecânica no deslocamento da tampa.

Neste sentido, para a escolha do sensor é necessário ter em conta algumas características, como uma alimentação de 3,3 V a 5 V, comunicação digital por SPI e um baixo custo. Os potenciais sensores a ser utilizados seriam:

- LIS3DH ($\pm 16G$)
- ADXL345 ($\pm 16G$)
- mma7455 ($\pm 8G$)

As escolhas possíveis para este caso poderiam apenas ser os acelerómetros LIS3DH e o ADXL345 pois a aceleração a ser lido seria numa ordem elevada próxima dos 16 G para camiões ou carros com muito peso.

O sensor LIS3DH já tinha sido anteriormente testado e, apesar de apresentar boas leituras de aceleração, é incapaz de detetar a atividade no eixo z de forma consistente e apresenta um custo mais elevado.

Neste sentido, foi escolhido o sensor ADXL345, como pode ser visualizado pela figura 4.9. Este sensor apresenta várias características desejadas pelo sistema ao qual vai ser implementado como se pode observar pela tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características do acelerómetro ADXL345 [36]

Caraterísticas	
Tensão de funcionamento	2 V a 3,6 V
Corrente	Normal: 23 μ A <i>Standby</i> :0,1 μ A
Interface de comunicação	I2C e SPI
Taxa de transferência	Até 5 MHz
Resolução	± 16 g em resolução 13- <i>Bit</i>
Interrupção	Atividade

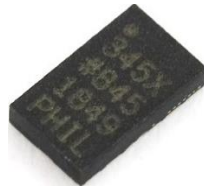


Figura 4.9 – Acelerómetro ADX345[37]

Devido à maior facilidade, tanto de aquisição, como montagem deste sensor, foi adquirida uma placa já soldada, o que permite a fácil utilização desta com o protocolo SPI, tal como pode visualizado na figura 4.10.



Figura 4.10 – Placa soldada do sensor ADXL345 [38]

Com este sensor é então possível:

- Realizar a leitura de acelerações gravíticas de até 16G o que permite retirar valores de deslocação da tampa em carros de elevado peso;
- Realizar a comunicação por SPI a uma taxa máxima de 5 MHz;
- Obter dados com uma resolução elevada;
- Adquirir interrupções de atividade no eixo Z.

4.5.2 Sensor Temperatura e Humidade

Um dos requisitos introduzidos anteriormente é o de saber a temperatura e a humidade do sistema para que, em caso de algum sobreaquecimento ou níveis de humidade elevados, seja possível gerar um alerta para que a manutenção seja realizada no módulo. Após se ter sido feita uma procura de sensores no mercado, alguns destes suscitaram algum interesse para serem escolhidos para o projeto tais como:

- SHT31-D
- HTS221

Devido aos requisitos deste sistema foi escolhido o sensor HTS221 como pode ser visualizado pela figura 4.11. Este sensor apresenta várias características desejadas pelo sistema, no qual vai ser implementado como se pode observar pela tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Características do sensor Temperatura e Humidade HTS221 [39]

Caraterísticas	
Tensão de funcionamento	1,7 V a 3,6 V
Interface de comunicação	I2C e SPI
Taxa de transferência	Até 10 MHz
Precisão de leituras de humidade	±3,5%
Precisão de leituras de temperatura	±0,5°C



Figura 4.11 – Sensor de temperatura e humidade HTS221 [40]

Devido à maior facilidade, tanto de aquisição, como montagem deste sensor, foi adquirida a placa já soldada, o que permitia a fácil utilização desta com o protocolo SPI, tal como pode visualizado na figura 4.12.



Figura 4.12 – Placa soldada do HTS221[41]

Com este sensor é então possível:

- Realizar a leitura de temperatura e humidade sempre que for necessário;
- Realizar a comunicação por SPI a uma taxa máxima de 10 MHz;
- Obter dados com uma resolução elevada.

4.5.3 Medição da Tensão e Corrente do gerador

Para realizar as medições de energia gerada pelos dois geradores em cada módulo de aquisição de dados é necessário realizar as medições de tensão e corrente geradas por estes durante a passagem dos carros pelos mesmos. Primeiramente, foram procurados sensores SPI capazes de realizar a leitura destes dados, mas infelizmente não foram encontrados sensores a preços razoáveis capazes de realizar estas operações. Neste sentido, foram procurados métodos de medição ou sensores analógicos capazes de realizar as leituras.

– Tensão

Como os geradores de energia podem ter picos de 50 V de tensão a 1000 rpm foi pensado em utilizar um divisor de tensão de 50 V para 3,3 V, ou seja, uma relação de 1/15,5 para que, desta forma, seja possível ser lido pelo microcontrolador e que sejam lidos valores precisos. Devido aos gastos de corrente que este método pode acarretar, é conveniente utilizar resistências na ordem das dezenas de milhares ou superior para que a corrente consumida por estes elementos seja desprezável.

– Corrente

Para a medição da corrente, por parte da empresa já tinham sido realizadas anteriormente experiências com uma montagem que utilizava um INA195 em serie com uma resistência de valor muito baixo para amplificar o valor da queda de tensão gerado pela resistência

com um ganho 100 V/V. Porém, no fim dos testes experimentais percebeu-se que o INA195 de imediato ficava inutilizável, devido ao baixo limite de corrente que este apresenta.

Deste modo, é necessário um sensor de corrente que tenha um funcionamento de 10 A e um limite de tensão de 50 V. Assim, foi decidido ser realizada uma pesquisa de circuitos integrados que sejam capazes de efetuar a monitorização da corrente, tendo sido encontradas as seguintes soluções analógicas.

- ACS725LLCTR-05AB-T
- ACS725LLCTR-10AB-T
- ACS712ELCTR-30A-T
- Ina219

O circuito que mais se adequa a esta aplicação é o que pode ser observado pela figura 4.13. Este sensor foi escolhido devido ao facto de os geradores poderem chegar a gerar um pouco mais de 5 A dependendo da resistência utilizada. Foi decidido que este módulo é o mais adequado, visto que este também apresenta uma taxa de transferência elevada de 120 kHz, o que é um ponto positivo para a eficiência do sistema de modo a realizar leituras sequenciais rápidas da corrente.



Figura 4.13 – Sensor de corrente ACS725[42]

Sendo assim, o sensor ACS725 foi escolhido. Este sensor apresenta as características apresentadas na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Características do sensor de corrente ACS725LLCTR-10AB-T [43]

Caraterísticas	
Tensão de funcionamento	3,3 V
Interface de comunicação	Analógico
Taxa de transferência	120 kHz
Alcance de valores	-10 A a 10 A

– **Filtragem do sinal**

Para ultrapassar a limitação do ruído nos sinais analógicos para atenuar um pouco este problema foi pensado em ser aplicado um filtro passa baixo no sentido de reduzir a passagem de sinais de elevada frequência e, para além disto, um *buffer* no sentido de prevenir o sinal de ser afetado por quaisquer correntes que possa existir na linha.

Desta forma, será utilizado o amplificador operacional LM358P [44], como pode ser visualizado na figura 4.14, que apresenta dois canais o que permite a filtragem de dois sinais por cada integrado. Este amplificador apresenta ainda uma largura de banda na ordem dos 1,2 MHz o que permite leituras rápidas da saída filtrada. Na tabela 4.5 é possível visualizar uma melhor lista das características deste amplificador.



Figura 4.14 – Amplificador operacional LM358P [45]

Tabela 4.5 – Características do amplificador operacional LM358P [44]

Caraterísticas	
Tensão de funcionamento	3 V a 36 V
Largura de banda	1,2 MHz
Número de canais	2
Tipo de entrada	<i>Rail-to-Rail</i>
Consumo de corrente	0,3 mA por canal

Como este amplificador é do tipo *Rail-to-Rail*, é necessário fornecer a este uma tensão negativa para que seja possível alimentar este integrado. Para tal foi utilizado o inversor TPS6040DBVT [46]. como de ser visualizado pela figura 4.15, que permite a inversão de uma tensão de entrada.

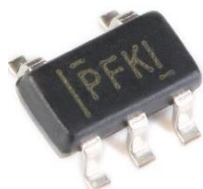


Figura 4.15 – Inversor TPS6040DBVT [46]

Através da análise da tabela 4.6, é possível verificar que este componente tem a capacidade de realizar a inversão de uma tensão desejada e com uma corrente de saída suficientemente alta para alimentar o amplificador.

Tabela 4.6 – Características do inversor TPS6040DBVT [47]

Caraterísticas	
Tensão de entrada	1,6 V a 5,5 V
Tensão de saída	-5,5 V a -1,6 V
Consumo de corrente	0,065 mA por canal
Corrente de saída	60 mA

– Comunicação

Apesar destes sensores serem analógicos, como visto anteriormente, não é conveniente o uso destes devido ao ruído gerado na leitura dos valores. Neste sentido, é possível implementar um conversor *Analog to Digital Converter* (ADC) que tem como objetivo converter os valores analógicos em valores digitais através do protocolo SPI muito próximo do sinal gerado, de forma a não ocorrerem distúrbios no sinal a ser lido. Com isto, foi escolhido o integrado MCP3004 como pode ser visualizar pela figura 4.16. Este integrado possui as caraterísticas apresentadas na tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Características do conversor analógico-digital MCP3004 [48]

Caraterísticas	
Tensão de funcionamento	2,7 V a 5,5 V
Interface de comunicação	SPI
Taxa de comunicação SPI	2,7 V = 1,35 MHz 5 V = 3,6 MHz
Taxa de transferência ADC	2,7 V = 75 ksps – 5 V = 200 ksps
Número de canais	4



Figura 4.16 – Conversor analógico-digital MCP3004 [49]

Resumindo, com este integrado é possível realizar as conversões de tensões e corrente de ambos os geradores por cada módulo de aquisição, tornando assim possíveis leituras mais precisas.

4.5.4 Medição do Peso

Outro requisito deste sistema é o de conseguir diferenciar classes de veículos através de uma medição do peso do carro em movimento para ser possível esperar o peso médio do carro. Para tal, é necessário adquirir valores aproximados do peso dos carros que passam no sistema. Pensou-se, assim, em utilizar células de carga, mas estas apresentam dimensões muito elevadas que não seria possível de ser colocado nos protótipos sem realizar alterações à estrutura.

Para conseguir contornar este problema, foi pensado pela empresa haver um conjunto de doze bielas, como se pode observar pela figura 4.17, que suportariam o peso pelo qual os carros passam, em que duas delas teriam um circuito com o objetivo de medir a deformação com um conversor da variação de resistência do extensómetro para tensão para que, posteriormente, através de uma linearização, fosse possível obter valores próximos ao peso.



Figura 4.17 – Biela com extensómetros

Como referido anteriormente, o mais desejável é realizar a leitura de sensores através de protocolo SPI. Neste sentido, também será utilizado um integrado conversor ADC, sendo neste caso o MCP3002, como pode ser visualizado na figura 4.18. Este integrado possui as características apresentadas na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Características do conversor analógico-digital MCP3002 [50]

Caraterísticas	
Tensão de funcionamento	2,7 V a 5,5 V
Interface de comunicação	SPI
Taxa de comunicação SPI	2,7 V = 1,35 MHz 5 V = 3,6 MHz
Taxa de ADC	2,7 V = 75ksps 5 V = 200ksps
Número de canais	2



Figura 4.18 – Conversor analógico-digital MCP3002 [51]

5 Implementação

Este capítulo dedica-se mostrar que este protótipo é constituído por duas estruturas fundamentais: a parte do hardware e a parte do software. Desta forma, e com a arquitetura do protótipo em mente, são inicialmente indicados os esquemas de montagem e ligação dos componentes para o circuito, como também os fluxogramas do software desenvolvido.

5.1 Hardware

Neste projeto, são utilizados três módulos diferentes: Aquisição, Agregador e Universal. Para isto foram dimensionados três circuitos, um para cada módulo, de forma a consolidar toda a eletrónica a ser utilizada numa única placa.

5.1.1 Módulo Aquisição

Primeiramente, serão abordados os circuitos que constituem o módulo de aquisição de dados como pode ser visualizado pelas figuras 5.1 e 5.2. O microcontrolador a ser utilizado para este esquema seria o STM32G431KBT6, contudo, devido à escassez destes microcontroladores no formato *surface-mount device* (SMD), teve-se de optar pelo uso dos Nucleo-STM32G431KB na implementação final das placas.

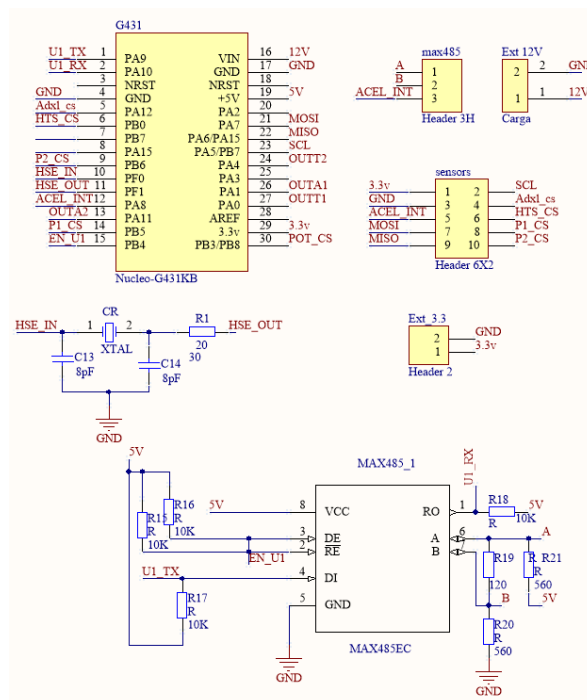


Figura 5.1 – Esquema do circuito de conectores e MAX485 do Módulo de Aquisição

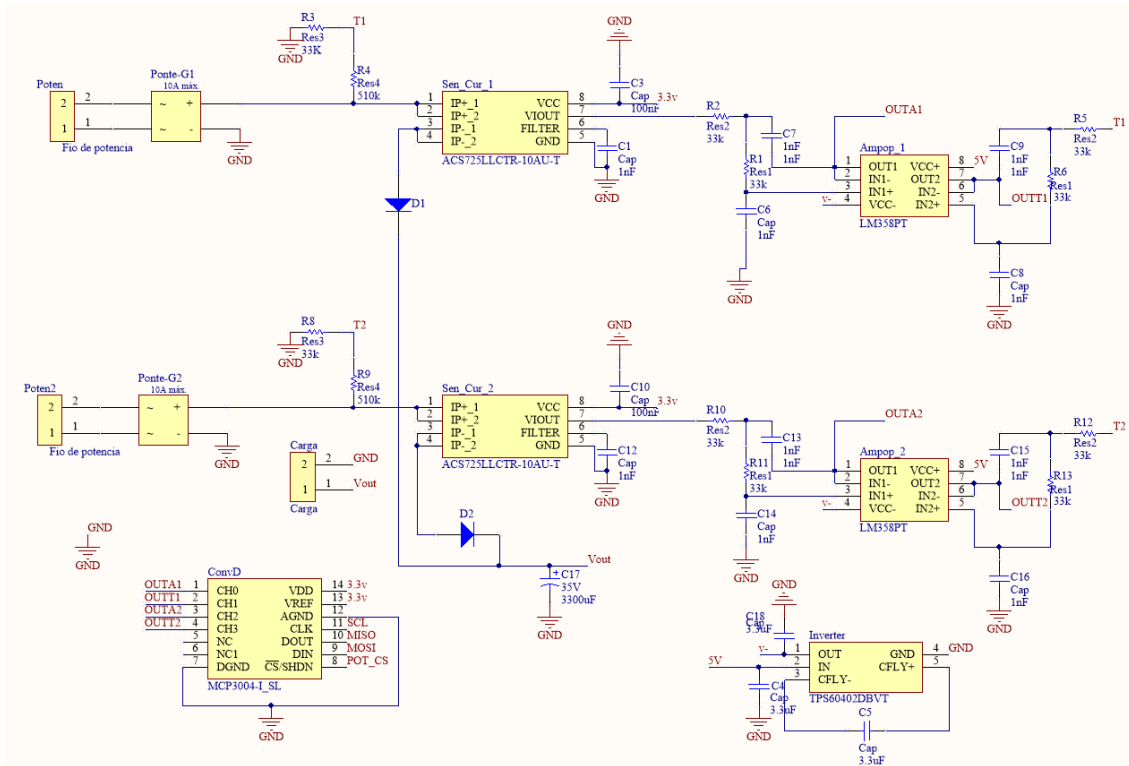


Figura 5.2 – Esquema do circuito de potência do Módulo de Aquisição

5.1.1.1 Conectores entre sensores e módulo

Para facilitar a conexão entre os sensores e o módulo, foram também desenvolvidos conectores externos, de modo a facilitar a conexão complexa dos sensores SPI com o módulo agregador. O esquema deste circuito pode ser visualizado na figura 5.3.

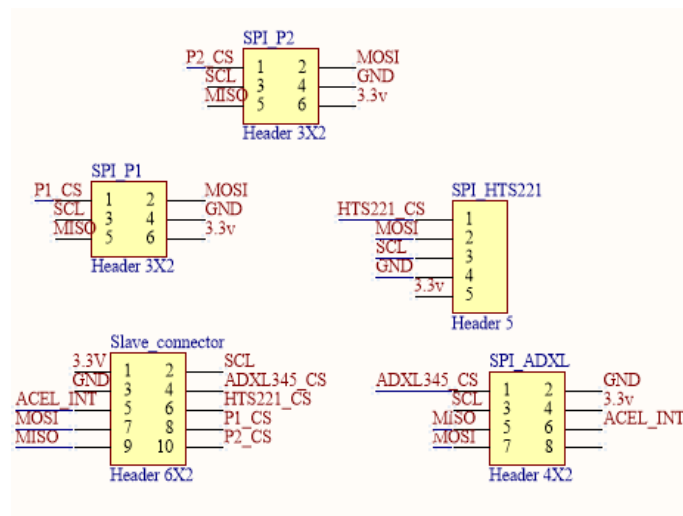


Figura 5.3 – Esquema do circuito de conector de sensores

5.1.1.2 Cristal externo

Como o módulo de aquisição recorre ao uso de temporizadores para que estes se mantenham precisos, foi conectado a um cristal oscilador de 24 MHz de 20 partes por milhão (PPM), de maneira a melhorar a performance destes como pode ser observado pela figura 5.4.

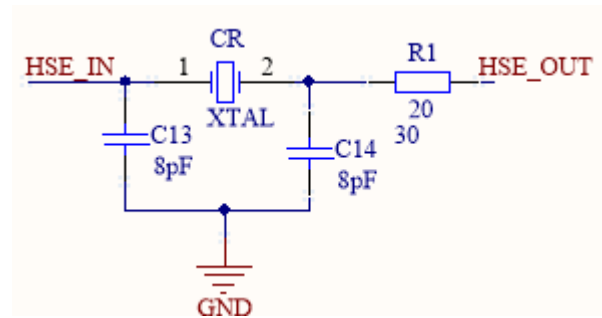


Figura 5.4 – Esquema do Cristal externo do módulo de aquisição

De modo a calcular os condensadores a serem utilizados no cristal, é necessário numa fase inicial descobrir a capacitância de carga (C_L) que é especificada pelo fabricante do cristal, sendo neste caso de 6 pF. A capacitância parasita normalmente encontra-se dentro do limite de 2 e 5 pF. Deste modo, o valor dos condensadores pode ser calculado pela equação 5.1.

$$C_{load} = C1 \times \frac{C2}{C1 + C2} + C_{stray} \quad (5.1)$$

5.1.1.3 MAX485

O MAX485 é responsável pela realização da interligação e o controlo das comunicações USART entre os vários dispositivos na rede. Para que este circuito funcione de uma forma eficiente e sem erros é necessário a existência de resistências de terminação e de polarização, como pode ser observado pelo esquema elétrico da figura 5.5.

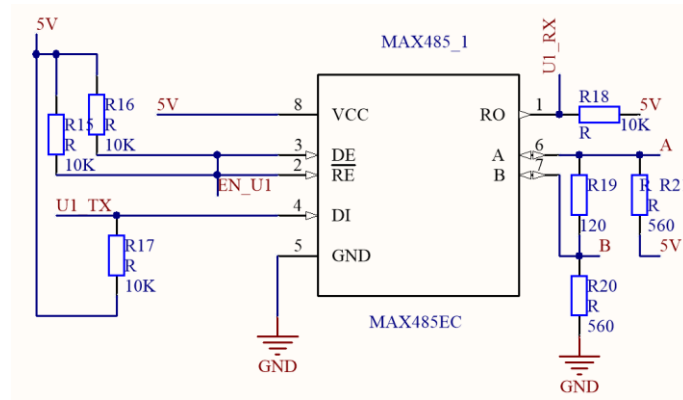


Figura 5.5 – Esquema do circuito do MAX485

Inicialmente, as resistências de terminação estão presentes de forma a tentar eliminar a presença de reflexões no extremo dos cabos, ou seja, tem de ser terminados com resistências de $120\ \Omega$ de ambos extremos entre as linhas A e B.

Seguidamente, as resistências de polarização sendo estas necessárias devido ao facto de haver períodos em que nenhum dispositivo esteja a comunicar. Durante este período as resistências de terminação vão colocar a tensão em ambas linhas a $0\ \text{V}$, para o qual dispositivos MAX485 é um valor indefinido. Ao ser confrontado com este valor de entrada, o recetor poderá ler um *byte* de forma errada ou ainda pior podendo ocorrer oscilações na linha o que irá gerar uma quantidade enorme de *start bits* da transmissão, interrupções ou erros de trama.

Para ultrapassar este problema pode ser utilizado o método *fail safe* que consiste numa combinação de resistências de *pull-down* e *pull-up* para polarizar as linhas A e B, como mostrado na figura 5.4, nas resistências R20 e R21, tendo como objetivo manter ambas as linhas sempre em valores conhecidos e sem flutuações quando nenhum dispositivo estiver a comunicar. Para tal, calculou-se o valor da resistência a partir da equação 5.2 em que V_S é a tensão mínima possível que está a ser alimentada o circuito neste caso sendo $4,75\ \text{V}$ e $27,8\ \Omega$ é a carga em modo comum de um sistema RS485, V_{AB} é a tensão diferencial máxima possível entre as duas linhas sem ser gerado ruído, ou seja, $200\ \text{mV}$ da tolerância do ruído mais $50\ \text{mV}$ sendo o máximo ruído expectável no sistema com um total de $250\ \text{mV}$.

$$R_{FS} = \left(\frac{V_S}{V_{AB}} + 1 \right) \times V_{FS} \ \Omega = 556 \ \Omega \quad (5.2)$$

Calculado o valor das resistências foi então escolhida uma resistência real de 560 Ω para ser utilizada na polarização.

5.1.1.4 Potência

– Conversão de tensão alternada para contínua

Como a energia gerada pelos geradores é AC, para ser possível realizar leituras de uma maneira eficaz é necessário através da ponte retificadora KBPC1001 converter esse sinal para DC, sendo assim possível posteriormente realizar medições. O esquema do circuito pode ser visualizado pela figura 5.6.

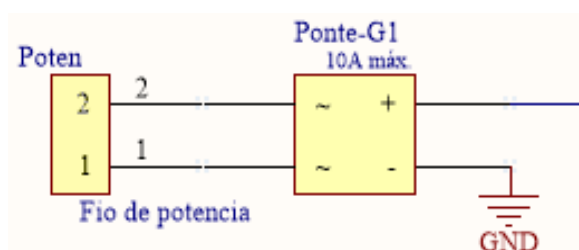


Figura 5.6 – Esquema do circuito da ponte retificadora AC/DC

– Divisor de tensão

Para possibilitar a leitura dos valores de tensão pelo MCP3004 é necessário, deste modo, que as tensões de entrada deste apresentem valores entre 0 V e 3,3 V. Como os geradores podem apresentar um máximo tensão na ordem dos 50 V, é necessário realizar a conversão deste valor para 3,3 V.

Para tal, utilizou-se um divisor de tensão capaz de realizar esta operação. Na fórmula da equação 5.3 pode ser visualizado os valores de resistências calculados.

$$V_{ADC} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (5.3)$$

Fixando o valor de 33 k Ω para R2, a resistência R1 toma o valor real de 470 k Ω sendo esta a resistência mais próxima do valor calculado, como pode ser observado pela figura 5.7. Assim sendo, através dos valores de resistências calculados serem altos, o consumo de corrente não é muito elevado.

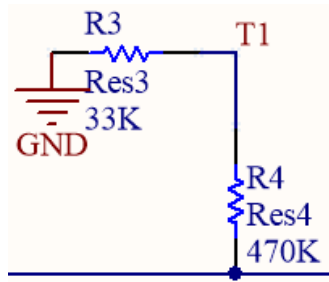


Figura 5.7 – Esquema do divisor de tensão do gerador

– **Carga para medição de corrente**

Para ser possível medir a corrente que é fornecida pelo gerador foi implementado um *header*, como pode ser conferido na figura 5.8, que permite a troca de cargas sendo assim possível realizar uma maior quantidade de testes futuros, permitindo desta forma saber qual carga fornece uma quantidade de energia maior.

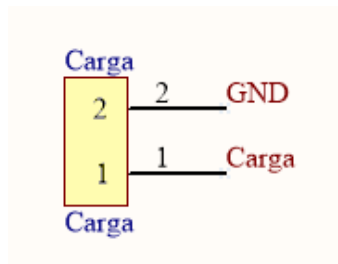


Figura 5.8 – Esquema do *header* para a carga

– **Filtragem do sinal de tensão e corrente**

Para ser possível realizar uma leitura dos sinais de forma precisa é necessário realizar uma filtragem destes sinais analógicos para que seja possível remover maior parte do ruído e correntes antes de convertidos para digitais. Para tal foi pensado na utilização de um filtro passa baixo *Sallen-Key* [52] que possibilita estas duas condições como pode ser visualizado na figura 5.9.

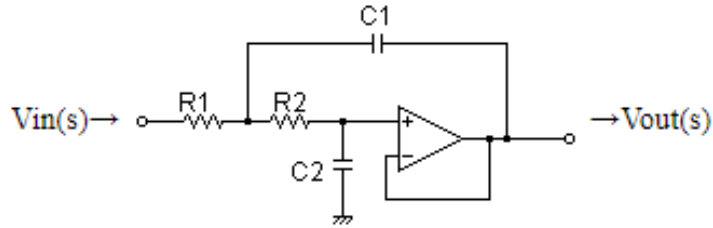


Figura 5.9 – Esquema de um filtro passa baixo *Sallen-Key*[53]

Para a redução do ruído dos sinais foi estabelecido que uma frequência de corte por volta dos 5 kHz seria o ideal. Desta forma, é possível calcular os valores das resistências e condensadores a serem utilizados através da equação 5.4.

$$f_c = \frac{1}{2\pi(\sqrt{R1C1R2C2})} \quad (5.4)$$

Com isto, o valor de resistência a ser utilizado é de 33 k Ω e o valor mais próximo de condensador para ser utilizado nesta aplicação é de 10 nF. Ficando, assim, com uma frequência de corte de 4822 Hz.

Para possibilitar a implementação deste filtro foi necessário gerar uma tensão negativa de 5 V para realizar a alimentação do amplificador operacional através do integrado TPS60402DBVT, como pode ser visualizado pela figura 5.10.

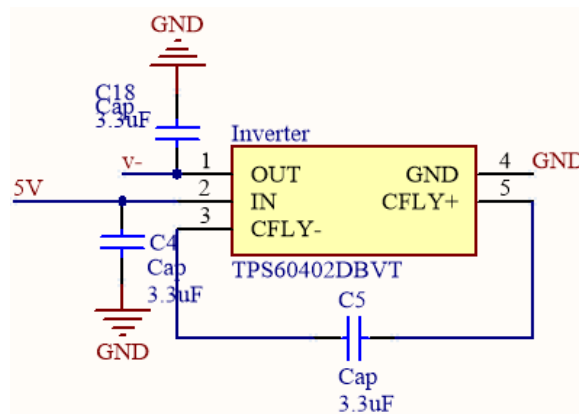


Figura 5.10 – Esquema do circuito do inversor de 5 V

Desta forma, foi possível implementar o filtro passa baixo *Sallen-Key*, como pode ser visualizado na figura 5.11.

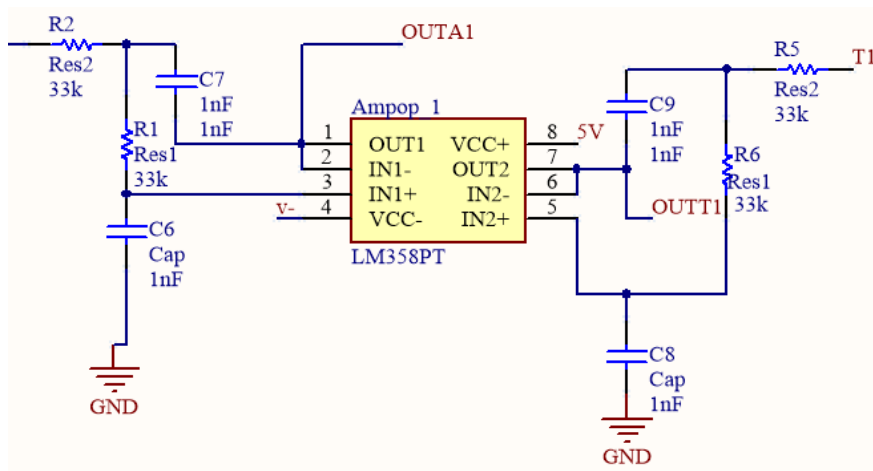


Figura 5.11 – Esquema do filtro passa baixo *Sallen-Key*

– Conversor Analógico-Digital

Por fim, apenas foi necessário realizar as ligações ao conversor analógico-digital de modo que este possuía uma alimentação e tensão de referência de 3,3 V, tendo em cada canal de entrada as correntes e tensões lidas pelos dois geradores e as conexões SPI, como pode ser observado pela figura 5.12.

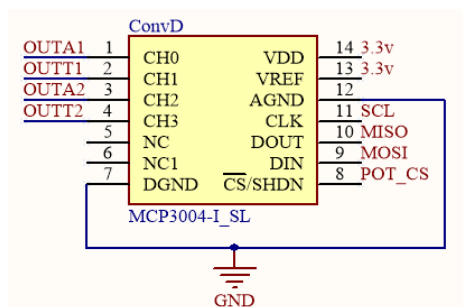


Figura 5.12 – Esquema do circuito do conversor MCP3004

5.1.1.5 GPIOs utilizados pelo módulo de aquisição

Na figura 5.13 pode-se observar todas as conexões realizadas para as ligações entre os componentes e o microcontrolador. Foi necessário utilizar 3 pinos para realizar as ligações com os sensores SPI mais 1 para cada CS, ou seja, 8 pinos. Foram utilizados os 2 pinos de comunicação e 1 pino ativador para RS485 para a comunicação com o módulo agregador. Para além disto, também foi conectado o cristal oscilador aos pinos PF0 e PF1. Estas ligações podem ser mais facilmente observadas na tabela 5.1.

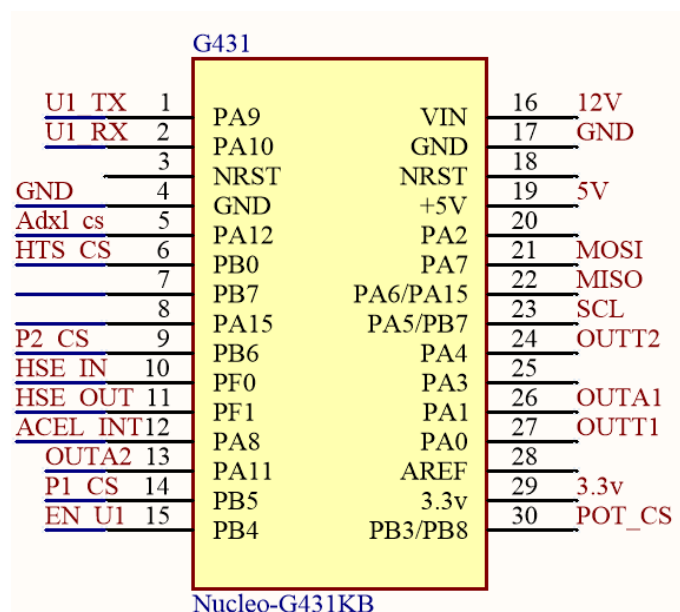


Figura 5.13 – Esquema do circuito do Nucleo-G431KB

Tabela 5.1 - Conexões entre o Nucleo-G431kb e a PCB de aquisição

Nucleo-G431KB	Componentes
SCK, MOSI, MISO	Acelerómetro
	Sensor de temperatura e humidade
	Sensores de peso
POT_CS	Sensores de potência
P1_CS	Sensor de peso 1
P2_CS	Sensor de peso 2
Adxl_CS	Acelerómetro
HTS_CS	Sensor de temperatura e humidade
U1_RX e U1_TX e EN_U1	MAX485
Acel_Int	Pino de interrupção do Acelerómetro
HSE_IN e HSE_OUT	Cristal Oscilador

5.1.2 Módulo Agregador

De seguida, serão abordados os circuitos que constituem o módulo agregador, como pode ser verificado pela figura 5.14. O microcontrolador a ser utilizado para este esquema seria o STM32L476RBT6, contudo, devido à escassez destes microcontroladores no formato SMD teve-se de optar pelo uso dos Nucleo-STM32L476RG na implementação final das placas.

Como se pode observar pela figura 5.14, alguns dos componentes do módulo de aquisição estão aqui aplicados novamente tal como os MAX485, o cristal oscilador externo e, para além do que já tinha sido falado, também se adicionaram vários conectores para realizar toda a interligação entre o módulo de aquisição, agregadores e universal.

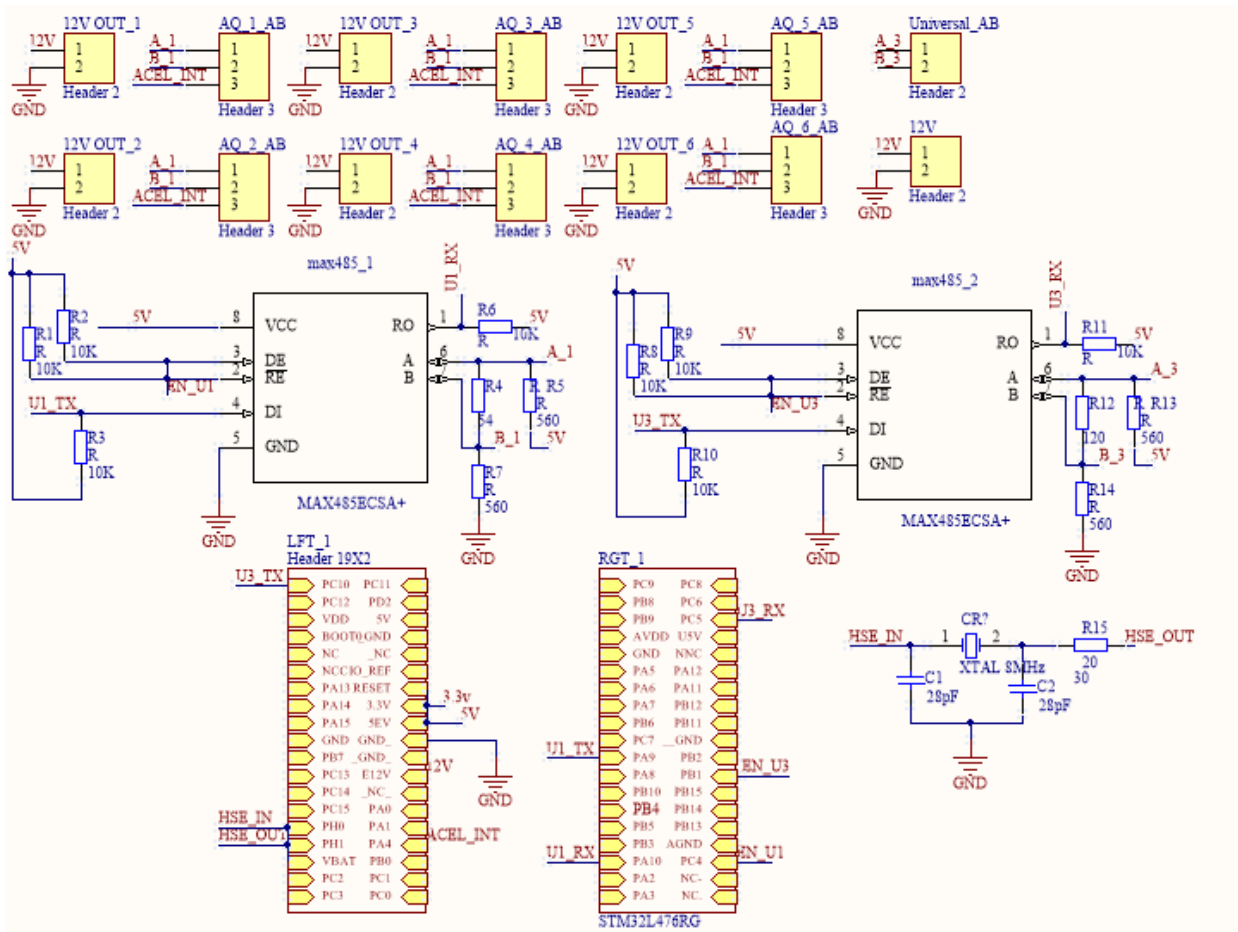


Figura 5.14 – Esquema do circuito do Módulo Agregador

5.1.2.1 Cristal Oscilador

Como o módulo agregador recorre ao uso de temporizadores para que estes se mantenham precisos, foi conectado a um cristal oscilador de 8 MHz de 20 PPM de maneira a melhorar a performance destes, como pode ser observado pela figura 5.15.

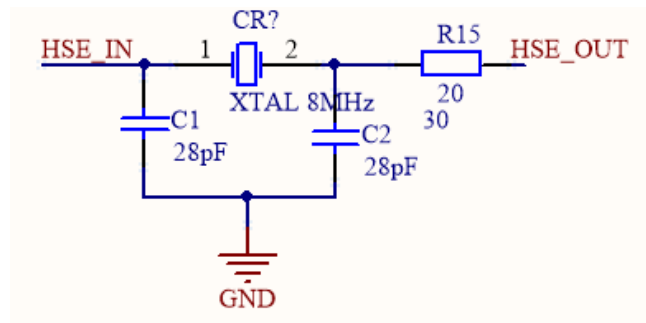


Figura 5.15 – Esquema do Cristal Oscilador externo do módulo agregador

De modo a calcular os condensadores a serem utilizados no cristal, é necessário em primeiro lugar descobrir a capacitância de carga (C_{load}), que é especificada pelo fabricante do cristal, sendo neste caso de 16 pF. A capacitância parasita normalmente encontra-se dentro do limite de 2 e 5 pF. Assim sendo, o valor dos condensadores pode ser calculado pela equação 5.5.

$$C_{load} = C1 * \frac{C2}{C1 + C2} + C_{stray} \quad (5.5)$$

5.1.2.2 MAX485

Como já referido anteriormente, cada participante de uma rede RS485 necessita de um *transceiver* MAX485 para comunicar. Neste sentido, no caso do módulo agregador como este participa em duas redes diferentes de comunicação, foram implementados dois destes *transceivers* separadamente em dois dos canais USART presentes no microcontrolador STM32L476RG, como pode ser visualizado pela figura 5.16.

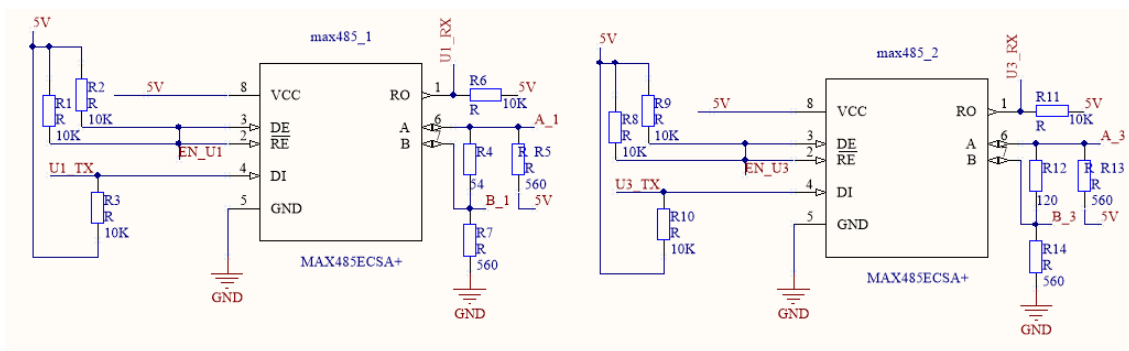


Figura 5.16 – Esquema do circuito dos *transceivers* MAX485

5.1.2.3 Conectores entre módulos

No sentido de facilitar as conexões do protocolo RS485 entre os módulos de aquisição e o universal, foram também desenvolvidos conectores externos, de modo a facilitar a interligação de todos os pinos de interrupção externa e a conexão de todos os módulos através da placa do agregador simplificando assim a complexidade das ligações. Os esquemas de todos os conectores de comunicação utilizados no módulo agregador, podendo ser visualizados na figura 5.17.

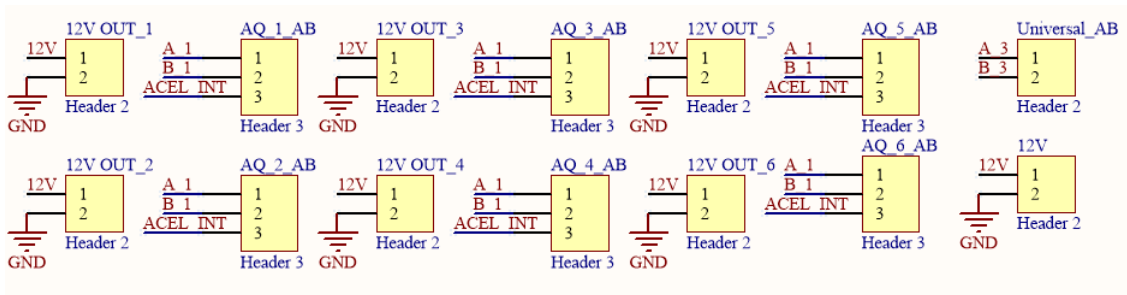


Figura 5.17 – Esquema do circuito dos conectores de comunicação

5.1.2.4 GPIOs utilizados pelo módulo agregador

Na figura 5.18 pode-se observar todas as conexões realizadas para as ligações entre os componentes e o microcontrolador. Apenas foi necessário utilizar os pinos RX e TX das portas USART 1 e 3, como também 2 pino de ativação para RS485 para habilitar a comunicação entre os módulos de aquisição pelo canal de USART 1 e o módulo universal pelo canal de USART 3. Para além disto, também foi conectado o cristal oscilador aos pinos PH0 e PH1. Estas ligações podem ser mais facilmente observadas na tabela 5.2.

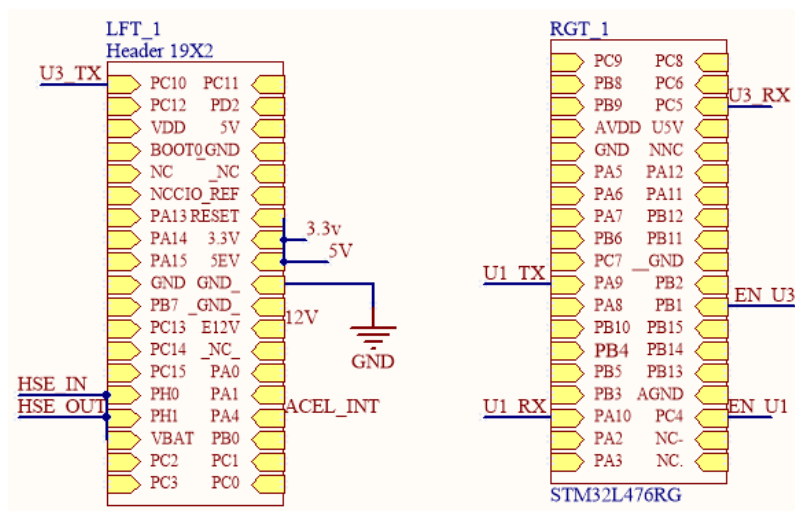


Figura 5.18 – Esquema das conexões do módulo agregador com Nucleo-STM32L476RG

Tabela 5.2 – Conexões entre o Nucleo-L476RG e a PCB do agregador

Nucleo-L476RG	Componentes
U1_RX e U1_TX e EN_U1	MAX485 Aquisição
U3_RX e U3_TX e EN_U3	MAX485 Agregador
HSE_IN e HSE_OUT	Cristal Oscilador

5.1.3 Módulo Universal

Por fim, serão abordados os circuitos que constituem o módulo universal, como pode ser visualizado pela figura 5.19. O microcontrolador a ser utilizado para este esquema seria o STM32L476RBT6, contudo, devido à escassez destes microcontroladores no formato SMD, teve-se de optar pelo uso dos Nucleo-STM32L476RG na implementação final das placas.

Como se pode observar pela figura 5.19, alguns dos componentes do módulo de aquisição e agregador estão aqui aplicados novamente tal como os MAX485, o cristal oscilador externo e, para além do que já tinha sido falado, também se adicionaram vários conectores para realizar toda a interligação com todos os módulos agregadores.

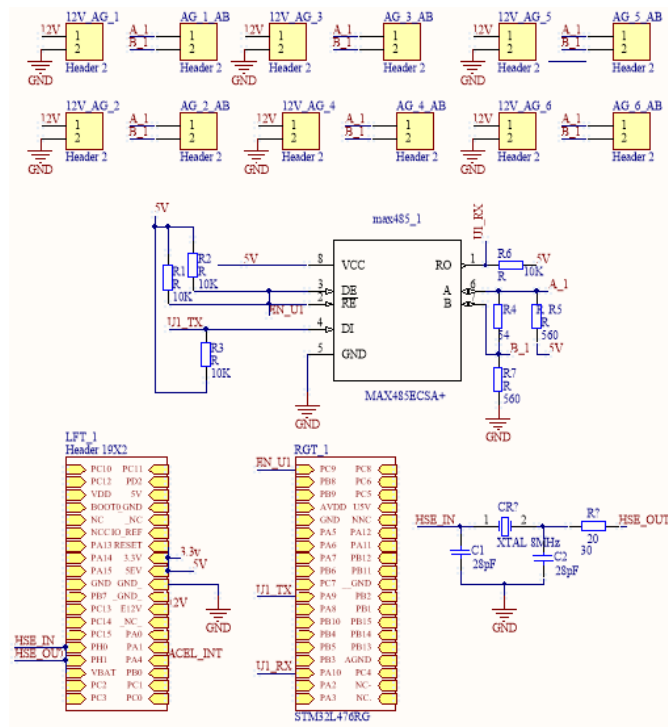


Figura 5.19 – Esquema do circuito do módulo Universal

5.1.3.1 Conectores entre módulos

No sentido de facilitar as conexões do protocolo RS485 tanto com os módulos do agregador, foram também desenvolvidos conectores externos de modo a facilitar a interligação de todos os pines de interrupção externa e a conexão de todos os módulos através da placa do agregador, simplificando deste modo a complexidade das ligações. Os esquemas de todos os conectores de comunicação utilizados no módulo universal podem ser visualizados na figura 5.20.

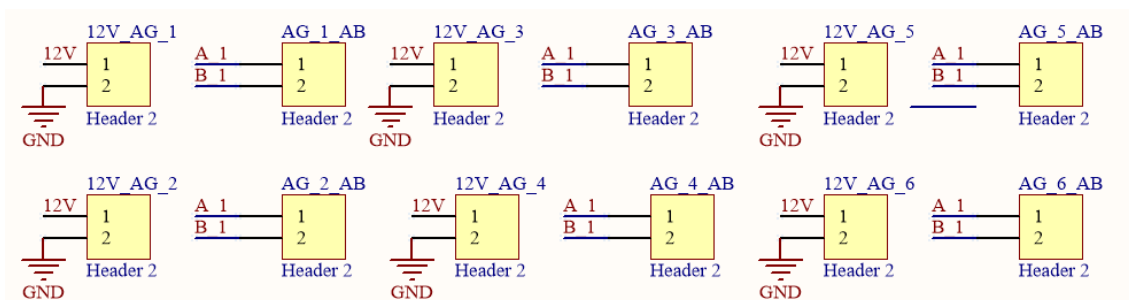


Figura 5.20 – Esquema do circuito dos conectores de comunicação do módulo universal

5.1.3.2 GPIOs utilizados pelo módulo agregador

Na figura 5.21 pode-se observar todas as conexões realizadas para as ligações entre os componentes e o microcontrolador. Apenas foi necessário utilizar os pinos RX e TX das portas USART 1 e um pino de ativação para RS485 para habilitar a comunicação com os módulos agregadores. Para além disto, também foi conectado o cristal oscilador aos pinos PH0 e PH1. Estas ligações podem ser mais facilmente observadas na tabela 5.3.

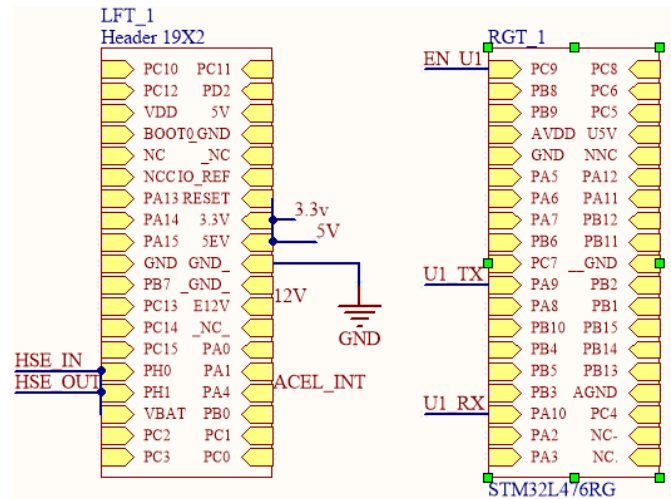


Figura 5.21 – Esquema das conexões do módulo universal com Nucleo-STM32L476RG

Tabela 5.3 – Conexões entre o Nucleo-L476RG e a PCB do módulo universal

Nucleo-L476RG	Componentes
U1_RX e U1_TX e EN_U1	MAX485 Agregador
HSE_IN e HSE_OUT	Cristal Oscilador

5.1.4 Alimentação dos módulos

Para realizar toda a alimentação dos módulos foi utilizada uma tensão de barramento de 12 V que, posteriormente, é convertida para 3,3 V e 5 V pelos NUCLEO. No caso de terem sido utilizados os microcontroladores da STM32 teria sido necessário a instalação de dois reguladores de tensão, para cada uma das tensões referidas.

Para além disto, no caso de serem utilizados os microcontroladores também teria sido importante a instalação de condensadores de *decoupling*, tanto na entrada de alimentação, como também nos canais analógicos, caso sejam utilizados para filtrar possíveis alterações de tensão e mantê-la constante.

5.1.5 Design final das PCBs

Neste sentido, foram desenvolvidas quatro PCB, uma para cada módulo e uma placa de conexões entre os sensores e o módulo de aquisições, tal como pode ser visualizado nas figuras 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25. Estas PCBs foram desenvolvidas a alocar todas as ligações e componentes num pequeno espaço para que este possa depois ser instalado de forma fácil e conveniente nos módulos mecânicos.

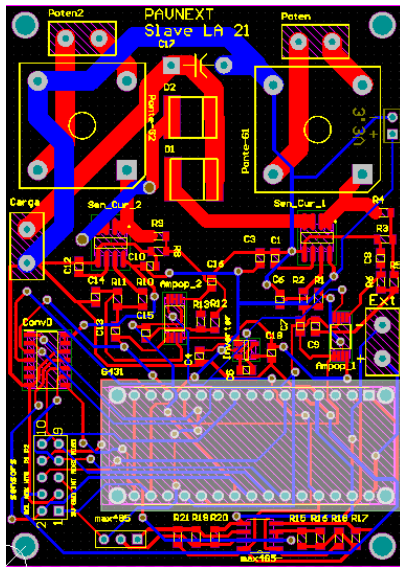


Figura 5.22 – Circuito PCB do módulo de aquisição

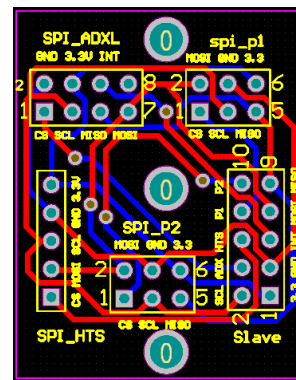


Figura 5.23 – Circuito conector entre os sensores e módulo de aquisição

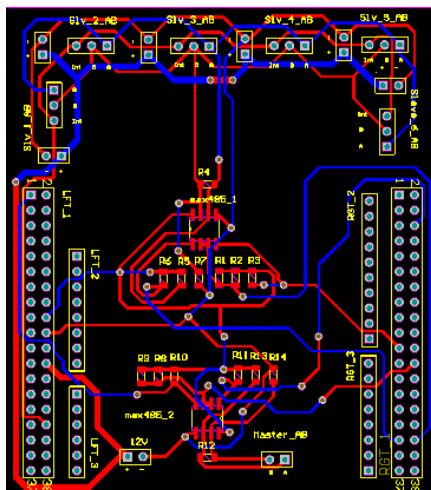


Figura 5.24 - Circuito PCB do módulo de agregador

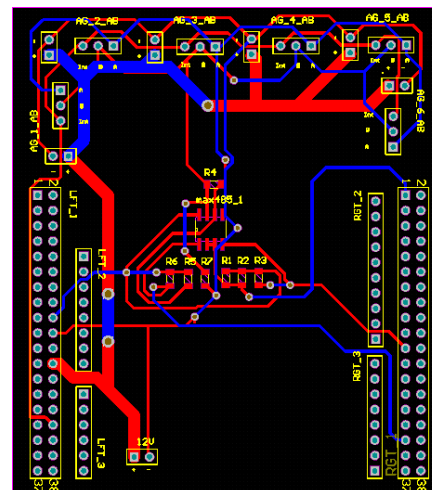


Figura 5.25 – Circuito PCB do módulo de universal

Após todo o processo de montagem é possível visualizar o aspecto final de cada um dos módulos desenvolvidos nas figuras 5.26, 5.27 e 5.28 apresentadas abaixo. Apesar de tudo, em relação ao módulo de aquisição, apenas foi possível montar dois módulos com todos os componentes, sendo que, o componente de sensor de corrente acs725 encontrava-se esgotado, sendo impossível obter o mesmo a tempo. Desta forma, apenas será possível realizar leituras de energia em dois módulos durante os testes a serem realizados posteriormente.



Figura 5.26 - PCB de módulo de aquisição



Figura 5.27 – PCB do módulo agregador

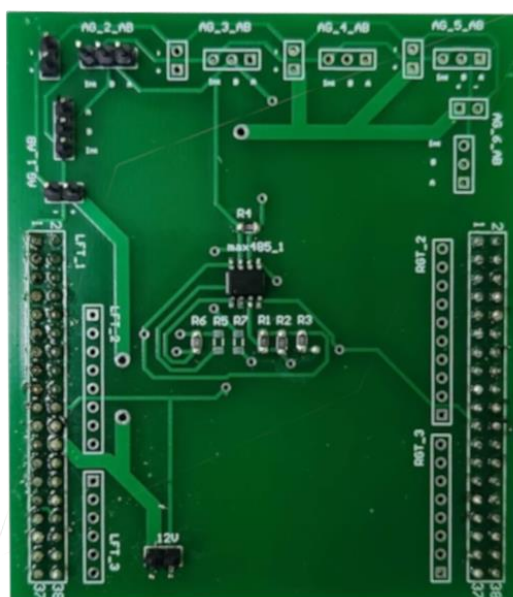


Figura 5.28 – PCB do módulo universal

5.2 *Firmware*

O desenvolvimento do *firmware* para os módulos STM32 foi realizado no *integrated development environment* (IDE) STM32CUBEIDE [54] que recorre ao uso das bibliotecas HAL. No caso do programa de monitorização em tempo real foi utilizada a linguagem de programação Python no IDE VSCODE [55].

5.2.1 Algoritmo do módulo de aquisição

Inicialmente, todos os módulos de aquisição encontram-se no modo de poupança de energia à espera de uma atuação dos acelerómetros indicando a passagem de um carro. Quando os acelerómetros dos módulos de aquisição 1 ou 2 detetar uma alteração considerável da força gravítica do eixo z nos módulos mecânicos este irá gerar uma interrupção que irá ativar todos os microcontroladores. A partir deste instante, todos os microcontroladores e os seus sensores irão começar a realizar medições e processar os dados que estão a ser lidos, guardando apenas os valores mais elevados das acelerações, pesos, o valor atual da temperatura, humidade, tensões, corrente, potência e também a energia total gerada por cada gerador. De seguida, este irá enviar para o módulo agregador a mensagem com a informação relativa à passagem do carro por este módulo.

Neste sentido, para realizar todas as operações descritas anteriormente, foi desenvolvido um algoritmo capaz de realizar todas as operações descritas. Como visto na figura 5.29, inicialmente, este algoritmo passa por realizar todas as configurações necessárias em temporizadores, interrupções, UART, Gpios, SPI e nos sensores. De seguida, este entra em modo poupança de energia, de modo a desligar maior parte dos seus periféricos no sentido de haver uma diminuição significativa de consumo energético.

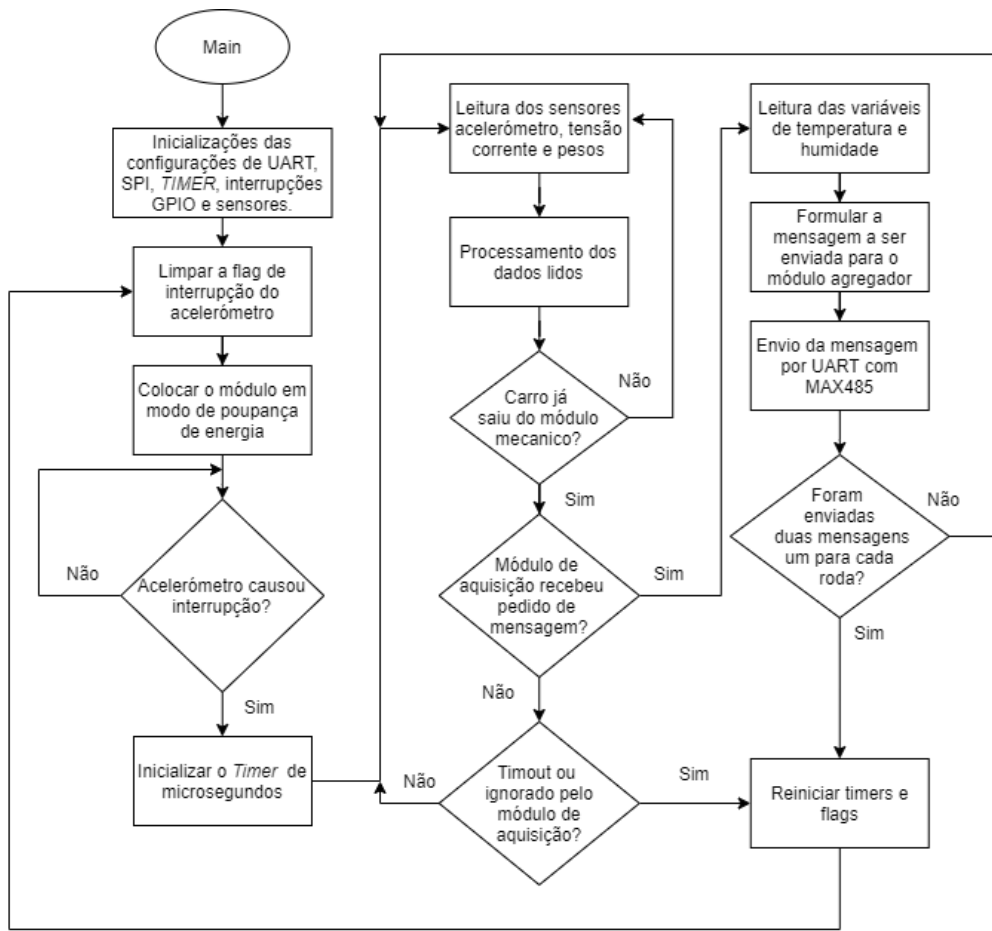


Figura 5.29 – Algoritmo *Main* do módulo de aquisição

Enquanto o microcontrolador se encontra no modo de poupança de energia, este estará à espera de uma interrupção gerada pelo ADXL345 quando um carro der passagem por cima do módulo mecânico, de modo a acordar todos os módulos de aquisição e agregador. Na figura 5.30 pode ser visualizado o algoritmo da interrupção do ADXL345 que tem como objetivo informar e acordar o microcontrolador quando um carro está a dar passagem no sistema mecânico.

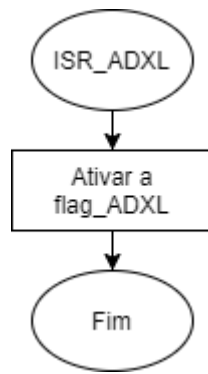


Figura 5.30 – Algoritmo da interrupção externa do ADXL345 do módulo de aquisição

Após isto, será inicializado o temporizador de microssegundos que tem como objetivo realizar uma contagem de tempo precisa desde o momento em que o carro passa no módulo para que posteriormente seja possível ser utilizada na contagem da energia gerada. Na figura 5.31 pode ser observado o algoritmo da interrupção do temporizador que incrementa os microssegundos.

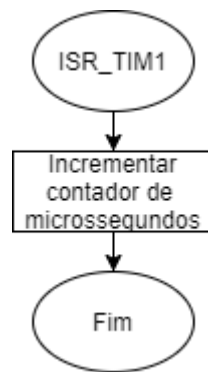


Figura 5.31 – Algoritmo referente ao temporizador de contagem de microssegundos do módulo de aquisição

Entretanto, durante a passagem do carro pelo módulo, são recolhidos os dados de aceleração, tensão, corrente, energia e pesos sequencialmente de modo a guardar sempre os valores mais altos de cada variável ao longo do tempo. Neste momento, o acelerómetro estará a ser utilizado de modo a saber quais as atuais condições do tempo do módulo mecânico, para manter registos da posição atual desta, quando é que o carro dá saída deste o que significa que a mensagem relativa ao veículo terminou de ser gerada.

Enquanto isto, como pode ser visualizado pelo algoritmo da figura 5.32 da interrupção da interface UART o microcontrolador do módulo de aquisição está a aguardar pela mensagem de UART que informa que a mensagem gerada pode ser enviada para o

módulo agregador ao ativar uma *flag* de aviso. Caso esta mensagem nunca seja recebida, um *timeout* será ativado passando o envio da mensagem à frente. No caso de ter sido recebida a mensagem por UART e o módulo por algum motivo não esteja a conseguir realizar o envio da mensagem, caso o módulo agregador envie o pedido de mensagem para o módulo de aquisição seguinte este irá atuar como um *timeout* passando à frente o envio da mensagem. Em funcionamento normal o microcontrolador irá então enviar a mensagem para o módulo agregador dando por fim a passagem da primeira roda pelo módulo.

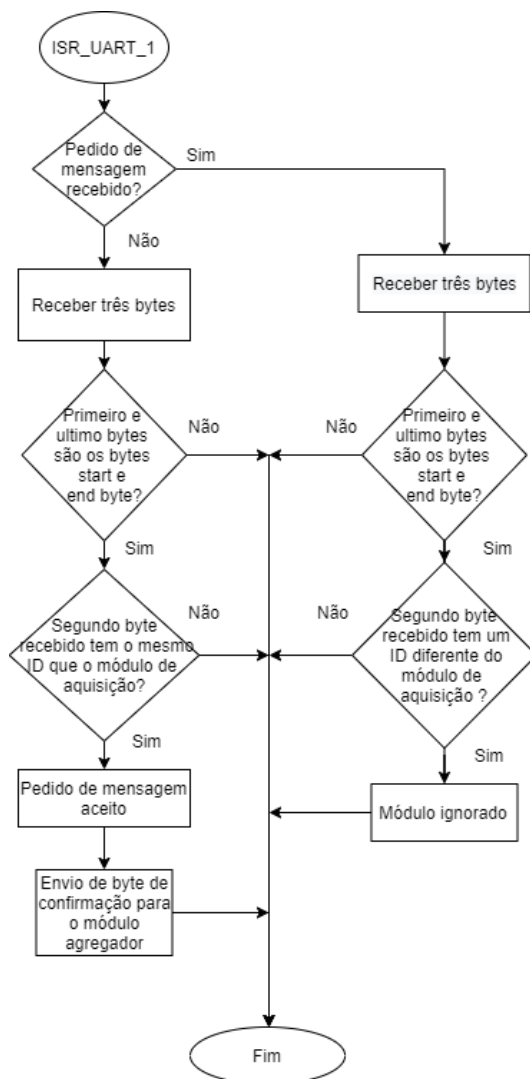


Figura 5.32 – Algoritmo da interrupção do por UART 1 do módulo de aquisição

Por fim, este processo será repetido para a passagem da segunda roda pelo módulo, sendo assim possível realizar a recessão de todas as passagens das rodas de um carro pelo

módulo de aquisição sem haver perdas de dados. Todos os algoritmos apresentados e utilizados no decorrer do programa serão posteriormente explicados em maior detalhe.

5.2.1.1 Configurações do módulo de aquisição

Numa fase inicial da realização do *firmware* relativo ao módulo de aquisição, primeiramente, foram realizadas as inicializações da UART, SPI, interrupções, temporizadores e todos os sensores.

– Acelerómetro

O sensor ADXL345 utiliza uma interface de comunicação SPI bidirecional que utiliza 4 fios: MISO, MOSI, SCK, CS. Para ser possível realizar leituras de acelerações deste sensor, primeiramente, este tem de ser configurado. Para configurar o acelerómetro, inicialmente, foi necessário colocar o sensor no modo de funcionamento ativo, colocar este a fazer o envio de cada captura de dados à taxa de comunicação mais elevada e ativar o modo de funcionamento de *full resolution* que tem como objetivo aumentar a resolução dos valores de aceleração conforme o aumento desta. Após terem sido feitas algumas leituras com o sensor foi deparado que este estava com algum desvio na leitura dos valores e foi necessário calibrar o sensor. Para calibrar o sensor foram utilizados registos que são capazes de fazer um *offset* do valor lido para ficar mais próximo do real.

O segundo passo da configuração do acelerómetro tratou-se da configuração do modo de funcionamento da interrupção que seria gerada por este. Primeiramente, foi ativado o modo de interrupção que procura alterações de aceleração no eixo z. De seguida, foi necessário configurar o registo que calibra o ponto de ativação das interrupções relativos aos valores de acelerações lidos. Sendo este um registo de 8 *bits* apresenta uma gama de escolha desde 0 a 255 e a resolução é dada por 62,5 mg/*bit*, escolhendo o valor de 0xA0 obtem-se um valor limite de 1 g, ou seja, quando detetar uma alteração maior do que 1 g do eixo z este irá gerar uma interrupção. Pode-se observar pela tabela 5.4 os registos alterados para obter a configuração desejada.

Tabela 5.4 – Registos de configuração do acelerómetro [36]

Descrição	Registo	Configuração
Registo de <i>offset</i> do eixo x	0x1E	0x06
Registo de <i>offset</i> do eixo y	0x1F	0x8C
Registo de <i>offset</i> do eixo z	0x20	0x0E
Registo que configura o limite para gerar interrupção	0x24	0x09
Registo que indica quais eixos estão ativos para a deteção de interrupções	0x27	0x90
Registo que configura as velocidades de transferência	0x2C	0x0F
Registo que inicializa as medições de acelerações	0x2D	0x08
Registo que indica que tipo de interrupções estão ativos	0x2E	0x10
Registo que interliga cada tipo de interrupção a um pino	0x2F	0x10
Registo de formatação de dados e resolução	0x31	0x0B

– Sensor de temperatura e humidade

O sensor de temperatura e humidade HTS221 utiliza uma interface de comunicação por SPI unidirecional que apenas necessita três fios: MISO, SCK e CS. Para configurar este sensor foi enviado um *byte* contendo as configurações do registo referente ao funcionamento deste, especificando a frequência de aquisição de dados. E de seguida realizar a leitura de um conjunto de registos para que seja possível realizar a calibração dos dados lidos pelo sensor. Na configuração deste sensor foram ativados os *bits* de *power* e de frequência de aquisição de dados de 12,5 Hz como de pode ser visto pela tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Configurações do sensor HTS221[39]

Registo	<i>Bits</i>							
	PD	Reservado				BDU	ODR1	ODR0
CTRL_REG1	1	X	X	X	X	1	1	1

Para realizar a calibração dos valores lidos pelo sensor é necessário realizar também leituras de um conjunto de registos para posteriormente serem utilizados em cálculos dos valores reais da temperatura e humidade como de pode ser visualizado pela tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Conjuntos de registos a serem lidas para calibração [39]

Registo	Endereço
H0_rH_x2	0x30
H1_rH_x2	0x31
H0_T0_OUT	0x36
	0x37
H0_T0_OUT	0x3A
	0x3B
T0_degC_x8	0x32
T1_degC_x8	0x33
T1T0	0x35
T0_OUT	0x3C
	0x3D
T1_OUT	0x3E
	0x3F

Os registos apresentados na tabela 5.6 apenas necessitam de ser lidos no arranque do sistema não sendo necessário realizar mais o pedido de leitura. Recorrendo a estas variáveis e aos valores lidos pelo sensor de temperatura e humidade é possível calcular os valores de temperatura em graus e humidade em percentagem como pode ser visto pelas equações 5.6, 5.7 e 5.8.

$$\begin{aligned}
 H0_rH &= (H0_rH_x2)/2 \\
 H1_rH &= (H1_rH_x2)/2
 \end{aligned}
 \tag{5.6}$$

$$\begin{aligned}
 Hum &= (H1_rH - H0_rH) \times (rawHum - H0_T0_OUT) \\
 Hum &= (hum/(H1_T0_OUT - H0_T0_OUT)) + H0_rH_x2
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

$$\begin{aligned}
 Temp &= (T1 - T0) \times (rawTemp - T0_OUT) \\
 Temp &= (Temp/(T1_OUT - T0_OUT)) + T0
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

As configurações utilizadas para o funcionamento deste sensor foram, primeiramente, a de utilizar o modo de disparo único, ou seja, apenas irá realizar a leitura de temperatura e humidade quando for requisitado pelo microcontrolador e ficará em modo *standby* até ao próximo pedido. Este modo é utilizado pois as leituras deste sensor apenas são

realizadas no momento de envio da mensagem uma única vez. E ainda para tentar minimizar ainda mais o consumo de energia deste sensor foi utilizado o modo de repetibilidade baixa, neste modo as leituras são feitas mais rapidamente no sentido de ter menos gastos de energia.

– **Sensor de tensão e corrente**

Os sinais analógicos dos sensores de tensão e corrente anteriormente a serem lidos, são convertidos em sinais digitais numa resolução de 10 *bits* de saída com 3,3 V através do componente MCP3004. Para possibilitar a conversão da leitura destes sensores em valores reais de tensão e corrente, no caso do sensor de tensão, é necessário realizar a conversão dos valores digitais lidos e no caso do sensor de corrente, realizar uma linearização dos valores lidos para ser possível chegar a um resultado de corrente. Em relação ao sensor de tensão, a partir da equação 5.9 é possível chegar ao resultado da tensão gerada pelo gerador (V_G) através do valor da tensão digital b_G que se encontra com a resolução de 2^{10} lida pelo conversor ADC.

$$V_G = \frac{b_G \times 50}{1024} \quad (5.9)$$

No caso do sensor de corrente, a partir dos valores adquirido na tabela 5.7 é possível realizar a equivalência entre os valores de corrente gerados I_G e os valores de corrente digitais I_D convertidas pelo conversor ADC.

Tabela 5.7 – Linearização do sensor de corrente

Corrente digital (I_D)	Corrente Gerada (A)
512	0
516	0.1
520	0.2
528	0.4
535	0.6
543	0.8
550	1
588	2

No fim deste processo, foi descoberta a equação linear apresentada pela equação 5.10 capaz de realizar a equivalência entre a tensão lida pela entrada analógica e a corrente que foi gerada:

$$I_G = (26,5 * 10^{-3}) * I_D - 13,6 \quad (5.10)$$

– Frequência de funcionamento

A frequência de funcionamento utilizada no módulo agregador foi a frequência de 130 MHz, como pode ser observado pela figura 5.33, pois este módulo necessita de uma frequência capaz de manter a frequência de funcionamento dos periféricos SPI a uma taxa próxima dos 4 MHz, para além disto, que seja possível utilizar os periféricos de UART a 2 Mbit/s e realizar as suas operações o mais rápido possível.

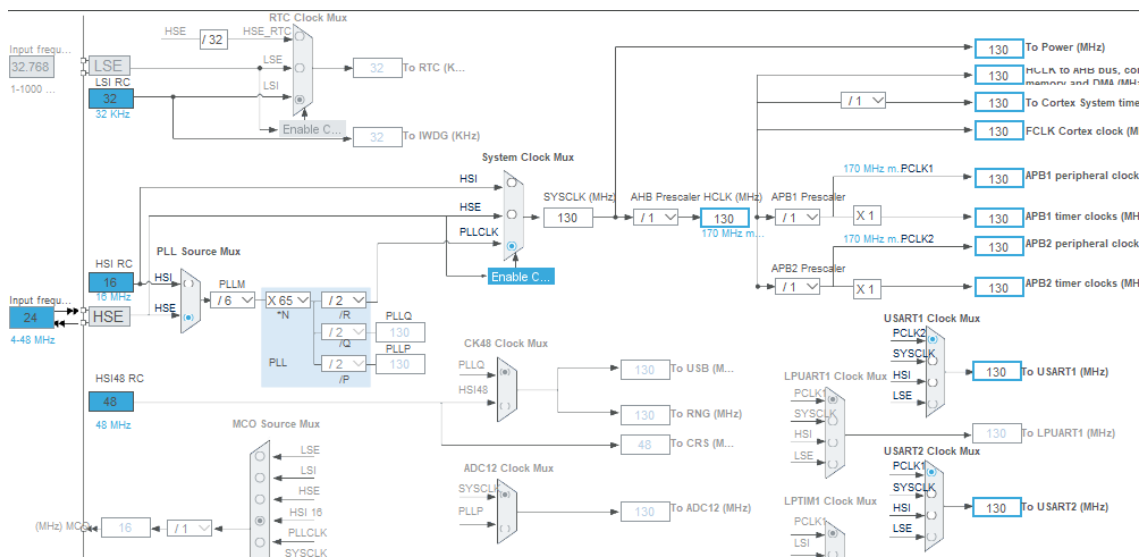


Figura 5.33 – Configuração da frequência de funcionamento utilizada no módulo de aquisição

– Mapeamento de todos os GPIOs do módulo de aquisição

O mapeamento dos pinos utilizado no módulo de aquisição pode ser observado na figura 5.34. Nesta figura pode-se observar, primeiramente, o pino da interrupção do acelerómetro no pino PA8. O mapeamento das UART1 nos pinos PA9 e PA10 e UART2 nos pinos PA2 e PA3. Juntamente com estes pinos tem-se o pino de ativação para RS485

no canal UART1 no pino PB4. De seguida, tem-se os três fios constituintes da comunicação SPI (SCLK, MISO, MOSI), nos pinos PA5, PA6 e PA7. Para além destes, ainda se tem os pinos de *relativo* a cada sensor nos pinos PB3, PB5, PB6 e PB0. Por último, se tem os pinos PF0 e PF1 que realizam a conexão com o oscilador externo.

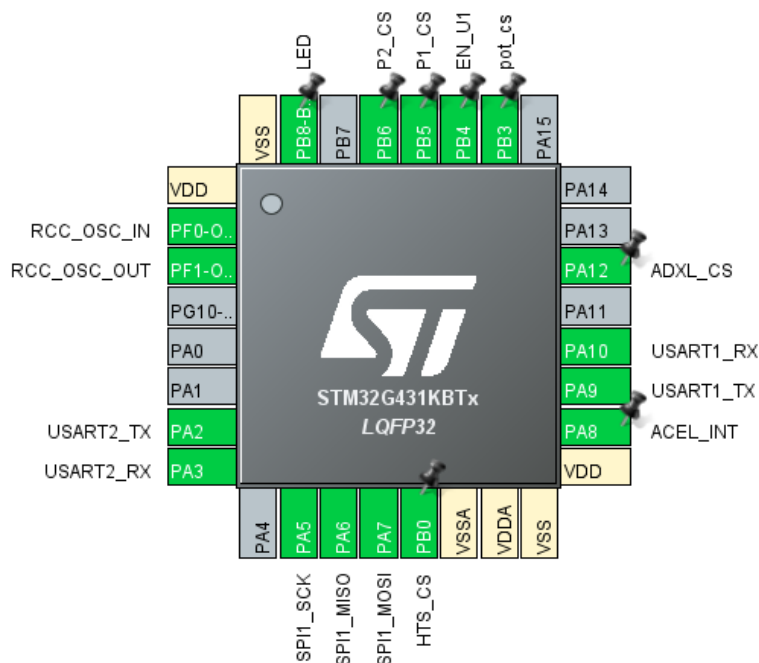


Figura 5.34 – Mapeamento dos pinos do microcontrolador do módulo de aquisição

– Comunicação UART

No módulo de aquisição, é necessário realizar a configuração de dois canais UART, um para realizar a interligação entre todos os módulos de aquisição e o módulo agregador e outro para realizar o envio das mensagens através da interface USB para o programa de monitorização, tornando assim possível a visualização das variáveis em tempo real.

Para habilitar a comunicação por UART dos módulos, existe a necessidade de realizar essa comunicação de forma rápida para que não haja a possibilidade de acontecer algum tipo de atraso no envio das mensagens e acabar por bloquear a execução do código durante o envio das mensagens. Por esse motivo o UART foi configurado com um *start bit*, sem *bit* de paridade, um *Stop bit* e com um *baudrate* de 2 *Mbits/s* na comunicação entre os módulos de modo a ser possível realizar os envios das mensagens geradas a cada passagem de roda através de RS485 de forma a ser possível realizar o envio de mensagens com o menor tempo possível mantendo também uma maior estabilidade na comunicação.

Em relação à comunicação com interface USB as configurações permanecem as mesmas, para que seja possível realizar o envio da mensagem a cada ciclo de leituras da forma mais rápida possível.

Desta forma, as configurações escolhidas para o funcionamento do protocolo UART1 e UART2 podem ser visualizados na figura 5.35.

▼ Basic Parameters	
Baud Rate	2000000 Bits/s
Word Length	8 Bits (including Parity)
Parity	None
Stop Bits	1
▼ Advanced Parameters	
Data Direction	Receive and Transmit
Over Sampling	16 Samples
Single Sample	Disable
ClockPrescaler	1

Figura 5.35 - Configurações de UART1 e 2

– SPI

Para realizar a comunicação entre todos os sensores é necessário ativar e configurar a interface SPI do módulo de aquisição. Neste sentido, sendo o microcontrolador o *master* e os sensores os *slaves*, a escolha das configurações é realizada inteiramente por parte do *master*.

Para configurar o periférico de SPI foram escolhidas as configurações mostradas na figura 5.36.

- O tamanho da informação a ser transmitida e recebida é de 8 *bits*;
- O *prescaler* a ser utilizado na configuração da comunicação SPI é de 32 ficando assim com um *baudrate* de $\frac{140 \text{ MHz}}{32} = 4.0625 \text{ MBits/s}$;
- *Clock Polarity* (CPOL) em modo crescente;
- *Clock Phase* (CPHA) de dois extremos.

<ul style="list-style-type: none"> <ul style="list-style-type: none"> <ul style="list-style-type: none"> Frame Format Data Size First Bit <ul style="list-style-type: none"> <ul style="list-style-type: none"> Prescaler (for Baud Rate) Baud Rate Clock Polarity (CPOL) Clock Phase (CPHA) 	<ul style="list-style-type: none"> Motorola 8 Bits MSB First 32 4.0625 MBits/s High 2 Edge
---	---

Figura 5.36 – Configurações de SPI

– Temporizador

Foi configurado também, um temporizador que tem como objetivo realizar a contagem de tempo em microssegundos de maneira a ser possível realizar a contagem de energia gerada ao longo da passagem do carro pelo módulo mecânico. Como realizar a contagem de microssegundos é algo que sobrecarrega o microcontrolador, foi então pensado em realizar a contagem do tempo através do incremento do registo contador em todos os microssegundos. Sendo assim, para realização deste temporizador, foi utilizado o TIM1 escolhendo os parâmetros de contador no modo crescente. Sabendo que o microcontrolador tem uma frequência de funcionamento de 130 MHz, se for utilizado um *prescaler* (PSC) de 129, isto significa que, efetivamente, a frequência do TIM1 é de 1 MHz. Neste sentido, a cada 1 microssegundo será incrementado o registo contador interno. Por fim, apenas é necessário escolher qual o valor a ser utilizado no *counter period*, sabendo este registo apenas pode conter valores de até 16 *bits* o máximo possível seria de 65536, neste caso, foi o escolhido o valor de 59999 pois equivale a 60 ms. Na equação 5.11 é possível verificar que para um temporizador de 60 ms com um PSC de 129 o *Period* é efetivamente 59999.

$$T = \frac{(PSC + 1)(Period + 1)}{Clock} \quad (5.11)$$

As configurações calculadas e utilizadas podem ser visualizadas na tabela de configurações do TIM1 apresentadas na figura 5.37.

Counter Settings	
Prescaler (PS...)	129
Counter Mode	Up
Dithering	Disable
Counter Perio...	59999
Internal Clock ...	No Division
Repetition Co...	0
auto-reload pr...	Disable

Figura 5.37 – Configurações do TIM1

5.2.1.2 Envio da mensagem para módulo agregador

– Transmissão de dados

Para realizar o envio das mensagens entre módulos de forma mais rápido possível, primeiramente, no sentido de diminuir a quantidade de dados a serem enviados, cada uma das variáveis a serem transmitidas são convertidas para *bytes* de forma a apenas utilizarem o número mínimo de *bytes* possível. Neste sentido, é possível diminuir drasticamente o número de *bytes* a serem transmitidos garantido assim um menor tempo perdido na comunicação.

– Envio da mensagem

Na tentativa de garantir um bom envio e recessão das mensagens enviadas, foram adicionados 4 *bytes*, 1 *start byte* e 3 *end bytes*. Com estes *bytes* é possível verificar o início de uma transmissão de dados como também o fim da trama de dados, possibilitando assim, o envio de mensagens de diferentes tamanhos caso necessários. Relativamente ao uso de 3 *end bytes*, isto é algo necessário pois é altamente provável que um dos *bytes* de informação a serem enviados contenha o *end byte*, mas recorrendo ao uso de 3 *bytes* de *end* este problema é relativamente bem mitigado, não ocorrendo assim este problema.

Para além disto, ainda foi adicionada uma verificação para garantir que os dados enviados são exatamente os mesmos dos que foram enviados através do envio de um *Cyclic Redundancy Check* (CRC) que através da mensagem a ser enviada formula um código de verificação a ser confirmado na receção da mensagem.

– Trama a ser enviada com a informação dos carros para o módulo agregador

Através da observação da tabela 5.8 pode-se verificar que o tamanho total da mensagem a ser enviada pelo módulo de aquisição tem um tamanho de 34 *bytes* e por cada *byte* enviado são transmitidos 10 *bits* devido ao *start* e *end bits*. Com isto pode-se afirmar que, com uma *baudrate* de 2 *Mbit/s*, o tempo que demora na transmissão desses dados é o que se encontra fornecido pela equação 5.12.

Tabela 5.8 – Pacote de dados utilizado na comunicação com o módulo agregador

Descrição	Número de <i>bytes</i>
<i>Start byte</i> “\2”	1
ID do <i>Slave</i> relativamente ao Módulo Agregador	1
Valor máximo atingido pelo eixo de aceleração X	2
Valor máximo atingido pelo eixo de aceleração Y	2
Valor máximo atingido pelo eixo de aceleração Z	2
Temperatura atual	1
Humidade atual	1
Peso 1	2
Peso 2	2
Tensão máxima do gerador 1	2
Corrente máxima do gerador 1	2
Tensão máxima do gerador 2	2
Corrente máxima do gerador 2	2
Potência gerada do gerador 1	2
Potência gerada do gerador 2	2
Energia gerada do gerador 1	2
Energia gerada do gerador 2	2
End <i>bytes</i> “\r\n3”	3
CRC	1

$$t = \frac{\text{bits}}{\text{baudrate}} \quad (5.12)$$

5.2.1.3 Envio da mensagem para o programa de monitorização

O envio da mensagem para o módulo de monitorização é realizado através da interface USB. Neste sentido, como se trata de um envio de dados em tempo real este irá enviar dados sempre que sejam atualizados, ou seja, no fim de cada ciclo de leituras. Para tal, é necessário que o envio seja feito de forma rápida para não influenciar demasiado o normal funcionamento do módulo.

Tabela 5.9 - Pacote de dados utilizado na comunicação com o programa de monitorização

Descrição	Número de bytes
ID do <i>Slave</i> relativamente ao Módulo Agregador	1
Valor atual do eixo de aceleração X	2
Valor atual do eixo de aceleração Y	2
Valor atual do eixo de aceleração Z	2
Temperatura atual	1
Humidade atual	1
Valor atual do peso 1	2
Valor atual do peso 2	2
Tensão atual do gerador 1	2
Corrente atual do gerador 1	2
Tensão atual do gerador 2	2
Corrente atual do gerador 2	2
Potência atual gerada do gerador 1	2
Potência atual gerada do gerador 2	2
Energia atual gerada do gerador 1	2
Energia atual gerada do gerador 2	2
End <i>byte</i> “\r\n”	2

Através da observação da tabela 5.9, que contém a informação relativa ao pacote de mensagens utilizado na comunicação com o programa de monitorização, pode-se verificar que o tamanho total da mensagem a ser enviada pelo módulo de aquisição tem um tamanho de 31 *bytes*. Com isto pode-se afirmar que, com uma *baudrate* de 2 *Mbit/s*, o tempo que demora na transmissão desses quantidade de dados é o que se encontra fornecido pela equação 5.13.

$$t = \frac{\text{bits}}{\text{baudrate}} \quad (5.13)$$

Com isto, pode-se verificar que com o uso de uma *baudrate* elevada o tempo consumido nas comunicações é relativamente pouco o que, apesar de influenciar na performance do aparelho, é possível ser utilizado na realização de testes.

5.2.2 Algoritmo do módulo agregador

Cada um dos módulos agregadores terá então de realizar o controlo do envio das mensagens do conjunto de módulos de aquisição relativos ao mesmo e processar essas mensagens de forma a gerar um relatório de erros e energia gerada relativamente à passagem de cada veículo pelo conjunto de módulos para serem posteriormente enviados para o módulo universal.

Inicialmente, o módulo irá encontrar-se em modo de poupança de energia enquanto espera pela ativação do acelerómetro pela passagem de um carro pelo sistema mecânico. De seguida, o módulo irá acordar e irá realizar o pedido de mensagem a cada um dos módulos de aquisição presentes. Após ter sido recebido todas as mensagens, estas serão processadas em relatórios de erros para posteriormente serem enviadas para o módulo universal. Finalmente, para realizar o envio das mensagens guardadas para o módulo universal, este aguardará pelo envio de um pedido que será enviado pelo módulo universal para dar início ao envio de todas as mensagens armazenadas.

Neste sentido, para realizar todas as operações descritas anteriormente, foi desenvolvido um algoritmo capaz de realizar todas as operações descritas. Como pode ser visto na figura 5.38, inicialmente, este algoritmo passa por realizar todas as configurações necessárias em temporizadores, interrupções, UARTs e Gpios. De seguida, este entra em modo poupança de energia, de modo a desligar maior parte dos seus periféricos no sentido de haver uma diminuição significativa de consumo energético.

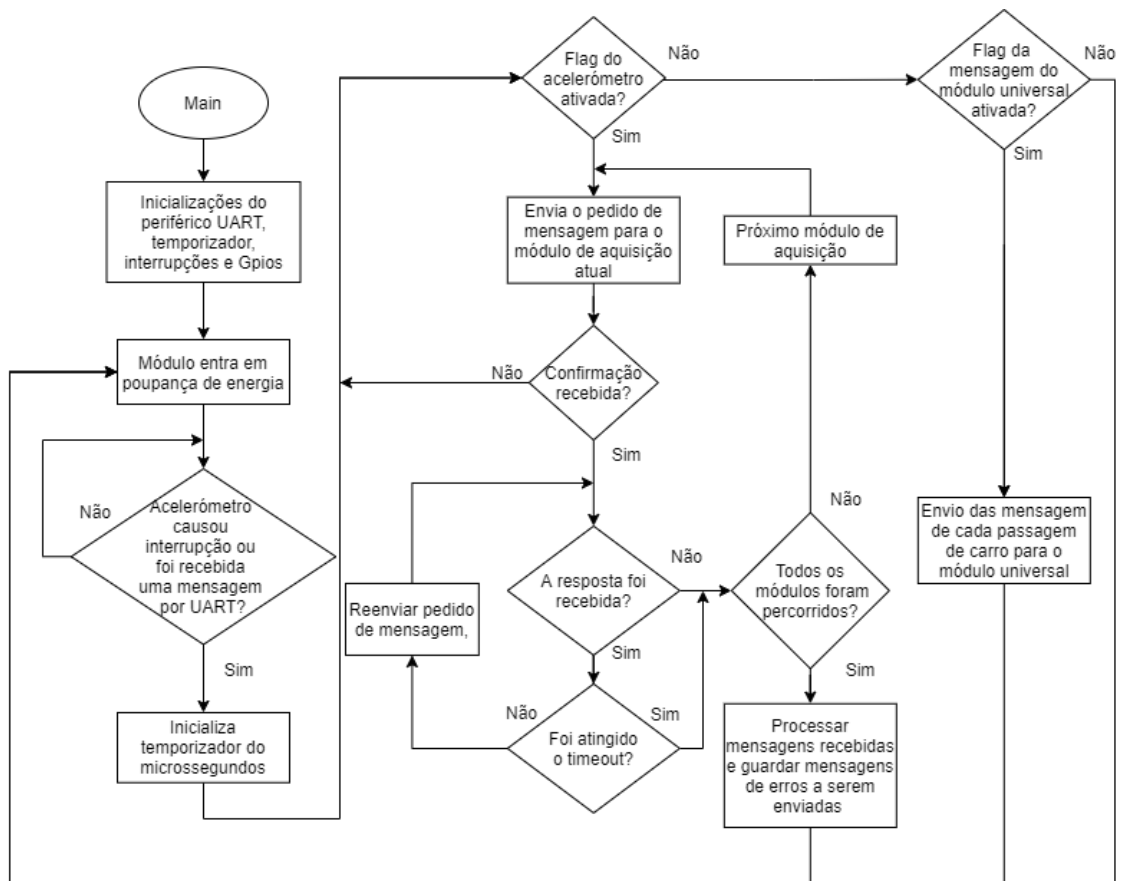


Figura 5.38 – Fluxograma relativo ao código principal do módulo de agregador

Neste instante, após um carro dar entrada no módulo mecânico, será gerada uma interrupção que irá acordar o módulo agregador ativando também o contador de microssegundos que tem como objetivo realizar uma contagem de tempo precisa desde o momento em que o carro da passagem no primeiro módulo para que posteriormente seja possível realizar a contagem de tempo entre a recepção de cada mensagem.

A partir deste momento, o módulo agregador irá começar a enviar os pedidos de mensagem até receber uma confirmação da recessão deste pedido. De seguida, caso seja recebida a mensagem será iniciado o pedido de mensagem para o próximo módulo de aquisição. No entanto, no caso de a mensagem nunca ser recebida, um *timeout* irá saltar o pedido do módulo atual e será pedido a mensagem ao módulo seguinte até que seja realizado o pedido a todos os módulos duas vezes.

Na figura 5.39 é possível visualizar o fluxograma relativo à interrupção da interface UART 1 relativa à recepção da mensagem enviada pelos módulos de aquisição. Esta interrupção irá aguardar pela recepção do *start byte* para começar a guardar os pacotes de

dados. Todos os pacotes recebidos serão guardados até que os *end bytes* sejam recebidos dando assim fim à recepção da mensagem. Por fim, é também recebido um código crc para verificar se os pacotes recebidos conferem com a mensagem enviada.

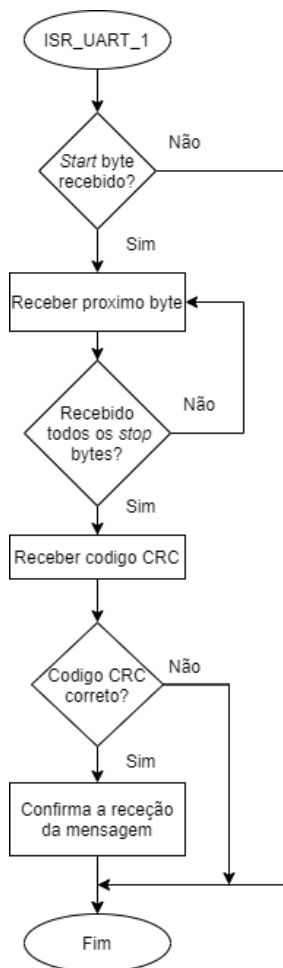


Figura 5.39 – Algoritmo da interrupção UART 1 do módulo agregador

Após isto, quando já tiverem sido processadas várias mensagens relativas à passagem de cada veículo pelo módulo mecânico, caso seja recebido um pedido de mensagem por UART serão enviadas todas as mensagens acumuladas para o módulo universal.

O fluxograma relativo à interrupção gerada pela recepção do pedido de envio das mensagens pode ser visualizado na figura 5.40. Este fluxograma realiza a recepção de três *bytes* verificando se o primeiro e último são *bytes* de *start* e *end*. Neste caso, se o segundo *byte* recebido for o ID do módulo agregador então este pode realizar o envio das mensagens acumuladas.

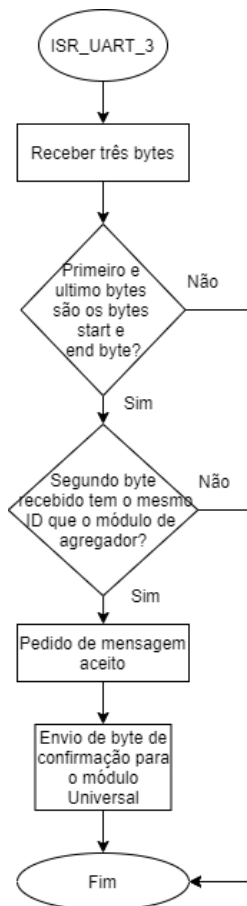


Figura 5.40 – Algoritmo da interrupção UART 3 do módulo agregador

Por fim, o processo de pedido de mensagem ao módulo de aquisição será repetido sempre que seja ativado a interrupção do acelerómetro e o envio das mensagens processadas para o módulo universal será repetido sempre que for recebido um pedido de envio. Todos os algoritmos apresentados e utilizados no decorrer do programa serão posteriormente explicados em maior detalhe.

5.2.2.1 Configurações do módulo agregador

Numa fase inicial da realização do *firmware* relativo ao módulo agregador, primeiramente, foram realizadas as inicializações da frequência de funcionamento, Gpios, UART, interrupções e temporizadores.

– Frequência de funcionamento

A frequência de funcionamento utilizada no módulo agregador foi a frequência máxima de 80 MHz, como pode ser observado pela figura 5.41, pois este módulo necessita de

– Temporizador

Foi configurado também um temporizador que tem como objetivo realizar a contagem de tempo em microssegundos de maneira a ser possível realizar a contagem do tempo entre a chegada de cada mensagem ao módulo agregador. Como realizar a contagem de microssegundos é algo que sobrecarrega o microcontrolador, foi então pensado em realizar a contagem do tempo através do incremento do registo contador em todos os microssegundos. Sendo assim, para realização deste temporizador, foi utilizado o TIM1 escolhendo os parâmetros de contador no modo crescente. Sabendo que o microcontrolador tem uma frequência de funcionamento de 80 MHz, se for utilizado um *prescaler* (PSC) de 79, isto significa que, efetivamente, a frequência do TIM1 é de 1 MHz. Neste sentido, a cada 1 microssegundo será incrementado o registo contador interno. Por fim, apenas é necessário escolher qual o valor a ser utilizado no *counter period*, sabendo este registo apenas pode conter valores de até 16 *bits* o máximo possível seria de 65536, neste caso, foi o escolhido o valor de 59999 pois equivale a 60 ms. Na equação 5.14 é possível verificar que para um temporizador de 60 ms com um PSC de 79, o *Period* é efetivamente 59999.

$$T = \frac{(PSC + 1)(Period + 1)}{Clock} \quad (5.14)$$

As configurações calculadas e utilizadas podem ser visualizadas na tabela de configurações do TIM1 apresentadas na figura 5.44.

Counter Settings	
Prescaler (PS...)	79
Counter Mode	Up
Counter Perio...	59999
Internal Clock ...	No Division
auto-reload pr...	Disable

Figura 5.44 – Configurações do TIM1

5.2.2.2 Processamento das mensagens recebidas pelo módulo de aquisição

Após terem sido recebidos todos os dados enviados por cada um dos módulos de aquisição relativamente à passagem de cada veículo, essas mensagens são processadas e tratadas de forma a ser formada apenas uma mensagem de erro e estatísticas do carro que

deu passagem pelo sistema. Desta forma, para realizar a conversão dos dados recebidos de forma a ser possível realizar um relatório de erros e estatísticas foi pensado na elaboração do conjunto de pacotes de dados apresentados na tabela 5.10 que consiste num pacote de dados de 18 *bytes*.

Tabela 5.10 – Descrição do formato da mensagem formulada

Descrição	Número de <i>bytes</i>
ID do módulo agregador	1
Tipo de envio	1
Erros relativos ao módulo de aquisição 1	1
Erros relativos ao módulo de aquisição 2	1
Erros relativos ao módulo de aquisição 3	1
Erros relativos ao módulo de aquisição 4	1
Erros relativos ao módulo de aquisição 5	1
Erros relativos ao módulo de aquisição 6	1
Erros relativos ao módulo de aquisição 7	1
Erros relativos ao módulo de aquisição 8	1
Erros relativos ao módulo de aquisição 9	1
Erros relativos ao módulo de aquisição 10	1
Velocidade de entrada do lado esquerdo	1
Velocidade de entrada do lado direito	1
Velocidade de saída do lado esquerdo	1
Velocidade de saída do lado direito	1
Somatório da energia gerada pelos dois geradores	2

– Relatório de erros

Deste modo, para facilitar a análise do sistema mecânico em caso de erros foi pensado em ser enviado um *byte* relativo aos erros de cada um dos módulos mecânicos como pode ser visualizado na tabela 5.10. Ou seja, para tornar mais fácil o diagnóstico de erro foram então estabelecidas algumas normas de bom funcionamento do sistema:

- Caso os eixos de aceleração x, y e z ultrapassem os limites estabelecidos de normal funcionamento do protótipo mecânico será gerado um alerta;

- Leituras de temperatura ou humidade apresentam valores fora dos limites estabelecidos como normais;
- Leituras de tensão geradas pelos dois geradores apresentam desfasamentos muito elevados;
- Leitura do gerador 1 ou 2 apresenta energia gerada de 0 J.

Com este grupo de regras estabelecidas é possível então delimitar para cada *bit* de um *byte* um tipo de erro encontrado tal como pode ser analisado na tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Código de erros relativos a cada módulo de aquisição

Descrição do erro	<i>Bit</i> correspondente ao erro	Limites de valores estabelecidos
Eixos de aceleração x fora dos limites	0b00000001	X=0 g ou X>700 g
Eixos de aceleração y fora dos limites	0b00000010	Y=0 g ou Y>700 g
Eixos de aceleração z fora dos limites	0b00000100	Z=0 g ou Z>1250 g
Leitura de temperatura fora dos limites	0b00001000	T=0 °C ou T>75 °C
Leitura de humidade fora dos limites	0b00010000	H=0 % ou H>90 %
Leitura da tensão do gerador 1 muito abaixo do gerador 2	0b00100000	T1<T2
Leituras da tensão do gerador 2 abaixo do gerador 1	0b01000000	T2<T1
Gerador 1 ou 2 apresenta energia gerada de 0	0b10000000	G1=0 J ou G2 =0 J

Por fim, através do uso deste código de erros é possível apresentar todos estes num único *byte*. No caso de haver a necessidade de adicionar mais códigos de erros seria necessário o envio de mais um *byte* por cada módulo de aquisição.

– Dados estatísticos

Para os dados estatísticos a serem enviados relativos à passagem do carro pelo módulo mecânico foram escolhidas tanto as velocidades de entradas como saída do módulo para ser possível verificar a diminuição de velocidade que ocorreu na passagem do mesmo como também o total de energia gerado pelos dois geradores presentes.

Neste sentido, para realizar o cálculo da velocidade de movimento é necessário primeiramente saber a distância entre módulo que é de aproximadamente 0,35 metros.

Com isto e com o tempo entre a chegada de cada mensagem ao módulo agregador é possível determinar o tempo de passagem que o carro levou a percorrer essa distância. Por fim é apenas necessário realizar o cálculo da velocidade da passagem do carro. Este cálculo pode ser visualizado na equação 5.15.

$$V(km/h) = \frac{d(m)}{t(s)} * \frac{3600}{1000} \quad (5.15)$$

Sendo assim, a velocidade pode ser calculada através da divisão entre a distância entre o centro de cada módulo e a o tempo entre a recepção das mensagens pelo módulo agregador.

5.2.2.3 Envio das mensagens processadas para módulo universal

Após ser recebido o pedido de mensagem pelo módulo universal, será enviada uma mensagem a confirmar a recepção do pedido. De seguida, será inicializado o procedimento de envio de todas as mensagens processadas até ao momento.

Para tal, é inicializada a comunicação com o módulo universal enviando o *start byte* sendo enviado de seguida o número de mensagens processadas a serem enviadas. Posteriormente, é realizado o envio de todas as mensagens processadas sequencialmente. Por fim, de modo a finalizar a comunicação são enviados os *end bytes*.

Para além disto, ainda foi adicionada uma verificação para garantir que os dados enviados são exatamente os mesmos dos que foram enviados através do envio de um CRC que através da mensagem a ser enviada formula um código de verificação a ser confirmado na recepção da mensagem.

Tabela 5.12 – Pacote de dados utilizado na comunicação com o módulo universal

Descrição	Número de bytes
<i>Start byte</i> “\2”	1
Número de mensagens a ser enviadas	1
Mensagem relativa ao carro 1	18
CRC mensagem 1	1
Mensagem relativa ao carro n	18
CRC mensagem n	1
<i>End byte</i> “\r\n\3”	3

Através da tabela 5.12 é possível verificar que o número de *bytes* enviados nesta comunicação é relativo ao número de mensagens a ser transmitida. Neste sentido, através da equação 5.16 é possível calcular o tempo necessário para a execução do envio da mensagem relativo ao número de mensagens a ser enviadas.

$$bits = (19n + 5) * 10$$

$$t = \frac{bits}{baudrate} \quad (5.16)$$

5.2.3 Algoritmo do módulo universal

O módulo universal tem como objetivo realizar o controlo da comunicação com os módulos agregadores de modo a realizar a receção da informação relativa à passagem de cada carro em diferentes módulos agregadores. Ou seja, este módulo irá receber mensagens de diversos módulos agregadores posicionados em diferentes zonas.

Inicialmente, o módulo irá encontrar-se em modo de poupança de energia enquanto espera pela ativação da interrupção causada pelo temporizador que sinaliza que pode realizar o envio de um novo pedido para os módulos agregadores. De seguida, o módulo irá acordar e irá realizar o pedido de mensagem a cada um dos módulos agregadores presentes. Após ter sido recebido todas as mensagens, estas serão processadas e convertidas novamente para variáveis de modo a ser possível seleccionar a informação necessária a ser enviada para a base de dados posteriormente.

Neste sentido, para realizar todas as operações anteriormente explicadas, foi desenvolvido um algoritmo capaz de realizar todas as operações descritas. Como pode ser visto no fluxograma da figura 5.45, inicialmente, este algoritmo passa por realizar todas as configurações necessárias em temporizadores, interrupções, UARTs e GPIOs. De seguida, este entra em modo poupança de energia, de modo a desligar maior parte dos seus periféricos no sentido de haver uma diminuição significativa de consumo energético.

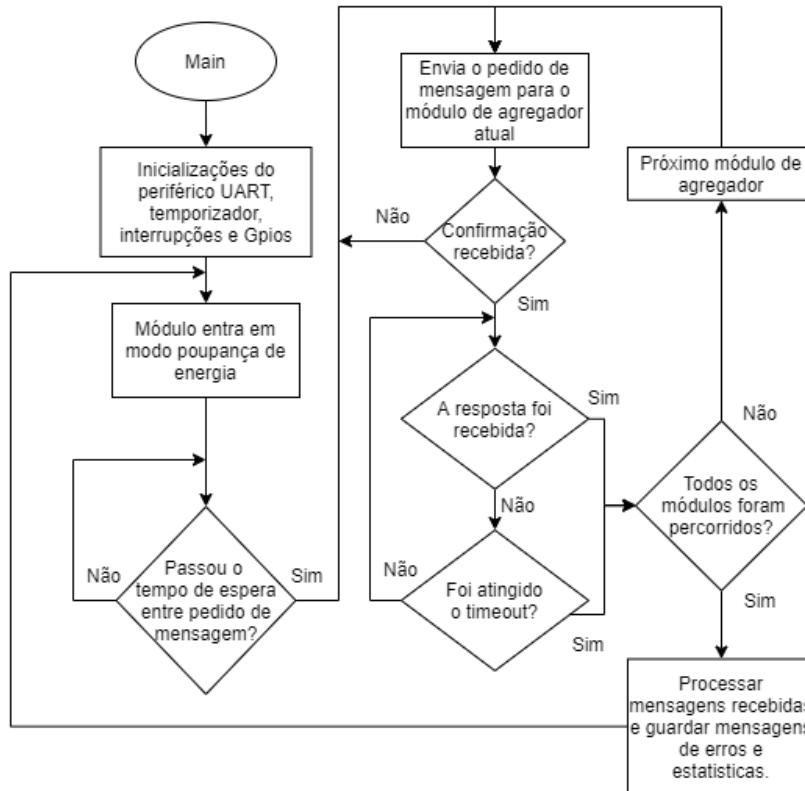


Figura 5.45 – Fluxograma do código principal do módulo universal

Neste sentido, o módulo ficará em módulo de poupança de energia até que uma interrupção seja gerada por parte do temporizador interno de 10 segundos configurado anteriormente como pode ser visualizado no fluxograma da figura 5.46.

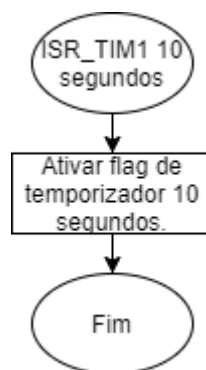


Figura 5.46 – Fluxograma da interrupção do temporizador de 10 segundos

Após o módulo acordar, este irá realizar o envio de pedidos de mensagem até que seja recebido uma confirmação por parte do módulo agregador que foi endereçado. De seguida, caso tenha sido recebida a mensagem enviada por parte do módulo agregador, será iniciado o pedido para o próximo módulo. No entanto, caso a mensagem nunca seja

recebida, existe um *timeout* que, caso seja atingido, irá saltar o pedido de mensagem para o módulo seguinte. Este procedimento repete-se até que tenham sido endereçados todos os módulos agregadores.

Na figura 5.47 é possível visualizar o fluxograma relativo à interrupção da interface UART 1 da recessão da mensagem enviada pelos módulos agregadores. Esta interrupção irá aguardar pela receção do *start byte* para começar a guardar os pacotes de dados. De seguida, será recebido um *byte* relativo ao número de mensagens que serão enviadas pelo módulo agregador. Por fim, serão recebidas todas as mensagens que estão separadas pelos *end bytes* estipulados.

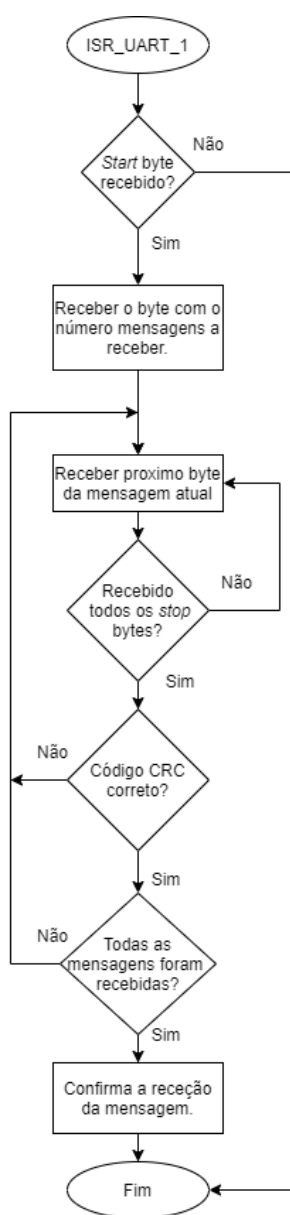


Figura 5.47 – Fluxograma da interrupção da interface UART 1 do módulo universal

5.2.3.1 Configurações do módulo universal

Numa fase inicial da realização do *firmware* relativo ao módulo universal, primeiramente, foram realizadas as inicializações da frequência de funcionamento, Gpios, UART, interrupções e temporizadores.

– Frequência de funcionamento

A frequência de funcionamento utilizada no módulo agregador foi a frequência máxima do microcontrolador de 80 MHz, como pode ser observado pela figura 5.48, pois este módulo necessita de uma frequência elevada para ser possível utilizar os periféricos de UART a 2 *Mbit/s* e realizar as suas operações o mais rápido possível.

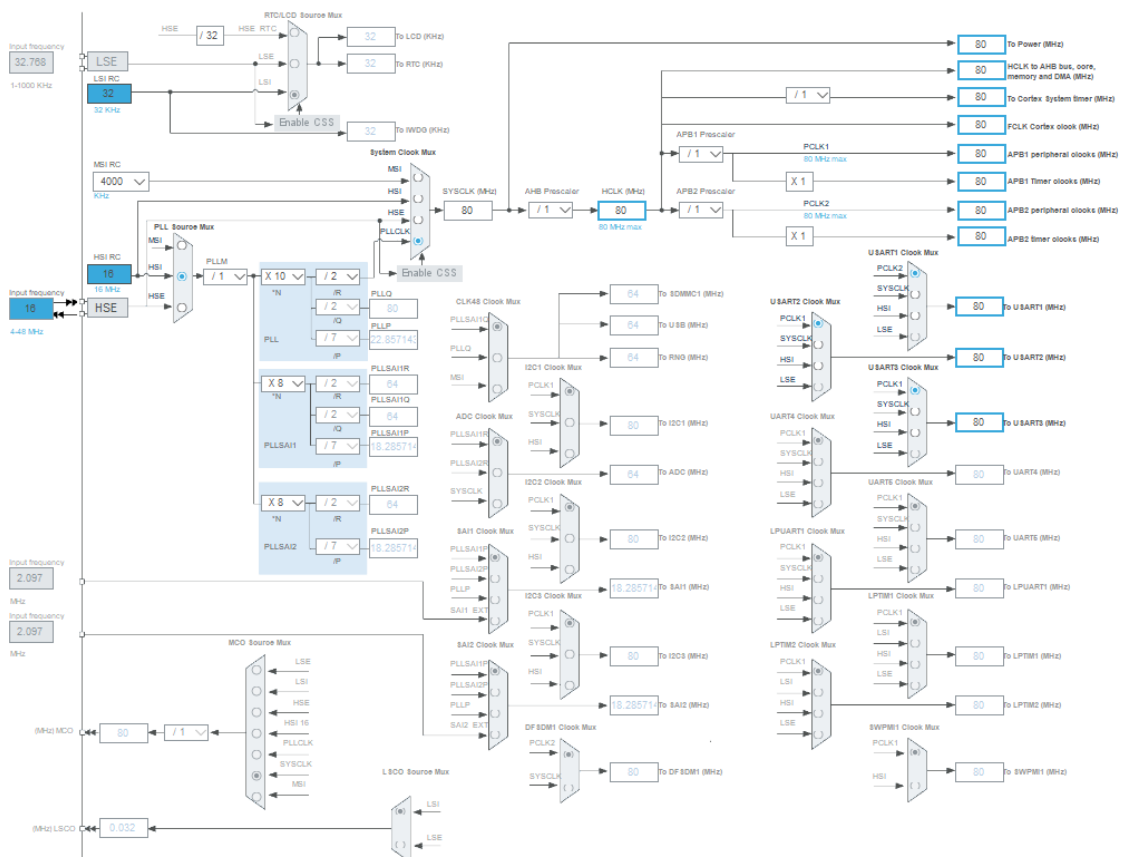


Figura 5.48 – Configuração da frequência de funcionamento utilizada no módulo universal

mensagens através de RS485 com o menor tempo de espera possível e mantendo a estabilidade de comunicação.

Desta forma, as configurações escolhidas para o funcionamento da interface UART 1 podem ser visualizados na figura 5.50.

▼ Basic Parameters	
Baud Rate	2000000 Bits/s
Word Length	8 Bits (including Parity)
Parity	None
Stop Bits	1
▼ Advanced Parameters	
Data Direction	Receive and Transmit
Over Sampling	16 Samples
Single Sample	Disable
ClockPrescaler	1

Figura 5.50 - Configurações de UART 1 do módulo universal

– Temporizador

Foi configurado também um temporizador que tem como objetivo acordar o módulo quando se encontra no modo de poupança de energia. Para realização a configuração deste temporizador, foi utilizado o TIM1 escolhendo os parâmetros de contador no modo crescente, *prescaler (PSC)* e *counter period* através da equação 5.17. Desta forma, tem de ser configurado um temporizador de 10 s. Para tal, será dado um valor atribuído de 15999 ao PSC e um tempo de 10 s.

$$T = \frac{(PSC + 1)(Perid + 1)}{Clock} \quad (5.17)$$

As configurações calculadas e utilizadas podem ser visualizadas na tabela de configurações do TIM1 apresentadas na figura 5.51.

Counter Settings	
Prescaler (PS...	15999
Counter Mode	Up
Counter Perio...	49999
Internal Clock...	No Division
auto-reload pr...	Disable

Figura 5.51 – Configurações do TIM1

5.2.4 *Software* de monitorização

O *software* de monitorização tem como objetivo facilitar a visualização em tempo real de toda a informação enviada por cada um dos módulos. Para que seja possível verificar o funcionamento do protótipo experimental foi desenvolvido um *software* em Python [56], que consiste numa *Graphical User Interface* (GUI) que é capaz de mostrar, em tempo real, os dados enviados e recebidos pelos módulos. Para possibilitar a comunicação entre cada um dos módulos e o Python, foi utilizado o protocolo de comunicação UART.

Inicialmente, para o módulo de aquisição foi desenvolvido um programa com o objetivo de mostrar gráficos com os valores de aceleração, temperatura, humidade, peso, tensão, corrente e energia gerada pelos geradores. No período inicial, apenas são mostrados os gráficos do acelerómetro, peso, gerador 1 e gerado 2, no entanto, através do submenu (Gráficos) é possível realizar a escolha de visualização de outros dados. Na figura 5.52 é possível visualizar a aparência do programa desenvolvido.

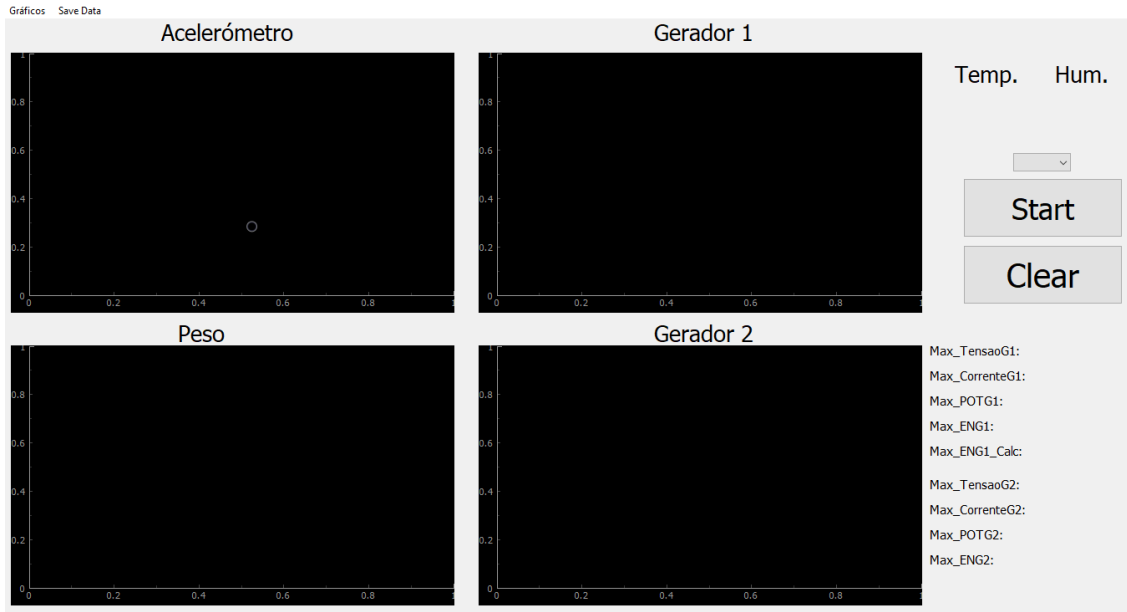


Figura 5.52 – Aparência do programa de monitorização para o módulo de aquisição

Para o módulo agregador, foi desenvolvido um programa com a capacidade de receber e mostrar todos os dados enviados por cada módulo de aquisição. A visualização dos valores recebidos pode ser realizada através de tabelas específicas para cada mensagem de cada tipo de módulo de aquisição, como pode ser visualizado pela figura 5.53.

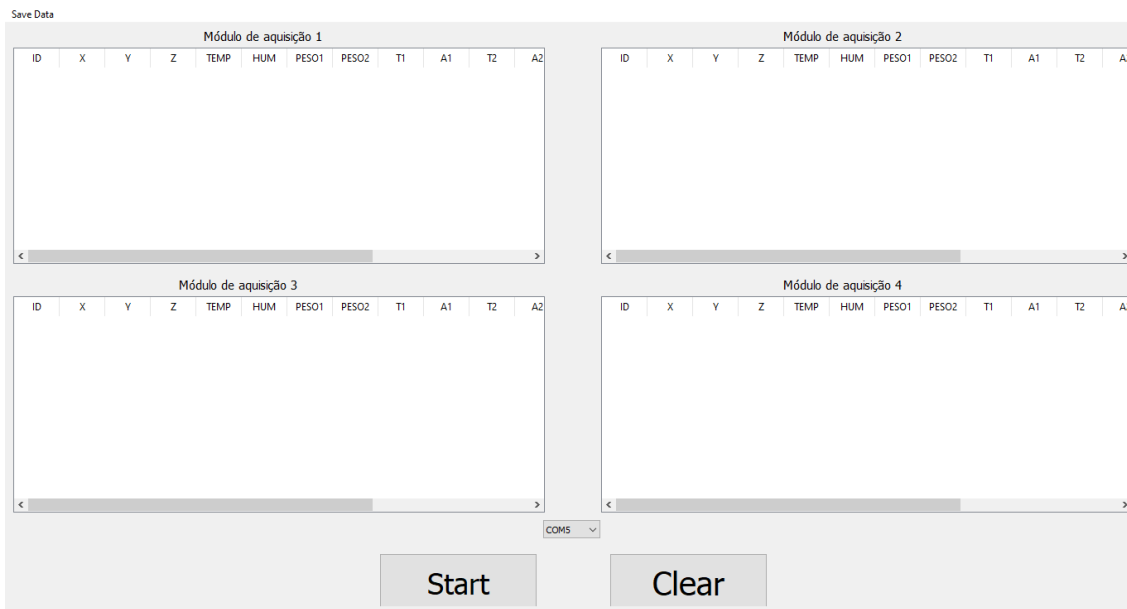


Figura 5.53 – Aparência do programa de monitorização para o módulo agregador

Por fim, foi também desenvolvido um programa para o módulo universal que tem como objetivo receber todos os dados enviados por cada um dos módulos agregadores

interligado ao módulo universal. Desta forma, é possível visualizar o número total de carros que passaram por cada módulo agregador, como também as mensagens de erros e o relatório que foi gerado, como pode ser observado pela figura 5.54.

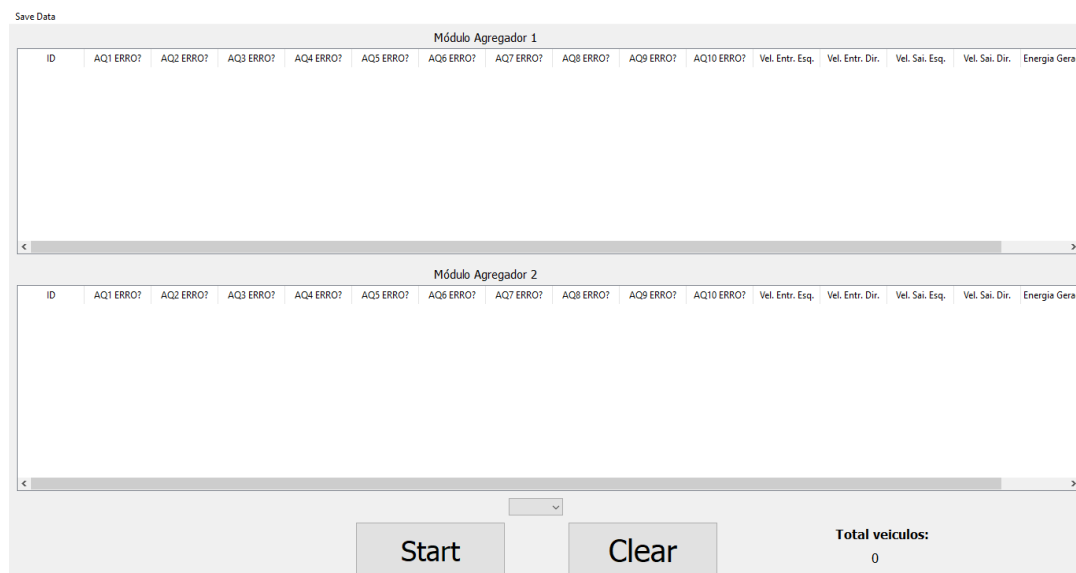


Figura 5.54 – Aparência do programa de monitorização para o módulo universal

Inicialmente, os programas desenvolvidos verificam que portas UART estão disponíveis e o utilizador realiza a escolha em qual destas quer estabelecer uma conexão. Após estabelecida a conexão com a porta, o programa irá esperar até que sejam recebidos dados que serão imediatamente guardados.

No caso do *software* de monitorização do módulo de aquisição, como a comunicação é realizada sequencialmente sem pausas a altas frequências sendo que chega a receber mais de 3000 mensagens por segundo, neste caso, a recessão das mensagens é feita até ser recebido 1000 mensagens e de seguida é feito o desenho no gráfico. Desta forma, é possível realizar um *ploting* em tempo real enquanto o módulo envia os dados.

Outra funcionalidade que estes programas possuem é a capacidade de exportar todos os dados recebidos para um ficheiro que poderá, posteriormente, ser visualizado em *Matlab* [57] de modo a realizar o tratamento de dados caso este seja desejado.

6 Resultados

No presente capítulo é feita uma apresentação e análise dos testes realizados tanto em laboratório como no terreno retirando algumas conclusões.

6.1 Testes em laboratório

Após a finalização do desenvolvimento de todos módulos e *softwares* de monitorização, é necessário realizar testes de modo a ser possível verificar o bom funcionamento de todos os módulos e sensores através do uso dos *softwares* de monitorização.

Para ser possível a realização dos testes em laboratório e no terreno e verificar o bom do funcionamento dos módulos desenvolvidos, é necessário realizar a instalação de todos os sensores e módulo de aquisição no módulo mecânico como pode ser visualizado na figura 6.1.



Figura 6.1 – Sensores instalados no módulo mecânico

Após a instalação dos sensores e módulo de aquisição nos módulos mecânicos é possível realizar os testes necessários com os protótipos dispostos sequencialmente começando no módulo 1 na parte esquerda inferior, módulo 2 na parte direita inferior e assim consecutivamente como pode ser visualizado na figura 6.2

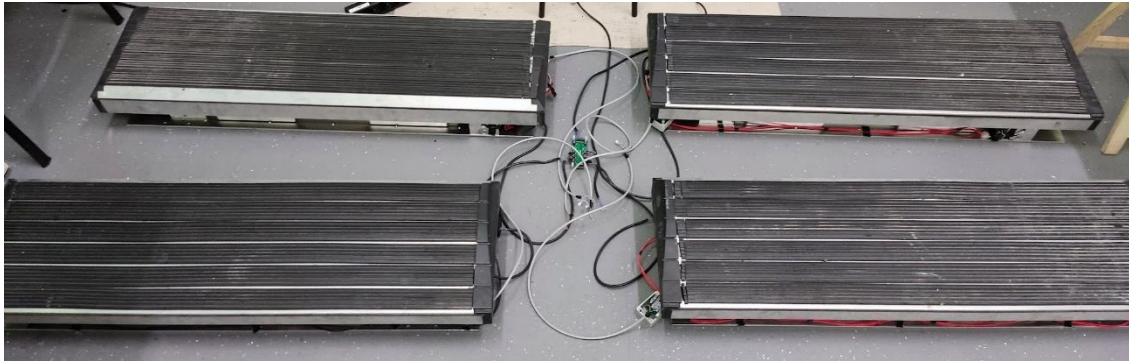


Figura 6.2 – Módulos dispostos em laboratório para testes

Com isto, foram realizados testes em laboratório com os módulos de aquisição já implementados no módulo mecânico de modo a ser possível realizar simulações da passagem de carros através da realização de saltos nestes.

6.1.1 Módulo de aquisição

Nos testes do módulo de aquisição foram realizados com a ajuda do *software* de monitorização do módulo de aquisição desenvolvido. Com este *software* é possível monitorizar a leitura de todos os sensores e verificar se estes estão a ser lidos corretamente. Devido ao facto de ser impossível o acesso às portas de comunicação USB dos módulos de aquisição, depois de fechado o protótipo mecânico, apenas é possível a realização de testes em laboratório deste módulo.

Para tal, foram realizados vários saltos num dos protótipos mecânicos para verificar o bom funcionamento deste. Depois de realizados dois saltos foi possível analisar que o protótipo funcionava de forma desejada. Através do programa de monitorização representado nas figuras 6.3 e 6.4 foi possível verificar o bom funcionamento do módulo de aquisição.

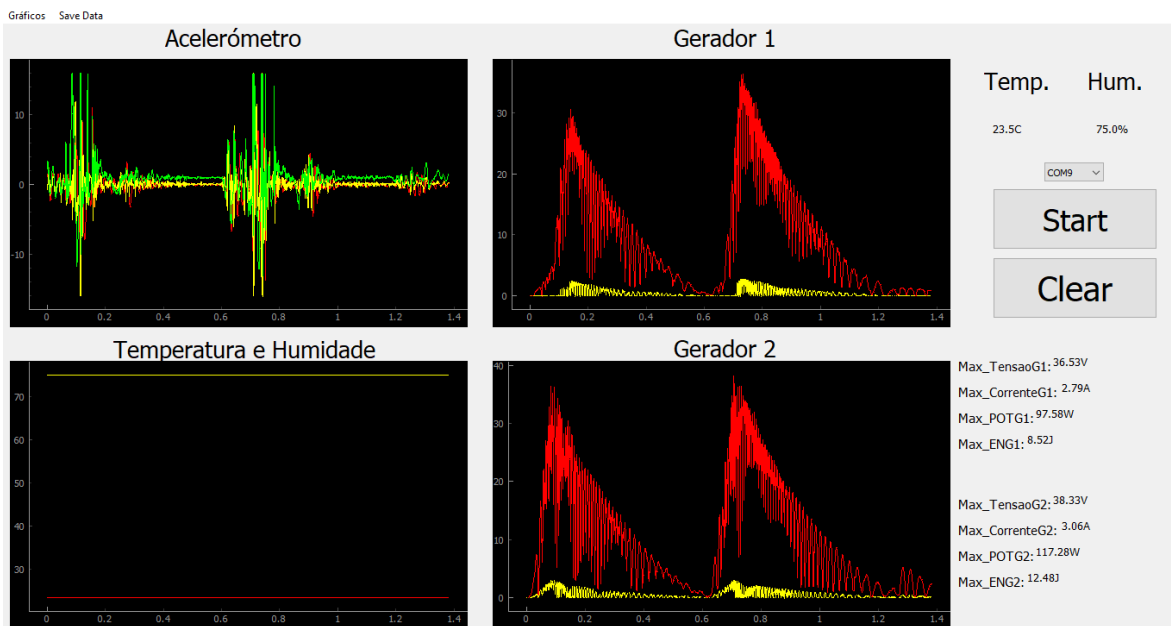


Figura 6.3 – Conjunto de gráficos 1 do programa de monitorização

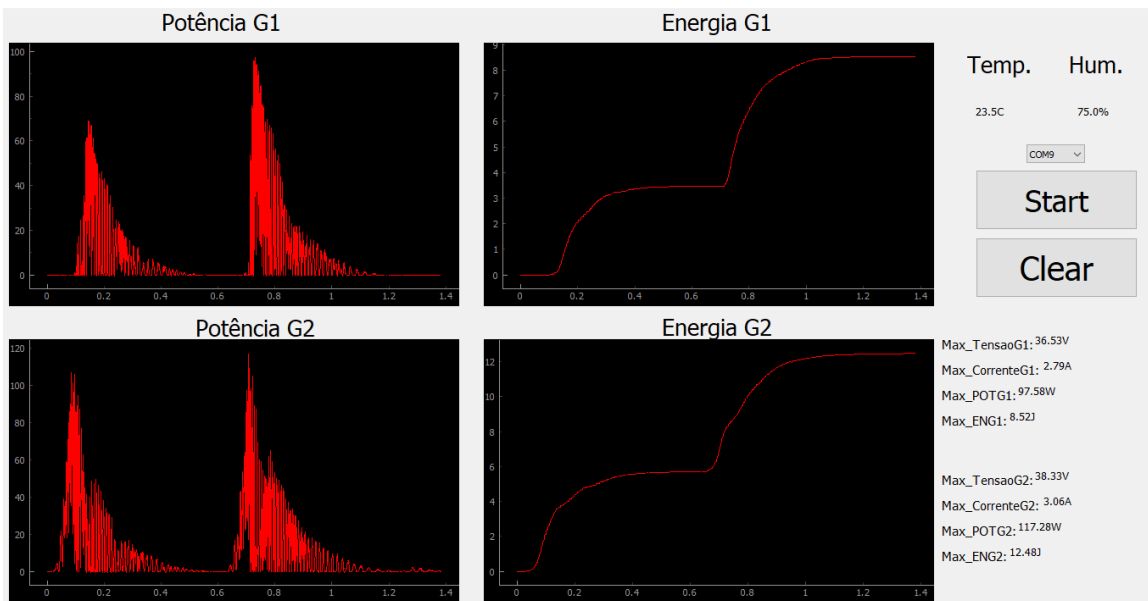


Figura 6.4 – Conjunto de gráficos 2 do programa de monitorização

Para além disto, através da exportação dos dados recebidos, é possível ser feita uma análise, mais pormenorizada dos gráficos de acelerações, tensão, corrente, potência e energia gerada por cada gerador através do MATLAB demonstrados de seguida.

Na figura 6.5 é possível visualizar os valores de aceleração atingidos por cada eixo da tampa do módulo mecânico em relação à velocidade gravítica. Neste sentido, é possível observar que, devido ao impacto que a tampa leva ao chegar ao fim de curso e a regressar à posição original de curso, apresenta um choque elevado o que causa que estes valores cheguem sempre a atingir o máximo possível de 16 gravidades.

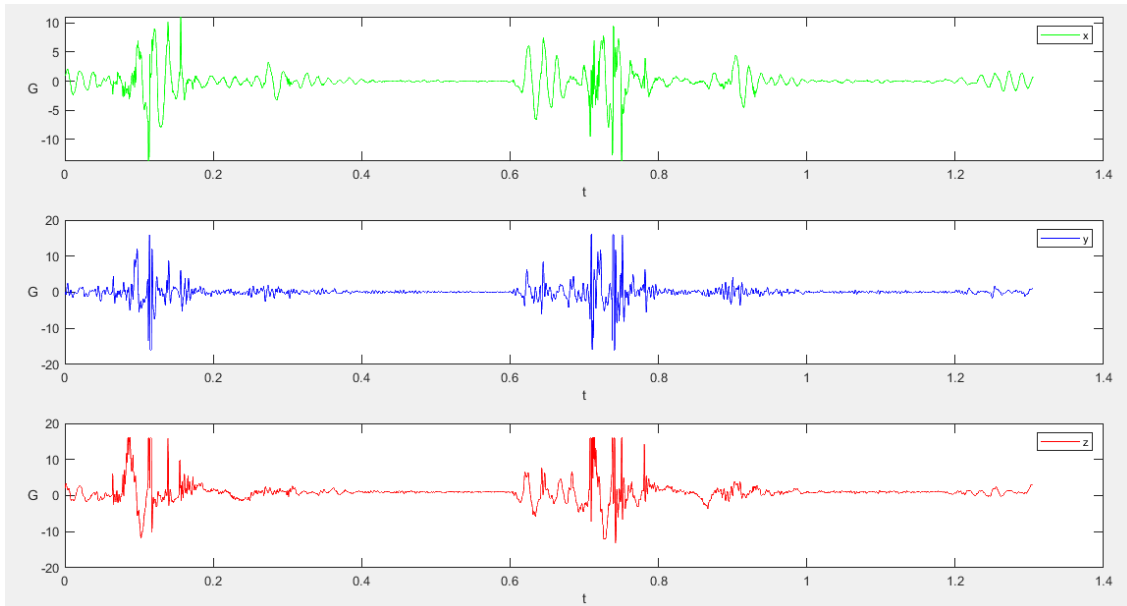


Figura 6.5 – Gráficos de acelerações aplicadas no módulo mecânico

Na figura 6.6 pode-se observar os gráficos de tensão e corrente gerados por cada um dos geradores instalados no módulo mecânico. É ainda de salientar que a carga utilizada durante este teste é uma carga resistiva de 11Ω . Com isto, é possível analisar que os valores de corrente e tensão lidos durante os saltos estão dentro do expectável.

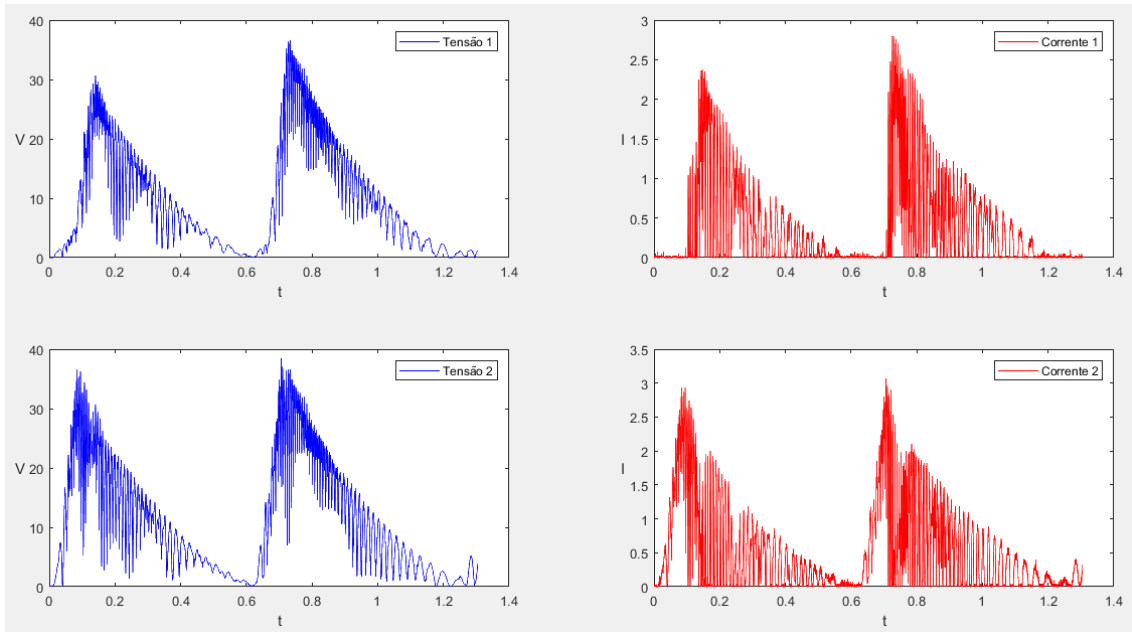


Figura 6.6 – Gráfico de tensão e correntes dos dois geradores

Nas figuras 6.7 e 6.8 é possível observar os gráficos relativos à potência e energia geradas por cada um dos geradores. Nestes gráficos é de notar que ambos os geradores realizaram a conversão de energia de forma esperada tendo sido possível gerar desde 8,5 J a 12 J de energia por gerador na passagem de um carro ou seja 4,25 J a 6 J por roda. Este valor foi possível ser atingido pois a tampa do módulo mecânico realizou todo o movimento de descida o que pode não ser possível na passagem de carros a velocidades elevadas.

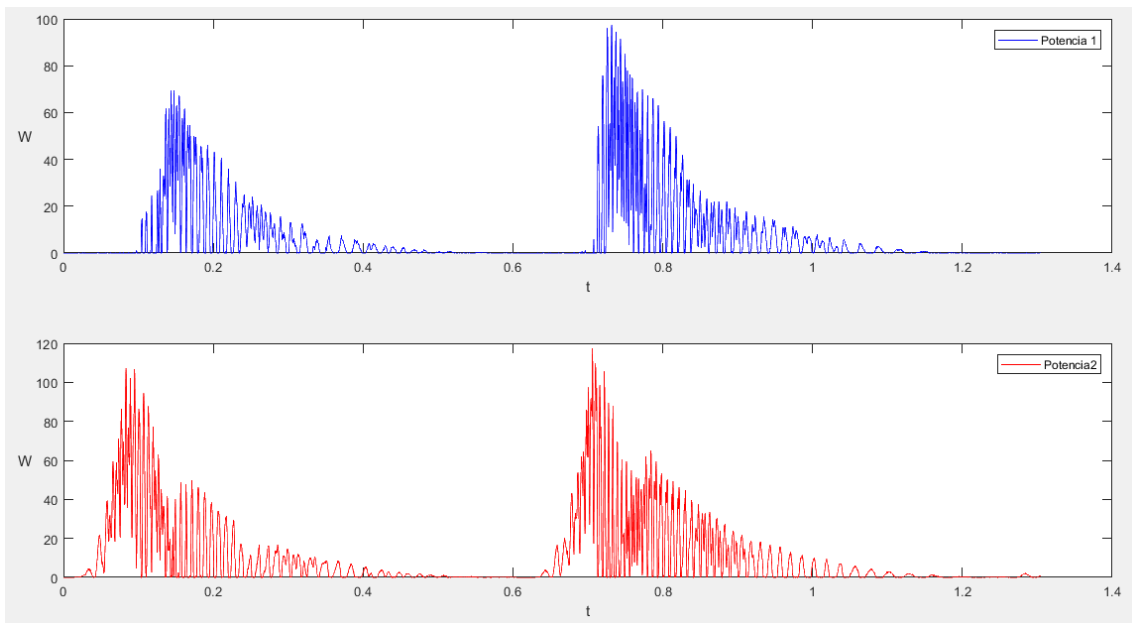


Figura 6.7 – Gráficos de potência dos geradores

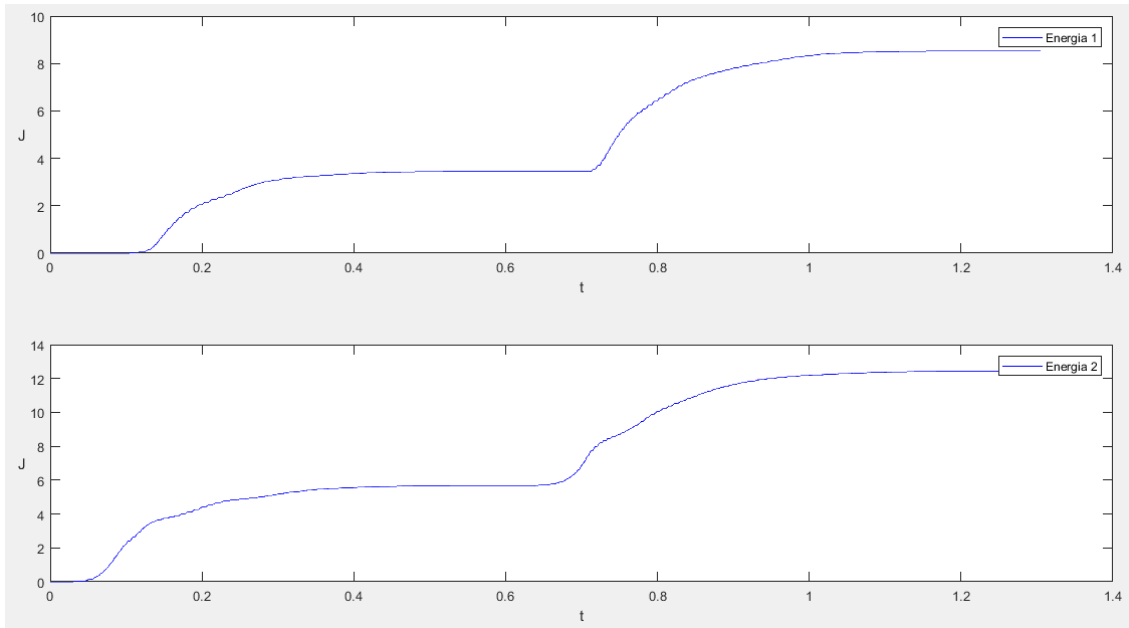


Figura 6.8 – Gráfico de energia gerada pelos geradores

6.1.2 Módulo agregador

Para verificar o funcionamento do módulo agregador será utilizado o segundo *software* desenvolvido capaz de mostrar todas as mensagens recebidas pelo módulo agregador numa tabela. Para isto, foram realizados 8 saltos em cada um dos módulos de forma a simular a passagem de 2 carros pelo sistema mecânico.

Com isto, através da figura 6.9 é possível verificar que foram recebidas as mensagens relativas a cada salto que corresponde a um módulo de aquisição específico.

Save Data

Módulo de aquisição 1													
X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2	
1	7.9 g	8.01 g	15.96 g	23.0 °C	75.5 %	37.99 V	3.00A	37.59 V	2.85 A	117.38 W	107.13 W	6.12 J	5.76 J
2	10.44 g	8.34 g	15.87 g	23.5 °C	75.0 %	38.06 V	3.15A	37.42 V	2.82 A	119.89 W	105.52 W	6.22 J	5.69 J
3	5.35 g	4.57 g	12.24 g	23.5 °C	75.5 %	37.82 V	3.03 A	38.24 V	3.20 A	114.59 W	122.36 W	6.13 J	6.32 J
4	7.32 g	9.71 g	15.96 g	23.0 °C	75.5 %	37.71 V	2.89 A	37.62 V	2.86 A	108.98 W	107.59 W	5.88 J	5.79 J

Módulo de aquisição 2													
X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2	
1	7.7 g	7.71 g	15.76 g	21.5 °C	72.0 %	37.35 V	3.10 A	37.66	2.91 A	115.78 W	109.59 W	6.05 J	5.89 J
2	10.24 g	8.04 g	15.45 g	21.5 °C	72.5 %	37.60 V	2.98 A	38.12	3.17 A	112.05 W	120.84 W	5.98 J	6.32 J
3	5.15 g	4.27 g	12.04 g	22.0 °C	72.0 %	38.10 V	3.16 A	37.59	2.83 A	120.39 W	106.38 W	6.26 J	5.72 J
4	7.12 g	9.41 g	15.66 g	22.0 °C	72.5 %	37.51 V	2.83	37.81	2.93 A	106.15 W	110.78 W	5.69 J	6.11 J

Módulo de aquisição 3													
X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2	
1	7.5 g	7.41 g	15.56 g	21.0 °C	74.0 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J
2	10.04 g	7.74 g	15.67 g	21.5 °C	74.5 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J
3	4.95 g	3.34 g	11.84 g	21.5 °C	74.5 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J
4	6.92 g	9.11 g	15.30 g	21.0 °C	74.5 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J

Módulo de aquisição 4													
X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2	
1	7.3 g	7.11 g	15.36 g	22.0 °C	74.0 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J
2	9.84 g	7.44 g	15.55 g	22.5 °C	74.0 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J
3	4.74 g	3.67 g	14.64 g	22.5 °C	74.0 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J
4	6.72 g	8.81 g	15.15	22.0 °C	74.0 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J

Figura 6.9 – Tabela das mensagens do programa de monitorização do Módulo Agregador

6.1.3 Módulo universal

Nos testes de laboratório do módulo universal, de modo a verificar o bom funcionamento deste, foram realizados saltos a simular a passagem de 4 carros pelo sistema mecânico. Desta forma, é possível analisar pelas tabelas seguintes que todas as mensagens relativas aos saltos foram recebidas.

Como pode ser visto pela figura 6.10, foram realizados 4 saltos a simular a passagem de 4 carros pelo protótipo mecânico, através disto é possível verificar que a comunicação entre módulos foi estabelecida de forma correta enviando a mensagem de erros, velocidades e energia geradas para o programa de monitorização. Nesta imagem ainda é possível denotar que todos os módulos de aquisição apresentam erros sendo estes relativos aos erros de aceleração causada pelo impacto da tampa mecânica em movimento excedendo o limite estipulado anteriormente. Em relação às velocidades de entrada e saída estas não podem ser realmente testadas em laboratório devido ao pouco sincronismo entre saltos nos protótipos podendo apenas ser testado no terreno. Com isto, ainda tem-se a energia total gerada que é o somatório da energia dos módulos 1 e 2 que ronda aproximadamente os 39 J e 42 J.

Save Data

Módulo Agregador 1															
ID	AQ1 ERRO?	AQ2 ERRO?	AQ3 ERRO?	AQ4 ERRO?	AQ5 ERRO?	AQ6 ERRO?	AQ7 ERRO?	AQ8 ERRO?	AQ9 ERRO?	AQ10 ERRO?	Vel. Entr. Esq.	Vel. Entr. Dir.	Vel. Sai. Esq.	Vel. Sai. Dir.	Energia Gerada
1	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	12.0 km/h	12.0 km/h	11.0 km/h	11.0 km/h	41.62 J
2	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	7.0 km/h	9.0 km/h	7.0 km/h	10.0 km/h	40.18 J
3	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	9.0 km/h	10.0 km/h	7.0 km/h	11.0 km/h	39.06 J
4	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	10.0 km/h	12.0 km/h	7.0 km/h	8.0 km/h	40.81 J

Figura 6.10 - Tabela das mensagens do programa de monitorização do Módulo Universal

Nas tabelas da figura 6.11 dos testes realizados, foram separados os módulos de aquisição 1 e 3 dos módulos 2 e 4 agrupando cada um num conjunto de módulos agregadores podendo assim realizar testes a simulador dois conjuntos de módulos agregadores com o modulo universal. Com isto, é possível observar nas tabelas que os módulos que apresentam os erros estão relacionados com os módulos instalados em cada módulo agregador. Para além disto, neste tipo de testes apenas é possível realizar o cálculo da velocidade de entrada e saída do lado corresponde em que cada conjunto de módulos se encontra instalado. Por fim, a energia gerada por cada uma das passagens de carro é

apenas relacionada ao módulo de aquisição 1 no agregador 1 e ao módulo de aquisição 2 no módulo agregador 2.

Save Data

Módulo Agregador 1															
ID	AQ1 ERRO?	AQ2 ERRO?	AQ3 ERRO?	AQ4 ERRO?	AQ5 ERRO?	AQ6 ERRO?	AQ7 ERRO?	AQ8 ERRO?	AQ9 ERRO?	AQ10 ERRO?	Vel. Entr. Esq.	Vel. Entr. Dir.	Vel. Sai. Esq.	Vel. Sai. Dir.	Energia Ge
1	1	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	9.0 km/h	0.0 km/h	10.0 km/h	0.0 km/h	20.61 J
2	1	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	8.0 km/h	0.0 km/h	5.0 km/h	0.0 km/h	20.32 J

Módulo Agregador 2															
ID	AQ1 ERRO?	AQ2 ERRO?	AQ3 ERRO?	AQ4 ERRO?	AQ5 ERRO?	AQ6 ERRO?	AQ7 ERRO?	AQ8 ERRO?	AQ9 ERRO?	AQ10 ERRO?	Vel. Entr. Esq.	Vel. Entr. Dir.	Vel. Sai. Esq.	Vel. Sai. Dir.	Energia Ge
1	2	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	0.0 km/h	7.0 km/h	0.0 km/h	10.0 km/h	20.55 J
2	2	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	0.0 km/h	8.0 km/h	0.0 km/h	5.0 km/h	20.77 J

Figura 6.11 – Tabela do Módulo Universal da recepção de mensagens de dois Módulos Agregadores

6.2 Testes no terreno

Após a verificação do funcionamento em laboratório de todos os módulos foram realizados testes reais de funcionamento dos protótipos com a passagem de carros no sistema. Para tal, a empresa possui um local de testes em que foi necessário instalar os 4 módulos mecânicos no terreno como pode ser visualizado na figura 6.12. Com isto, é possível testar o funcionamento de todos os módulos desenvolvidos com testes reais.

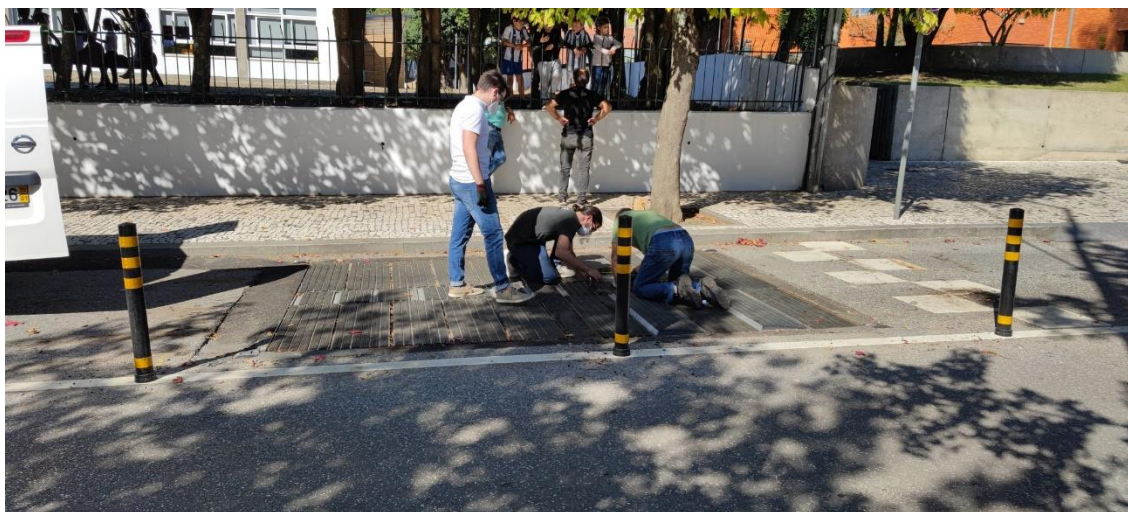


Figura 6.12 – Montagem dos protótipos mecânicos no terreno

6.2.1 Módulo de aquisição e agregador

Após a verificação do bom funcionamento dos módulos desenvolvidos em laboratório e a instalação dos módulos mecânicos no terreno, é possível realizar os testes através do uso da GUI desenvolvida em Python apresentada anteriormente, que irá demonstrar em tempo real os diferentes dados lidos pelos sensores.

Previamente a serem realizados os testes no terreno foram ainda realizados alguns testes de funcionamento ao saltar em cima do módulo mecânico já instalados de modo a verificar o seu bom funcionamento. Com isto, foi possível verificar que todos os módulos e *softwares* de monitorização estavam em bom estado.

Como já anteriormente referido, não será possível realizar observações dos gráficos gerados pelos sensores em cada módulo de aquisição devido à impossibilidade de acesso às portas de comunicação UART.

6.2.2 Passagem de carro com 1 módulo agregador e 4 de aquisição

Na fase inicial dos testes foram utilizados 4 módulos de aquisição juntamente com 1 único módulo agregador e universal. Com isto, foram realizadas passagens de carros a três velocidades diferentes, sendo estas 20, 30 e 40 km/h, para que seja possível realizar uma análise do funcionamento do protótipo a diferentes velocidades. Na figura 6.13 é possível observar os módulos mecânicos instalados no terreno.

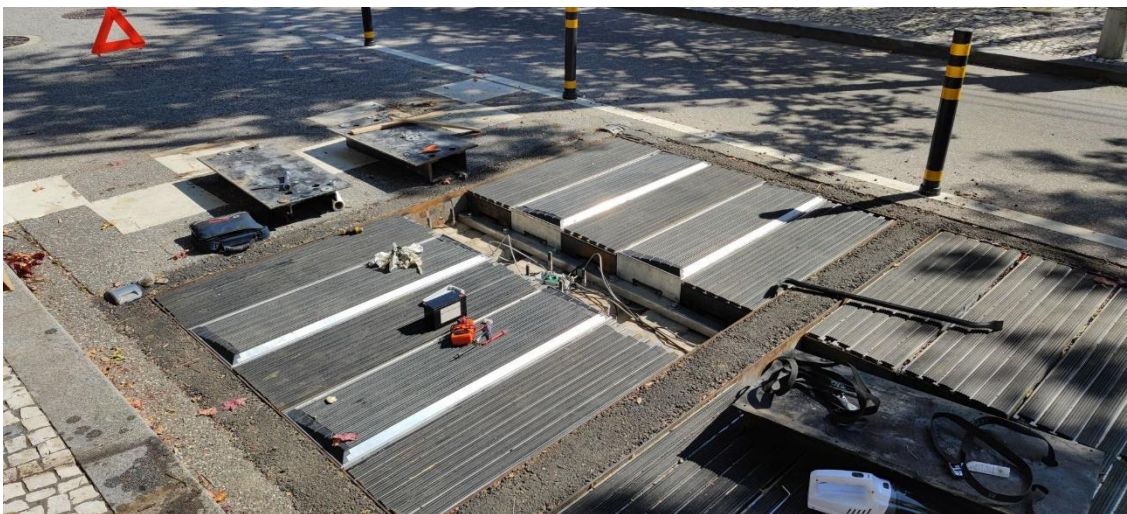


Figura 6.13 – Módulos mecânicos instalados na rua

• **Passagem de carro a 20 km/h**

Na figura 6.14 pode ser visualizado as mensagens recebidas pelo módulo de agregador na passagem de um carro a 20 km/h, é possível denotar que foram recebidas duas atuações por cada módulo o que é de esperar na passagem de um carro pelo módulo mecânico. Para além disto, é possível reparar a partir do módulo de aquisição 1 e 2, que em média a energia gerada pelos geradores está compreendida entre 5 e 6 J aproximadamente.

Save Data

Módulo de aquisição 1													
X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2	
1	41 g	6.47 g	15.82 g	22.0 °C	74.0 %	36.75 V	2.94 A	36.56 V	2.71 A	108.0 W	99.0 W	5.6 J	5.25 J
2	24 g	5.1 g	15.07 g	23.5 °C	74.5 %	36.85 V	3.02 A	36.26 V	2.69 A	111.2 W	97.5 W	5.9 J	5.12 J

Módulo de aquisição 2													
X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2	
1	6.14 g	5.92 g	15.28 g	21.5 °C	72.0 %	36.55 V	2.70 A	36.44 V	2.69 A	98.68 W	98.0 W	5.40 J	5.3 J
2	7.08 g	4.52 g	13.56 g	22.0 °C	72.0 %	36.32 V	2.69 A	36.11	2.67 A	97.7 W	96.41 W	5.1 J	5.0 J

Módulo de aquisição 3													
X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2	
1	5.9 g	5.55 g	15.86 g	21.0 °C	73.0 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J
2	6.61 g	4.02 g	15.0 g	21.0 °C	72.5 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J

Módulo de aquisição 4													
X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2	
1	5.53 g	5.2 g	15.37 g	20.5 °C	72.5 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J
2	6.49 g	3.45 g	15.53 g	21.0 °C	73.0 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J

Figura 6.14 – Mensagens recebidas pelo Módulo Agregador a 20 km/h

Na figura 6.15 pode ser visualizado as mensagens recebidas pelo módulo universal na passagem do carro a 20 km/h, esta mensagem contém erros associados aos acelerómetros no caso dos 4 módulos dispostos e erros energéticos no caso do módulo de aquisição 3 e 4 pois estes não possuem sensores para a leitura de tensão ou corrente. Para além disto, ainda é possível visualizar a velocidade de entrada e saída a que o carro passou pelo sistema. Por fim, é possível visualizar a energia total gerada pela passagem do carro que é de 42,67 J.

Save Data

Módulo Agregador 1															
ID	AQ1 ERRO?	AQ2 ERRO?	AQ3 ERRO?	AQ4 ERRO?	AQ5 ERRO?	AQ6 ERRO?	AQ7 ERRO?	AQ8 ERRO?	AQ9 ERRO?	AQ10 ERRO?	Vel. Entr. Esq.	Vel. Entr. Dir.	Vel. Sai. Esq.	Vel. Sai. Dir.	Energia Gerada
1	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	19.0 km/h	19.0 km/h	20.0 km/h	10.0 km/h	42.67 J

Figura 6.15 – Mensagem recebida pelo Módulo Universal a 20 km/h

• **Passagem de carro a 30 km/h**

Na figura 6.16 pode ser visualizado as mensagens recebidas pelo módulo de agregador na passagem de um carro 30 km/h, neste teste também foram recebidas duas atuações por cada módulo como era de esperar. Para além disto, é possível reparar a partir do módulo de aquisição 1 e 2, que em média a energia gerada pelos geradores está compreendida entre 4 e 5 J aproximadamente.

Save Data

Módulo de aquisição 1													
X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2	
1	5.89 g	6.31 g	13.31 g	23.0 °C	73.0 %	35.55 V	2.70 A	35.22 V	2.62 A	95.98 W	92.27 W	4.71 J	4.45 J
2	6.91 g	7.27	13.61 g	22.5 °C	74.5 %	35.91 V	2.71 A	35.88 V	2.65 A	97.01 W	95.08 W	4.92 J	4.82 J

Módulo de aquisição 2													
X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2	
1	6.72 g	6.75 g	12.91 g	22.0 °C	71.5 %	34.92 V	2.65 A	35.65 V	2.70 A	92.53 W	96.25 W	4.45 J	4.73 J
2	5.37 g	5.78 g	13.54 g	21.5 °C	72.0 %	35.50 V	2.68 A	34.90 V	2.60 A	91.26 W	95.14 W	4.38 J	4.68 J

Módulo de aquisição 3													
X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2	
1	5.77 g	6.37 g	13.62 g	22.0 °C	73.5 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J
2	5.92 g	5.51 g	13.13 g	21.5 °C	74.0 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J

Módulo de aquisição 4													
X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2	
1	5.21 g	5.44 g	12.99 g	21.5 °C	70.5 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J
2	6.51 g	4.21 g	13.33 g	22.0 °C	71.0 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J

Figura 6.16 – Mensagens recebidas pelo Módulo Agregador a 30 km/h

Na figura 6.17 pode ser visualizado as mensagens recebidas pelo módulo universal na passagem do carro a 30 km/h, esta mensagem contém erros associados aos acelerómetros no caso dos 4 módulos dispostos e erros energéticos no caso do módulo de aquisição 3 e 4 pois estes não possuem sensores para a leitura de tensão ou corrente. Para além disto, ainda é possível visualizar a velocidade de entrada e saída a que o carro passou pelo sistema. Por fim, é possível visualizar a energia total gerada pela passagem do carro que é de 37,14 J.

Save Data

Módulo Agregador 1															
ID	AQ1 ERRO?	AQ2 ERRO?	AQ3 ERRO?	AQ4 ERRO?	AQ5 ERRO?	AQ6 ERRO?	AQ7 ERRO?	AQ8 ERRO?	AQ9 ERRO?	AQ10 ERRO?	Vel. Entr. Esq.	Vel. Entr. Dir.	Vel. Sai. Esq.	Vel. Sai. Dir.	Energia Gerada
1	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	29.0 km/h	29.0 km/h	30.0 km/h	30.0 km/h	37.14 J

Figura 6.17 – Mensagem recebida pelo Módulo Universal a 30 km/h

• **Passagem de carro a 40 km/h**

Na figura 6.18 pode ser visualizado as mensagens recebidas pelo módulo de agregador na passagem de um carro 40 km/h. Neste teste também foram recebidas duas atuações por cada módulo como era de esperar. Para além disto, é possível reparar a partir do módulo de aquisição 1 e 2, que em média a energia gerada pelos geradores está compreendida entre 3 J e 4 J aproximadamente.

Save Data

Módulo de aquisição 1													Módulo de aquisição 2														
X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2	X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2		
1	5.34 g	6.05 g	10.32 g	23.0 °C	73.0 %	34.55 V	2.63 A	33.52 V	2.52 A	90.86 W	84.47 W	3.58 J	3.13 J	1	6.33 g	5.77 g	12.31 g	22.0 °C	71.5 %	33.90 V	2.58 A	34.15 V	2.62 A	87.46 W	89.47 W	3.24 J	3.44 J
2	6.59 g	6.25 g	10.38 g	22.5 °C	74.5 %	33.43 V	2.59 A	34.28 V	2.60 A	86.58 W	89.12 W	3.25 J	3.42 J	2	5.25 g	4.69 g	11.64 g	21.5 °C	72.0 %	34.70 V	2.63 A	33.70 V	2.55 A	91.26 W	85.93 W	3.60 J	3.21 J

Módulo de aquisição 3													Módulo de aquisição 4														
X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2	X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2		
1	5.43 g	5.25 g	10.53 g	22.0 °C	73.5 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J	1	5.43 g	5.12g	11.46 g	21.5 °C	70.5 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J
2	5.31 g	4.70 g	11.43 g	21.5 °C	74.0 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J	2	6.33 g	4.51 g	11.53 g	22.0 °C	71.0 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J

Figura 6.18 – Mensagens recebidas pelo Módulo Agregador a 40 km/h

Na figura 6.19 pode ser visualizado as mensagens recebidas pelo módulo universal na passagem do carro, esta mensagem contém agora apenas erros energéticos no caso do módulo de aquisição 3 e 4 pois estes não possuem sensores para a leitura de tensão ou corrente. Para além disto, ainda é possível visualizar a velocidade de entrada e saída a

que o carro passou pelo sistema. Por fim, é possível visualizar a energia total gerada pela passagem do carro que é de 26,87 J.

Save Data

Módulo Agregador 1															
ID	AQ1 ERRO?	AQ2 ERRO?	AQ3 ERRO?	AQ4 ERRO?	AQ5 ERRO?	AQ6 ERRO?	AQ7 ERRO?	AQ8 ERRO?	AQ9 ERRO?	AQ10 ERRO?	Vel. Entr. Esq.	Vel. Entr. Dir.	Vel. Sai. Esq.	Vel. Sai. Dir.	Energia Gerada
1	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	39.0 km/h	39.0 km/h	39.0 km/h	39.0 km/h	26.87 J

Figura 6.19 – Mensagem recebida pelo Módulo Universal a 40 km/h

Com isto, é possível verificar que a baixas velocidades o gerador consegue gerar mais energia, isto acontece devido ao facto de quanto maior for a velocidade do veículo menos tempo este exerce força sobre a tampa do módulo mecânico o que causa que a tampa desça menos e por consequência será gerada menos energia. Isto também justifica o facto de que a velocidades mais altas como 40 km/h os erros associados ao acelerómetro deixarem de acontecer a tampa do módulo mecânico não sofreu força suficiente para bater no fim de curso não gerando assim valores elevados.

6.2.3 Passagem de carro com dois módulos agregadores com dois de aquisição para cada

Num teste final foram agrupados dois módulos de aquisição para cada um dos dois módulos agregadores. Para tal, foram escolhidos os módulos de aquisição 1 e 3 que estão dispostos diretamente um a seguir ao outro com o módulo agregador 1 e os módulos de aquisição 2 e 4 que estão dispostos da mesma maneira com o módulo agregador 2, de forma a possibilitar testes com mais de um módulo agregador. Com isto, foi realizada a passagem de um carro a aproximadamente 15 km/h.

Nos testes realizados como pode ser visualizado pela figura 6.20 temos as atuações relativas ao módulo agregador 1 que apresenta a passagem do carro nos módulos 1 e 3. Nesta passagem foram geradas energias entre 5 J e 6,5 J.

Save Data

Módulo de aquisição 1													
	X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2
1	15.91 g	12.93 g	15.96 g	23.0 °C	76.5 %	37.87 V	3.17 A	36.41 V	2.9 A	120.0 W	105.6 W	6.51 J	5.55 J
2	9.82 g	11.27 g	12.71 g	23.5 °C	77.5 %	38.28 V	3.05 A	36.67 V	2.78 A	114.8 W	101.9 W	6.02 J	5.25 J

Módulo de aquisição 3													
	X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2
1	15.44 g	12.63 g	15.56 g	22.5 °C	76.0 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J
2	9.6 g	10.81 g	15.39 g	23.0 °C	77.0 %	0.0 V	0.0 A	0.0 V	0.0 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J

Figura 6.20 – Mensagens recebidas pelo Módulo Agregador 1

No caso do módulo agregador 2, como pode ser visualizado na figura 6.21, foram recebidas 2 atuações por módulo também verificando assim a passagem do carro pelos dois conjuntos de módulos agregadores. Nesta passagem foram geradas energias entre 5,4 J e 7 J

Módulo de aquisição 2													
	X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2
1	12.88 g	8.35 g	15.96 g	23.5 °C	72.0 %	37.71	3.12 A	36.95 V	3.02 A	117.65...	111.45...	6.3 J	5.65 J
2	11.98 g	7.65 g	15.96 g	24.0 °C	72.5 %	37.32 V	3.06 A	36.54 V	2.95 A	114.95...	106.67...	6.91 J	5.39 J

Módulo de aquisição 4													
	X	Y	Z	TEMP	HUM	T1	A1	T2	A2	POT1	POT2	EN1	EN2
1	12.68 g	8.05 g	15.76 g	22.0 °C	71.0 %	0.1 V	0.1 A	0.15 V	0.05 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J
2	11.78 g	7.35 g	15.76 g	22.5 °C	71.0 %	0.1 V	0.1 A	0.15 V	0.05 A	0.0 W	0.0 W	0.0 J	0.0 J

Figura 6.21 – Mensagens recebidas pelo Módulo Agregador 2

Por fim, pode-se observar as mensagens recebidas pelo módulo universal através da figura 6.22. É possível averiguar que apenas foi possível verificar a existência de erros

nos módulos de aquisição correspondentes a cada módulo agregador. Para além disto, também é possível aferir que apenas foi possível realizar o cálculo da velocidade de estrada e saída do lado correspondente em que estão instalados os módulos. Por fim, foi verificado o bom funcionamento de todo o sistema distribuído através da verificação e análise do envio de mensagens.

Save Data

Módulo Agregador 1															
ID	AQ1 ERRO?	AQ2 ERRO?	AQ3 ERRO?	AQ4 ERRO?	AQ5 ERRO?	AQ6 ERRO?	AQ7 ERRO?	AQ8 ERRO?	AQ9 ERRO?	AQ10 ERRO?	Vel. Entr. Esq.	Vel. Entr. Dir.	Vel. Sai. Esq.	Vel. Sai. Dir.	Energia Gerada
1	1	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	14.0 km/h	0.0 km/h	15.0 km/h	0.0 km/h	23.33 J

Módulo Agregador 2															
ID	AQ1 ERRO?	AQ2 ERRO?	AQ3 ERRO?	AQ4 ERRO?	AQ5 ERRO?	AQ6 ERRO?	AQ7 ERRO?	AQ8 ERRO?	AQ9 ERRO?	AQ10 ERRO?	Vel. Entr. Esq.	Vel. Entr. Dir.	Vel. Sai. Esq.	Vel. Sai. Dir.	Energia Gerada
1		Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	0.0 km/h	15 km/h	0.0 km/h	15 km/h	24.25 J

Figura 6.22 - Mensagens recebidas pelo Módulo Universal

7 Conclusão

Ao longo do presente capítulo são apresentadas conclusões que permitem sustentar as opções de desenvolvimento implementadas ao longo do projeto. É ainda realizada uma síntese dos objetivos cumpridos e, por fim, apresentando propostas de desenvolvimentos futuras.

7.1 Objetivos realizados

O principal objetivo do trabalho desenvolvido, tendo em conta os requisitos propostos pela empresa, consistiu em dimensionar e desenvolver um sistema capaz de realizar a monitorização de carros em determinadas rodovias. Para tal, foi elaborado um sistema distribuído composto por três módulos: Aquisição de dados, Agregador e Universal.

Neste sentido, para o desenvolvimento destes módulos foi necessário realizar o estudo e escolha de microcontroladores, sensores e protocolos de comunicação mais adequados serem utilizados. O primeiro módulo a ser desenvolvido foi o de aquisição de dados, este consiste na recolha de dados dos sensores aplicados num módulo mecânico e o envio do mesmo. De seguida, o módulo agregador tem o objetivo de fazer a recolha de todos os dados enviados pelos conjuntos de módulos de aquisição e processar essas mensagens em informação relevante da passagem do carro que será enviada para o próximo módulo. Por último, o módulo universal realiza a recolha de todas as passagens de carros que foram realizadas em cada um dos módulos agregadores de modo a ficarem agrupados.

Para além disto, ainda foram desenvolvidos em paralelo com os módulos, três diferentes *softwares* de monitorização. Com estes *softwares* é possível realizar uma interface em tempo real com o módulo em funcionamento e, de seguida, recolher as medições, valores e mensagens enviadas e interpretá-las em gráficos e tabelas para que seja possível serem analisadas posteriormente.

Através do uso dos módulos juntamente com os *softwares* de monitorização é possível a aplicação deste sistema em rodovias e possibilitar a realização de testes e observações, com possibilidade de acesso direto aos módulos aplicados no terreno. Através da monitorização do módulo universal é possível realizar a leitura das mensagens finais recebidas.

Num aspeto geral, o sistema desenvolvido é escalável, no sentido em que, é possível acrescentar ou diminuir o número de módulos de aquisição ou módulos agregadores de uma forma prática e rápida. Com isto, foi possível atingir parcialmente todos os objetivos propostos pela empresa: as aquisições de dados de sensores a elevadas frequências, interrupção gerada pelo acelerómetro para dar início à aquisição de dados, algoritmo capaz de realizar o envio da mensagem no momento após a passagem do carro pelo módulo e, por fim, o controlo da comunicação de dados através do módulo agregador e universal de forma a possibilitar o envio de todas as mensagens sem colisões ou falhas.

7.2 Melhorias futuras

Uma das melhorias a ser implementadas no futuro do projeto é o facto de não ter sido possível a aquisição de microcontroladores e sensores no formato SMD, o que tornaria possível o desenvolvimento de PCB's completamente proprietárias e mais pequenas para a empresa. Para além disto, outra melhoria a ser implementada seria recorrer ao uso de um protocolo de comunicação que apresente *carrier sense multiple access with collision detection* (CSMA/CD) para a comunicação entre microcontroladores, que realiza a deteção automática de colisões durante a comunicação, tornando assim a comunicação entre módulos mais robusta e de menor complexidade.

8 Referências

- [1] M. Lewandowski, B. Płaczek, M. Bernas, and P. Szymała, “Road traffic monitoring system based on mobile devices and bluetooth low energy beacons,” *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/3251598.
- [2] “Growing at a slower pace, world population is expected to reach 9.7 billion in 2050 and could peak at nearly 11 billion around 2100 | UN DESA | United Nations Department of Economic and Social Affairs.” <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2019.html> (accessed Sep. 22, 2021).
- [3] M. Sarrab, S. Pulparambil, and M. Awadalla, “Development of an IoT based real-time traffic monitoring system for city governance,” *Glob. Transitions*, vol. 2, pp. 230–245, 2020, doi: 10.1016/j.glt.2020.09.004.
- [4] “Secure, sustainable smart cities and the IoT.” <https://www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/iot/inspired/smart-cities> (accessed Sep. 22, 2021).
- [5] S. Trubia, A. Severino, S. Curto, F. Arena, and G. Pau, “Smart roads: An overview of what future mobility will look like,” *Infrastructures*, vol. 5, no. 12, pp. 1–12, 2020, doi: 10.3390/infrastructures5120107.
- [6] S. Pasha, “Thingspeak Based Sensing and Monitoring System for IoT with Matlab Analysis,” *Int. J. New Technol. Res.*, vol. 2, no. 6, pp. 19–23, 2016.
- [7] “Pavnext - Uptec.” <https://uptec.up.pt/empresas/pavnext/> (accessed Sep. 22, 2021).
- [8] “The importance of having a good monitoring system.” <https://pandorafms.com/blog/why-you-need-a-monitoring-system/> (accessed Sep. 22, 2021).
- [9] “Quais as vantagens do monitoramento da TI para seus clientes?” <http://digital.br.synnex.com/pt/quais-as-vantagens-do-monitoramento-da-ti-para-seus-clientes> (accessed Sep. 22, 2021).

- [10] “Top 12 Advantages of Effective IT Monitoring Software.” <https://www.cloudradar.io/blog/top-12-advantages-of-effective-it-monitoring> (accessed Sep. 22, 2021).
- [11] F. J. A. Duarte, “Pavement Energy Harvesting System to Convert Vehicles Kinetic Energy into Electricity,” 2018, [Online]. Available: <https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/79526>.
- [12] “How to minimize IT downtime (and maximize dollars).” <https://www.spiceworks.com/it-articles/minimize-it-downtime/> (accessed Sep. 22, 2021).
- [13] “Improve Your Monitoring and Incident Response | VictorOps.” <https://victorops.com/incident-response/six-ways-reduce-downtime/> (accessed Sep. 22, 2021).
- [14] L. Araújo, “MONITORIZAÇÃO PARA EQUIPAMENTOS DE ‘ PAVEMENT ENERGY HARVESTING ,’” 2020.
- [15] R. Aissaoui, H. Menouar, A. Dhraief, F. Filali, A. Belghith, and A. Abu-Dayya, “Advanced real-time traffic monitoring system based on V2X communications,” *2014 IEEE Int. Conf. Commun. ICC 2014*, no. August, pp. 2713–2718, 2014, doi: 10.1109/ICC.2014.6883734.
- [16] M. Garrett, *Encyclopedia of Transportation: Social Science and Policy*. SAGE, 2014.
- [17] J. Guerrero-Ibáñez, S. Zeadally, and J. Contreras-Castillo, “Sensor technologies for intelligent transportation systems,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 4, pp. 1–24, 2018, doi: 10.3390/s18041212.
- [18] E. Minge, S. Petersen, and J. Kotzenmacher, “Evaluation of nonintrusive technologies for traffic detection, phase 3,” *Transp. Res. Rec.*, no. 2256, pp. 95–103, 2011, doi: 10.3141/2256-12.
- [19] “Traffic Monitoring & Information | SWARCO.” <https://www.swarco.com/solutions/traffic-management/highway-and->

tunnel/traffic-monitoring-information (accessed Sep. 23, 2021).

- [20] “RoadPod VT4 | MetroCount.” <https://metrocount.com/products/roadpod-vt4/> (accessed Sep. 23, 2021).
- [21] “Vehicle Count and Classify Solutions | All Traffic Solutions.” <https://www.alltrafficsolutions.com/solutions/vehicle-count-classify-solutions/> (accessed Sep. 23, 2021).
- [22] A. T. SOLUTION, “PRODUCT SPECIFICATIONS : QUETRAK SLOW AND STOPPED,” pp. 1–2.
- [23] A. T. SOLUTIONS, “STATTRAK BIDIRECTIONAL SPEED AND VOLUME TRAFFIC COUNTER.”
- [24] A. T. SOLUTIONS, “PRODUCT SPECIFICATIONS : SPEEDLANE PRO COUNTER CLASSIFIER.”
- [25] “NUCLEO-G431KB - STM32 Nucleo-32 development board with STM32G431KB MCU, supports Arduino nano connectivity - STMicroelectronics.” <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-g431kb.html> (accessed Sep. 23, 2021).
- [26] “NUCLEO-L476RG - STM32 Nucleo-64 development board with STM32L476RG MCU, supports Arduino and ST morpho connectivity - STMicroelectronics.” <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-l476rg.html> (accessed Sep. 23, 2021).
- [27] STMicroelectronics, “STM32G431x6 STM32G431x8 STM32G431xB.”
- [28] STMicroelectronics, “STM32L476xx-Datasheet,” no. June, 2019, [Online]. Available: www.st.com.
- [29] I. Maxim Integrated Products, “RS-485 / RS-422 Transceivers,” *Current*, pp. 1–17, 2014, [Online]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1487-MAX491.pdf>.
- [30] “Circuito Integrado Max485 .” <https://www.aquario.pt/pt/product/fr-circuito->

integrado-max485-max485 (accessed Sep. 23, 2021).

- [31] “Difference between I2C and SPI (I2C vs SPI), you should know. - Aticleworld”
<https://aticleworld.com/difference-between-i2c-and-spi/> (accessed Nov. 8, 2021).
- [32] Philips Semiconductors, “Data sheet detailing I2C-bus controller,” *Filtr. Sep.*, vol. 34, no. 8, p. 812, 1997, doi: 10.1016/s0015-1882(97)91477-4.
- [33] Texas Instruments, “KeyStone Architecture Serial Peripheral Interface (SPI) User Guide,” *Texas Instruments*, no. November, p. 2, 2010, [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ug/sprugp2a/sprugp2a.pdf>.
- [34] “The Differences Between I2C and SPI (I2C vs SPI) - Total Phase Blog.”
https://www.totalphase.com/blog/2021/07/i2c-vs-spi-protocol-analyzers-differences-and-similarities/?GA_network=g&GA_device=c&GA_campaign=12406231365&GA_adgroup=121771884921&GA_target=&GA_placement=&GA_creative=500309116002&GA_extension=&GA_keyword=&GA_loc_physical_ms=1011759&GA_landingpage=https://www.totalphase.com/blog/2021/07/i2c-vs-spi-protocol-analyzers-differences-and-similarities/&ga_keyword_match=b&ga_ad_position=&gclid=Cj0KCQjwg7KJBhDyARIsAHRAXaH6CwiZWHja6ghn1fzv2bISc4M5XJGkAZYo-RqqA8WSvy2IejO9aH4aAhDWEALw_wcB (accessed Sep. 23, 2021).
- [35] “SPI Tutorial – JTAG Boundary-Scan, In-System Programming, & Bus Analyzers – Corelis.” <https://www.corelis.com/education/tutorials/spi-tutorial/> (accessed Sep. 23, 2021).
- [36] Analog Devices, “Digital Accelerometer ADXL345 Data Sheet,” p. 40, 2016, [Online]. Available: www.analog.com.
- [37] “Triple Axis Accelerometer - ADXL345 - SparkFun Electronics.”
<https://www.sparkfun.com/products/9045> (accessed Sep. 23, 2021).
- [38] “ADXL345 - Triple-Axis Accelerometer (+-2g/4g/8g/16g) w/ I2C/SPI : ID 1231 : \$17.50 : Adafruit Industries, Unique & fun DIY electronics and kits.”
<https://www.adafruit.com/product/1231> (accessed Sep. 23, 2021).

- [39] STMicroelectronics, “Capacitive digital sensor for relative humidity and temperature HTS221,” no. April, pp. 1–31, 2015, [Online]. Available: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00116291.pdf>.
- [40] “HTS221 Capacitive Digital Humidity Sensor - STMicro | Mouser.” <https://pt.mouser.com/new/stmicroelectronics/stm-hts221-sensor/> (accessed Sep. 23, 2021).
- [41] “Overview | Adafruit HTS221 - Temperature & Humidity Sensor | Adafruit Learning System.” <https://learn.adafruit.com/adafruit-hts221-temperature-humidity-sensor> (accessed Sep. 23, 2021).
- [42] “ACS712 Current Sensor: Datasheet, Pinout, Circuit.” <https://www.apogeeweb.net/circuitry/ACS712-current-sensor.html> (accessed Sep. 23, 2021).
- [43] M. Allegro, “Automotive-Grade, Galvanically Isolated Current Sensor IC with Common-Mode Field Rejection in a Small Footprint SOIC8 Package - ACS725,” 2020.
- [44] Texas Instruments, “Industry-Standard Dual Operational Amplifiers - LM358,” vol. 1, no. June 1976, pp. 1–58, 2021, [Online]. Available: www.ti.com.
- [45] “LM358 CI Amplificador Operacional - FilipeFlop Componentes Eletrônicos.” <https://www.filipeflop.com/produto/lm358p-ci-amplificador-operacional/> (accessed Sep. 23, 2021).
- [46] Texas Instruments, “TPS6040x Unregulated 60-mA Charge Pump Voltage Inverter,” 2015, [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps60402.pdf>.
- [47] “TPS60400 TPS60400DBVR TPS60400DBVT.” <https://pt.aliexpress.com/item/4000401558103.html> (accessed Sep. 23, 2021).
- [48] Microchip, “MCP3004/3008 Datasheet,” *Mcp3004/3008*, vol. DS21295D, p. 40, 2008, [Online]. Available: <https://cdn->

shop.adafruit.com/datasheets/MCP3008.pdf.

- [49] “mcp3004 | Microchip Technology.” <https://www.microchip.com/en-us/product/MCP3004> (accessed Sep. 23, 2021).
- [50] Microchip, “MCP3002 2.7V Dual Channel 10-Bit A/D Converter with SPI Serial Interface Datasheet,” 2011.
- [51] “mcp3002 | Microchip Technology.” <https://www.microchip.com/en-us/product/MCP3002> (accessed Sep. 23, 2021).
- [52] B. Murmann, “VLSI Signal Conditioning Circuits,” *Imid 2009*, pp. 1069–1072, 2009.
- [53] “Sallen-Key Low-pass Filter Design Tool.” <http://sim.okawadenshi.jp/en/OPseikiLowkeisan.htm> (accessed Sep. 23, 2021).
- [54] “STM32CubeIDE - Integrated Development Environment for STM32 - STMicroelectronics.” <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html> (accessed Sep. 23, 2021).
- [55] “Visual Studio Code - Code Editing. Redefined.” <https://code.visualstudio.com/> (accessed Sep. 23, 2021).
- [56] “Welcome to Python.org.” <https://www.python.org/> (accessed Sep. 23, 2021).
- [57] “MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink.” <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed Sep. 23, 2021).