

# **Desenvolvimento de uma scooter elétrica**

**Rosário Domingos Gomes N°31876**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Energias Renováveis e Eficiência Energética

Trabalho realizado sob a orientação de

**Prof. Dr. José Alexandre de Carvalho Gonçalves**

Outubro de 2020



# **Desenvolvimento de uma scooter elétrica**

**Rosário Domingos Gomes N°31876**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto  
Politécnico de Bragança para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Energias  
Renováveis e Eficiência Energética

Outubro de 2020



# Agradecimentos

A realização do trabalho aqui apresentado não teria sido possível sem o apoio e a contribuição, direta ou indiretamente, de algumas pessoas, às quais quero começar por transmitir os meus mais sinceros agradecimentos.

Aos meus pais que sempre me apoiou na minha vida académica.

Ao meu irmão, pela amizade e companheirismo.

A minha namorada Doris Silva e minha filha Aylla Gomes, pelo apoio e amizade.

Ao professor Doutor José Alexandre de Carvalho Gonçalves pela orientação ao longo destes anos todos, pela orientação e conselhos para o meu sucesso académico.

Ao professor José Batista, pelos esclarecimentos e conselhos.

Ao IPB, pela oportunidade de me formar nesta linda Instituição, pelos todos esses 6 anos de muitos conhecimentos e aprendendo coisas novas que vou levar para toda vida.

# Resumo

Este projeto apresenta a concepção de um conjunto de circuitos eletrônicos de controle de potência para acionar um motor de corrente contínua de uma Scooter Elétrica, com base num micro-controlador.

O acionamento do Motor da Scooter é feito através de um sinal PWM, com base na plataforma Arduino.

O sinal PWM é utilizado para controlar o MOSFET da ponte-H (acionador), corrigindo a velocidade para a desejada. Os sinais provenientes dos sensores de corrente, tensão e temperatura, são processados pelos seus circuitos de condicionamento de sinal e são adquiridos para o microcontrolador que converte esses sinais analógicos em sinais digitais exibidos no monitor série do software Arduino.

**Palavras-Chave:** Scooter elétrica, Sensores, Condicionamento de sinais, Motor DC, PWM, Arduino, Conversor A/D.

# Abstract

This project presents the design of a set of electronic control and power circuits to drive an electric scooter direct current motor, through a micro-controller.

The activation of the Scooter Engine is done through a PWM signal, where the signal is generated through an Arduino platform.

The PWM signal is applied to control an M-bridge MOSFET, correcting the speed to the desired one.

The signals from the current, voltage and temperature sensors are processed by their signal conditioning circuits and are acquired by the microcontroller that converts these analog signals into digital signals displayed on the Arduino software serial monitor.

**Keywords:** Electric Scooter, Sensors, Signal Conditioning, DC Motor, PWM, Arduino, A / D Converter.

# Conteúdo

1. Introdução .....	17
1.1. Scooter Elétrica.....	17
1.1. Objetivos.....	20
1.2. Estrutura do documento.....	21
2. Revisão da Literatura .....	22
2.1. Condicionamento de Sinal.....	22
2.1.1. Princípios de condicionamento de sinais analógicos .....	22
2.2. Sensores .....	23
2.2.1. Sensores de temperatura.....	24
2.2.2. Circuitos de Interface com os Sensores.....	26
2.2.2.1. Divisor de Tensão.....	26
2.2.2.2. Circuito de filtragem .....	27
3. Motor DC.....	30
3.1. Funcionamento de motores DC .....	30
3.2. Acionamento dos Motores.....	31
3.2.1. Modulação por Largura de Pulso .....	32
3.2.2. Ponte-H.....	34
3.3. Tipos de motor de uma Scooter Elétrica .....	35
4. Hardware.....	37
4.1. Arquitetura do Sistema .....	37
4.1.1. Motor DC da Scooter .....	38
4.1.2. Circuito de Potência (DRIVE) .....	38
4.1.2.1. Transístores de Efeito de Campo .....	38
4.1.2.2. Escolha de um MOSFET.....	39
4.1.2.3. Controlador de MOSFET DRIVE.....	40

4.1.2.4.	Portas AND Lógica de Controlo .....	41
4.1.3.	Sistema de Energia da Scooter .....	42
4.1.3.1.	Circuito de Alimentação.....	42
4.1.4.	Circuito de Segurança Relé (corte DC bateria 24 V).....	43
4.1.5.	Principais Componentes Do Sistema De Controlo .....	44
4.1.5.1.	Circuito Integrado – TLC272CP .....	44
4.1.5.2.	Sensor De Corrente .....	44
4.1.5.3.	Sensor De Temperatura NTC 10K.....	47
5.	Sistema de Monitorização e Controlo.....	49
5.1.	Sistema De Aquisição De Dados.....	49
5.2.	Condicionamento de Sinal .....	50
5.2.1.	Circuito de condicionamento de sinal de corrente .....	51
5.2.1.1.	Filtragem do Sensor de Corrente.....	54
5.2.1.2.	Circuito comparador.....	57
5.2.2.	Circuito de Condicionamento de Sinal de Tensão .....	57
5.2.3.	Circuito de Condicionamento de Sinal da Temperatura .....	59
5.2.3.1.	Equação de Steinhart-Hart .....	60
5.3.	Monitorização.....	60
5.3.1.	Arduino Software (IDE).....	60
5.3.1.1.	Monitorização dos sensores .....	61
5.3.1.2.	Controlo do PWM em Malha aberta .....	64
6.	Análise de Resultados .....	66
6.1.	Sinal do Circuito condicionamento de sinal do sensor de Corrente .....	66
6.1.1.	Comparação entre o sinal do PWM e do sensor de corrente.....	67
6.2.	PWM e a tensão do MOSFET entre a Source e o Dreno .....	68
6.3.	Resultados obtidos no Software .....	68
6.3.1.	Sensor de Corrente .....	69

6.3.2. Sinal de Tensão da Bateria.....	71
7. Conclusões.....	74
Anexos.....	79

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1: Características do motor MY1050 .....	38
Tabela 2: Características do sensor LTSR 25-NP.....	45

## Lista de Figuras

Figura 1:Primeira patente de uma moto elétrica registada: a) estrutura metálica; b) motor elétrico [1] .....	18
Figura 2: Ilustração da moto elétrica publicada na revista científica Popular Mechanics, em 1911 [2] .....	18
Figura 3: Mike Corbin pilota a moto elétrica Quick Silver em 1974 e estabelece o recorde de velocidade terrestre de 266.165 km/h [3] .....	19
Figura 4: Primeira scooter elétrica produzida em massa pela Peugeot [4] .....	19
Figura 5: eScooter 125 [5] .....	19
Figura 6: Scooter utilizada no projeto.....	20
Figura 7: Condicionamento sinal [8] .....	23
Figura 8: Comparação de um sinal analógico com um digital [11].....	24
Figura 9: Símbolo de um termistor [11] .....	25
Figura 10: Gráfico de resposta dos termístores PTC e NTC [11].....	25
Figura 11: Circuito Divisor de Tensão [12].....	26
Figura 12: Divisor de tensão com NTC [11].....	27
Figura 13: Resposta em frequência do FPBI [13].....	28
Figura 14: FPB segunda ordem ativo Sallen Key [14] .....	29
Figura 15: Rotor, explicitando o comutador e os enrolamentos do motor DC [16] 30	
Figura 16: Modelagem elétrica de um motor DC [17].....	31
Figura 17: Sinal PWM [20].....	32
Figura 18: Implementação do controlo PWM [20].....	33
Figura 19: Sinais PWM com mesma frequência e Duty Cycles diferentes [20].....	33
Figura 20: Ponte-H básica [22] .....	34
Figura 21: Motor de cubo [24].....	35
Figura 22: Motor de Cubo traseiro [24] .....	35
Figura 23: Motor de corrente instalado em uma Scooter [24] .....	36
Figura 24: Diagrama de blocos do sistema .....	37
Figura 25: Símbolo MOSFET canal N de potência [25] .....	39
Figura 26: MOSFET canal N com diodo de corpo [26] .....	39

Figura 27: A) MOSFET de potência IRFP048N, B) Curva da Capacidade (pF) Vs Tensão entre o Dreno e a Source (V) [27].....	40
Figura 28: Controlador MOSFET Drive: A) Encapsulamento IR2111 e B) Pinout IR2111 [28] .....	41
Figura 29: Esquema de ligação típica do IR2111 [28].....	41
Figura 30: Ligação em série de baterias.....	42
Figura 31: Circuito LM7805 .....	43
Figura 32: Relé SSP1D440BD [32] .....	44
Figura 33: Amplificador operacional, TLC272CP e Pinout [33] .....	44
Figura 34: Sensor LTSR 25-NP [36] .....	45
Figura 35: Esquema de conexão do LTSR 25-NP [36].....	45
Figura 36: Configuração do sensor, com base na corrente de entrada [36] .....	46
Figura 37: Configuração de ligação do Sensor LTSR 25-NP [36] .....	46
Figura 38: Gráfico de saída em tensão do LTSR 25-NP [36].....	47
Figura 39: Termístor NTC 10K $\Omega$ [37].....	47
Figura 40: Curva resistiva característica do Termístor NTC 10K [38].....	48
Figura 41: Sistema de controlo .....	49
Figura 42: Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados .....	50
Figura 43: Sinal de Tensão compatível com o conversor A/D [10].....	51
Figura 44: Diagrama de blocos do circuito controlo de corrente.....	51
Figura 45: Ilustração da conexão do Sensor de Corrente LTSR 25-NP .....	52
Figura 46: Circuito implementado para retirar tensão de Offset .....	52
Figura 47: Filtro ativo passa-baixo de 2ª ordem Sallen Key .....	53
Figura 48: Simulação da frequência de corte no OKAWA Electric Design.....	54
Figura 49: Gráfico de Frequência de Corte em MatLab .....	55
Figura 50: Gráfico do Ganho .....	56
Figura 51: Condicionamento do sinal de corrente .....	56
Figura 52: Circuito comprador.....	57
Figura 53: Circuito Divisor de tensão das baterias .....	58
Figura 54: Circuito condicionamento de Temperatura .....	59
Figura 55: Programa Arduino IDE ver.1.8.12 .....	61
Figura 56: Comparação entre tensão offset entrada e saída.....	66
Figura 57: Relação entre o sinal do sensor LTSR 25-NP e do circuito de condicionamento de sinal .....	67

Figura 58: Comparação do sinal PWM com o sinal do sensor de corrente .....	68
Figura 59: Tensão do PWM entre a Source e o Dreno .....	68
Figura 60: PWM com um Duty Cycle de 2% .....	69
Figura 61: Gráfico da corrente com um Duty Cycle de 2%.....	69
Figura 62: PWM Com um Duty Cycle de 50% .....	70
Figura 63: Corrente do Duty Cycle de 50%.....	70
Figura 64: PWM com um Duty Cycle máximo .....	71
Figura 65: Corrente do Duty Cycle máximo.....	71
Figura 66: Resultados da tensão bateria 12V.....	72
Figura 67: Circuito do Drive e do Condicionamento de sinal .....	72
Figura 68: Circuito de aquisição de Dados .....	73
Figura 69: Componentes da scooter.....	73

# Acrónimos

<b>A/D</b>	Conversor Analógico Digital
<b>AmpOp</b>	Amplificador operacional
<b>Ciss</b>	Capacitância da Gate em relação ao Dreno e a Fonte
<b>D</b>	Duty Cycle
<b>DC</b>	Corrente Contínua
<b>EA</b>	Entrada Analógica
<b>Fc</b>	Frequência de Corte
<b>FPBI</b>	Filtro passa-baixo ideal
<b>MOSFET</b>	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
<b>NTC</b>	Coefficiente de Temperatura Negativo
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board
<b>PTC</b>	Coefficiente de Temperatura Positivo
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation
<b>R</b>	Resistência
<b>RDSon</b>	Resistência entre Dreno e Source
<b>V</b>	Tensão
<b>Vin</b>	Tensão de entrada
<b>Vgsth</b>	Tensão limiar
<b>Vsensor</b>	Tensão do Sensor
<b>Vout</b>	Tensão de saída
<b>VoutLEM</b>	Tensão de saída do circuito condicionamento de sinal LEM
<b>Vmed</b>	Valor medido
<b>Vref</b>	Tensão de Referência



# Capítulo 1

## 1. Introdução

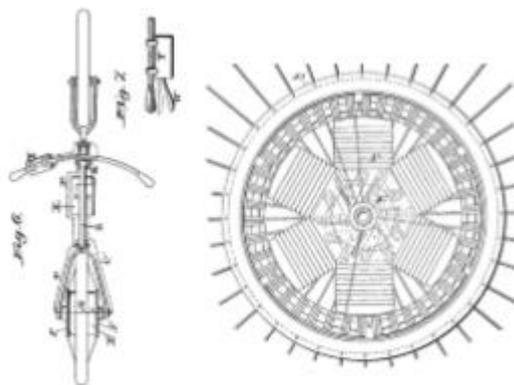
O presente relatório descreve o trabalho desenvolvido no âmbito da Unidade Curricular de Projeto do Mestrado de Engenharia de Energias Renováveis e Eficiência Energética, Especialização em Engenharia de Energias Renováveis, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança. O seu foco centra-se no desenvolvimento de uma scooter elétrica, com base na plataforma Arduino, uma ponte-H e sensores.

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre Scooter elétricas (Moto elétrica), citando-se alguns estudos e projetos desenvolvidos desde a sua invenção até à atualidade, assim como os objetivos associados a este trabalho e a organização do presente relatório.

### 1.1. Scooter Elétrica

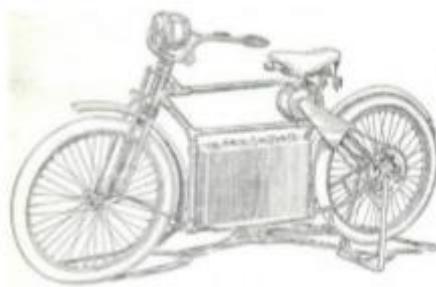
Uma Scooter elétrica é um veículo constituído essencialmente por um motor elétrico, uma unidade de armazenamento de energia (baterias) e uma unidade de monitorização e controlo de parâmetros importantes do motor (ex. corrente, tensão, velocidade) apta para mantê-los dentro dos limites de segurança.

A primeira patente de uma mota elétrica foi registada a 31 de dezembro de 1895 pelo inventor norte-americano Ogden Bolton Jr. Seria um veículo movido por um motor DC de escovas e ímanes permanentes de seis polos, capaz de suportar até 100 A, a partir de uma bateria de 10 V. Contudo, esta ideia só foi posta em prática vários anos depois [1]. A Figura (1) ilustra o aspeto do protótipo idealizado.



*Figura 1:Primeira patente de uma moto elétrica registada: a) estrutura metálica; b) motor elétrico [1]*

Contudo, esta ideia só foi posta em prática vários anos depois em 1911, a revista científica *Popular Mechanics* publica o artigo “Electric Motorcycle” sobre uma moto elétrica Figura (2) com uma autonomia entre 121 km a 160 km e capaz de atingir uma velocidade máxima de 56 km/h. A bateria utilizada era de 12 V e pesava cerca de 91 kg [2].



*Figura 2: Ilustração da moto elétrica publicada na revista científica Popular Mechanics, em 1911 [2]*

No início dos anos 1970, Mike Corbin pilota uma moto elétrica chamada *Quick Silver*, construída por si, e estabelece em 1974 o recorde de velocidade em terra de 266,165 km/h. Este recorde manteve-se durante mais de 30 anos.

Esta moto utilizava baterias de prata-zinco com um sistema de 120 V e dois motores de avião de combate chamados A4B. Aumentava-se a velocidade da moto introduzindo mais baterias ao sistema através de interruptores. Quando se atingia uma determinada velocidade com uma bateria de 12 V, outra bateria era adicionada em série e o sistema passava a funcionar a 24 V, providenciando uma velocidade superior. Este procedimento era efetuado até se atingir a velocidade máxima com os 120 V [3].

Pode observar-se na Figura (3) Mike Corbin a pilotar a moto elétrica *Quick Silver* em 1974.



*Figura 3: Mike Corbin pilota a moto elétrica Quick Silver em 1974 e estabelece o recorde de velocidade terrestre de 266.165 km/h [3]*

Em 1996 houve a primeira produção em massa de scooters elétricas pelo fabricante Peugeot, designadas de Peugeot Scoot'Elec Figura (4). Estes modelos utilizavam baterias de níquel-cádmio e tinham uma autonomia de 40 a 45 km [4].



*Figura 4: Primeira scooter elétrica produzida em massa pela Peugeot [4]*

Em 2020 a SEAT fez a apresentação da SEAT MÓ eScooter 125 Figura (5), a eScooter apresenta na sua roda traseira um motor elétrico de 9 kW (potência máxima), equivalente a um motociclo de 125 cc, com um binário de 240 Nm que permite que esta elegante moto elétrica urbana atinja uma velocidade máxima de até 95 km/h, e, mais importante, vá dos 0 aos 50 km/h num tempo recorde de apenas 3,9 s. Ideal para o tráfego urbano.



*Figura 5: eScooter 125 [5]*

A SEAT MÓ eScooter 125 permite alcançar até 125 km com uma única carga da sua bateria de íões de lítio de 5,6 kWh, o que significa que, com o uso standard, os utilizadores individuais só precisam de carregar o veículo uma vez por semana [5]. A eScooter 125 custa aproximadamente os 6.500€ [6].

## 1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é realizar o estudo de controlo de uma Scooter Elétrica movida por um Motor DC explicitando a metodologia utilizada ao longo do desenvolvimento, onde o sistema de controlo possa ser adaptado para múltiplas plataformas, através de simples ajustes, sem a necessidade de reconfiguração de hardware. Espera-se que o conteúdo deste trabalho seja suficiente para fabricação de um protótipo funcional capazes de cumprir toda as regas no fabrico de uma Scooter comercial de referência. Uma vez definidos os requerimentos para a Scooter Elétrica, o trabalho deve ser capaz de expor com clareza as metodologias necessárias para:

- Dimensionar e seleccionar as baterias;
- Projetar a estrutura;
- Dimensionar e seleccionar o sistema de atuação.

A Figura (6) apresenta a Scooter oferecida para desenvolvimento do projeto.



*Figura 6: Scooter utilizada no projeto*

## 1.2. Estrutura do documento

Este projeto divide-se em sete capítulos, sendo que o primeiro é a **Introdução**, onde fez-se uma revisão histórica da scooter elétrica.

O segundo capítulo, **Revisão da Literatura**, onde faz-se uma revisão da literatura sobre o condicionamento de sinal e os sensores, onde é feita uma comparação entre sensores analógico e sensores digitais, bem como exemplos de técnicas para realizar a sua medição.

No terceiro capítulo, **Motor DC**, tem-se uma breve descrição do Motor DC o seu funcionamento, além de mostrar as formas de controlar estes tipos de motores, também são apresentados os diversos tipos de Motores de Scooters elétricas, sendo explicada como funciona no sistema.

No quarto capítulo, dedicado ao **Hardware**, onde descrevo os componentes usados no sistema. Serão apresentados os principais componentes do sistema de aquisição de dados e suas principais características.

O quinto capítulo, descreve todas as etapas do **Sistema de Monitorização e Controle**, também é feita uma abordagem à plataforma usada para realizar a interface com o Drive.

O sexto capítulo trata da **Análise de Resultados**, obtidos a partir do Arduino, explicando a metodologia utilizada, e finalizando com a comparação dos resultados obtidos pelos instrumentos de referência.

Por último tem-se a **conclusão**.

# Capítulo 2

## 2. Revisão da Literatura

Neste Capítulo é apresentada alguma da revisão literária que foi feita durante o percurso de elaboração desta dissertação. Primeiro o princípio de condicionamento de sinal, a seguir é apresentado as grandezas que variam nos sensores Analógicos, bem como exemplo de uma técnica para realizar a sua medição.

### 2.1. Condicionamento de Sinal

Muitas aplicações necessitam de medições em ambientes ou estruturas, como temperatura e vibração, realizadas a partir de sensores. Esses sensores, por sua vez, necessitam de condicionamento de sinal para que o dispositivo de aquisição de dados efetue a medição de forma eficaz e exata. As principais tecnologias de condicionamento de sinais fornecem melhorias distintas tanto no que diz respeito ao desempenho quanto à exatidão de sistemas de aquisição de dados [7].

#### 2.1.1. Princípios de condicionamento de sinais analógicos

Um sensor mede uma variável pela conversão da informação acerca da daquela variável em um sinal dependente da natureza elétrica ou pneumática. Para desenvolver tais sensores, explora-se que algumas características do material, em circunstâncias eventuais, são influenciadas por alguma variável dinâmica. Conseqüentemente, existe pouca escolha no tipo e no tamanho de tal proporcionalidade. Por exemplo, uma vez pesquisado na natureza e achado que a resistência de sulfeto de cromo varia inversamente com a intensidade de luz, deve-se aprender como explorar este dispositivo para medida da intensidade de luz dentro das restrições deste dispositivo. O condicionamento de sinais analógicos proporciona a operação necessária para transformar a saída de um sensor em uma forma necessária e adequada para “interficiar” com outros elementos do “loop” de controle de processo Figura (7) limita-se a atenção a esta transformação elétrica [8].

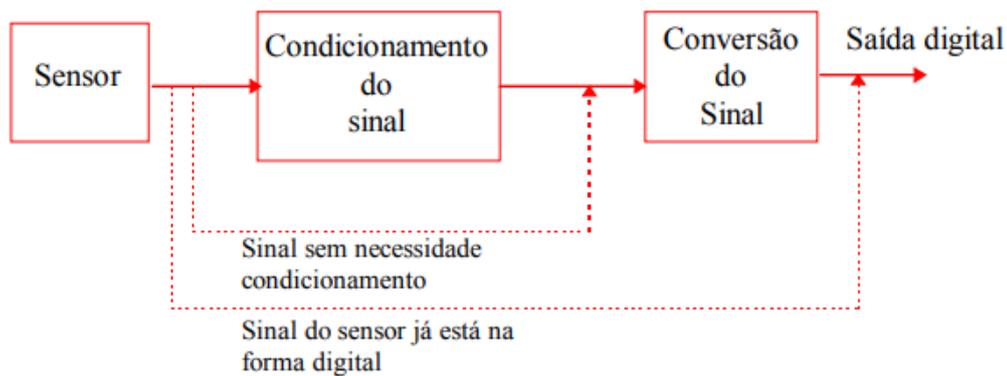


Figura 7: Condicionamento sinal [8]

Descreve sempre o efeito do condicionamento de sinais pelo termo função de transferência. Assim, um simples amplificador de tensão tem uma função de transferência uma constante que, quando multiplicado pelo sinal de entrada, dá o sinal de saída. É possível categorizar um condicionamento de sinais em vários tipos, como veremos a seguir, estes principais tipos são: Mudança no nível, Linearização, Conversão, Isolamento, Filtragem e Adaptação de impedância [9].

## 2.2. Sensores

Os sensores fazem a ponte entre o mundo analógico, e o mundo digital, que é o mundo dos computadores e das comunicações de hoje em dia. Eles são um componente indispensável num sistema de controle de um motor. Literalmente, define-se a palavra sensor como “aquilo que sente”. Na eletrônica, um sensor é conhecido como qualquer componente ou circuito eletrônico que permita a análise de uma determinada condição do ambiente, podendo ela ser algo simples como temperatura ou luminosidade; uma medida um pouco mais complexa como a rotação de um motor ou a distância de um carro até algum obstáculo próximo ou até mesmo eventos distantes do nosso cotidiano, como a detecção de partículas subatômicas e radiações cósmicas.

O sensor é um componente que transforma um tipo de energia em outro. Porém, um sensor pode ser definido como um transdutor, que transforma algum tipo de energia (luz, calor, movimento) em energia elétrica, utilizada para a leitura de alguma condição ou característica do ambiente [10].

O desenvolvimento de sensores e a sua aplicação trouxe como consequência inúmeras vantagens ou comodidades para a vida moderna. Desde a possibilidade de

aumentar a eficiência no funcionamento de um motor ou de uma linha de produção, realizar uma pesquisa científica com maior precisão e em menor tempo, até o fato de poder estacionar o carro sem o perigo de batê-lo ou de ter a segurança de que qualquer tentativa de furto de sua casa poderá ser frustrada, tais são as vantagens oferecidas pelo uso de sensores.

Apesar de ser imensa a variedade de sensores eletrônicos, pode-se dividi-los basicamente em dois tipos: Sensores Analógicos e Sensores Digitais. Essa divisão é feita de acordo com a forma a qual o componente responde à variação da condição.

Os **Sensores Analógicos** são os dispositivos mais comuns. Tais sensores são assim designados pois baseiam-se em sinais analógicos. Sinais analógicos são aqueles que, mesmo limitados entre dois valores de tensão, podem assumir infinitos valores intermediários. Isso significa que, pelo menos teoricamente, para cada nível da condição medida, haverá um nível de tensão correspondente.

Já os **Sensores Digitais** baseiam-se em níveis de tensão bem definidos. Tais níveis de tensão podem ser descritos como alto (High) ou baixo (Low), ou simplesmente “1” e “0”. Ou seja, esses sensores utilizam lógica binária, que é a base do funcionamento dos sistemas digitais. Ao contrário de um sensor analógico, onde os valores possíveis são teoricamente infinitos, um sensor digital poderá apenas alternar entre certos estados bem definidos, não sendo possível haver um valor intermediário entre eles, a Figura (8) ilustra esses dois tipos de sensores.

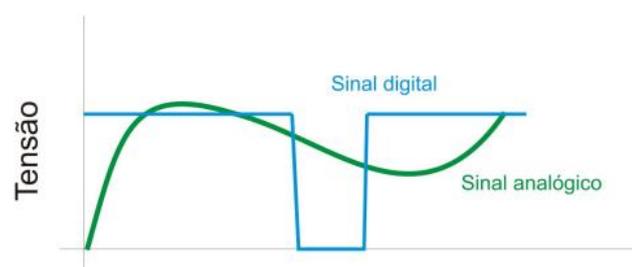


Figura 8: Comparação de um sinal analógico com um digital [11]

### 2.2.1. Sensores de temperatura

O **Termistor**, são resistência termicamente sensíveis. Os termístores são muito utilizados em aplicações que necessitem de uma alta sensibilidade com mudança à

temperatura, pois eles são extremamente sensíveis a mudanças relativamente pequenas de temperaturas, a Figura (9) representa o símbolo de um termistor.



Figura 9: Símbolo de um termistor [11]

Todavia não são lineares. A resposta da variação de temperatura não é linear à variação de sua resistência, mas pode-se obter a relação entre a resistência e a temperatura para faixas pequenas de variação de temperatura através da equação de Steinhart - Hart.

Existem dois tipos de termístores, NTC e PTC, assim classificados de acordo com sua resposta em função da temperatura. Os termístores NTC são os modelos mais comuns e são feitos de materiais semicondutores simples. Eles são assim denominados pois a resistência desses componentes diminui quando a temperatura aumenta, ou seja, eles possuem um coeficiente de temperatura negativo. Os termístores PTC são mais difíceis de serem encontrados, pois são constituídos de elementos mais complexos e, portanto, mais caros. Seu comportamento é contrário aos NTC, pois o aumento da temperatura faz com que sua resistência também aumente. Os termístores PTC são mais comumente aplicados para proteger circuitos eletrônicos de excessos de correntes, substituindo os fusíveis tradicionais.

Os gráficos a seguir ilustram como a resistência dos termístores NTC e PTC varia de acordo com a temperatura. Os fabricantes disponibilizam vários tipos de termístores, com diferentes curvas de resposta, temperaturas máximas e mínimas de operação e outras características, de modo que seu funcionamento seja adequado a determinadas aplicações.

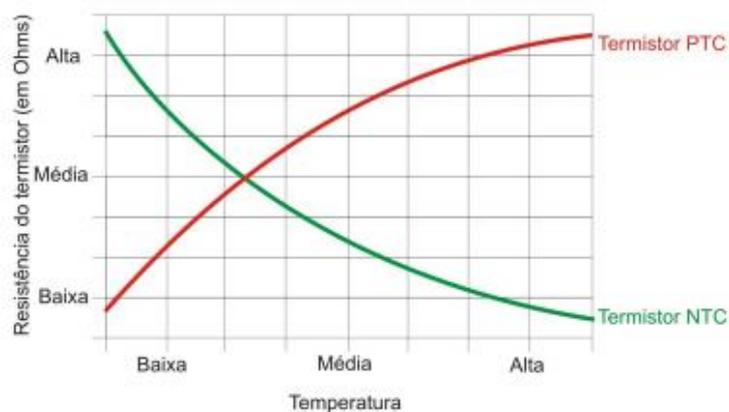


Figura 10: Gráfico de resposta dos termístores PTC e NTC [11]

Durante a utilização do termístor, é importante levar em consideração que ele apresenta uma faixa limite de operação. A temperatura adequada para a sua utilização varia de acordo com o fabricante e, caso não seja possível obter essa informação, é recomendado não expor o componente a temperaturas acima de 100 °C, que é o limite de alguns componentes disponíveis no mercado [11].

## 2.2.2. Circuitos de Interface com os Sensores

Existe uma grande variedade de configurações de circuitos que permitem medir o valor, ou as variações de valor, de resistência e capacitância, e que conjugados com um sensor resistivo ou capacitivo, formam uma “ferramenta” para medir variações de uma certa propriedade, tais como, a temperatura, humidade, luminosidade entre outros. Dentro dessas configurações existem: Divisor de Tensão, Circuito de filtragem ... etc.

### 2.2.2.1. Divisor de Tensão

O valor da variação de uma resistência, como por exemplo uma resistência de temperatura, pode ser determinado com um circuito divisor de tensão, cujo esquema elétrico está representado na Figura (11) e consiste em duas resistências ligadas em série, R1 e R2, onde é aplicada uma tensão de entrada  $V_{in}$  [12].

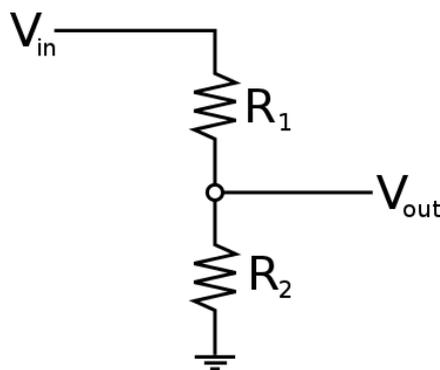


Figura 11: Circuito Divisor de Tensão [12]

A tensão de saída, representada por  $V_{out}$ , corresponde à tensão da resistência R2. O seu valor pode ser obtido através da seguinte equação (2.1):

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \times V_{in} \quad (2.1)$$

Para explicar o funcionamento deste circuito vai ser utilizado o exemplo de um termistor de temperatura. Desse modo, a tensão resultante nesse circuito será correspondente à temperatura do ambiente. Isso porque, como referenciado acima, a resistência do termistor está relacionada como a temperatura do ambiente ao seu redor. Substituindo R2 por um termistor NTC, que é o modelo mais comum, verifica-se que, com o aumento da temperatura, haverá um aumento da tensão no ponto entre R1 e R2. Pode-se comprovar na fórmula do divisor de tensão que isso ocorre pois, quanto menor for o valor de R2, maior será a tensão de saída. No lugar de R1, pode ser colocado uma resistência de um valor qualquer, desde que não seja muito baixo, para que a corrente elétrica no divisor de tensão não seja alta. É interessante colocar uma resistência cujo valor é o mesmo da resistência do termistor medido a temperatura ambiente. Desse modo, nessa condição, a saída do divisor de tensão seja aproximadamente a metade da tensão de alimentação.

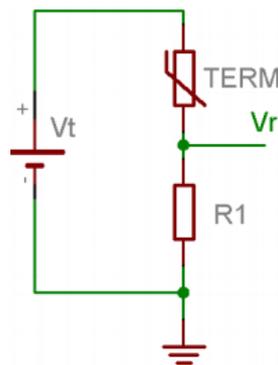


Figura 12: Divisor de tensão com NTC [11]

Se o termistor for colocado no lugar de R1 Figura (12), o divisor de tensão se comportará de forma contrária. A tensão de saída aumentará quando a temperatura diminuir.

#### 2.2.2.2. Circuito de filtragem

Os filtros eletrônicos são circuitos fundamentais e amplamente utilizados na aquisição e processamento de sinais. As áreas de telecomunicações, controle, instrumentação dentre outras, necessitam desses circuitos de forma indispensável, para o funcionamento dos seus diversos sistemas.

Um filtro eletrônico, basicamente, tem como função implementar a razão entre a tensão de saída pela tensão de entrada, em função da frequência. A resposta em frequência de um filtro é caracterizada por duas curvas, sendo uma o módulo e a outra a fase do sinal.

A função de transferência,  $H(s)$ , determina os componentes da curva resposta do filtro, que são: banda de passagem, banda de rejeição, frequência de corte e o fator de qualidade. Logo, para conhecer a resposta em frequência de um sistema, basta analisar o comportamento da sua função de transferência, quando a frequência varia de 0 até o infinito. Diversas topologias de filtros são conhecidas na literatura, sendo que cada uma delas apresenta características próprias das quais podem ou não atender as necessidades de um projeto.

A resposta em frequência do FPBI é caracterizada pela passagem de todo o sinal que apresente componentes de frequência inferior a frequência de corte,  $f_c$ , e atenuação total do sinal que apresente frequência maior que a frequência de corte. A Figura (13), ilustra a o comportamento do FPBI.

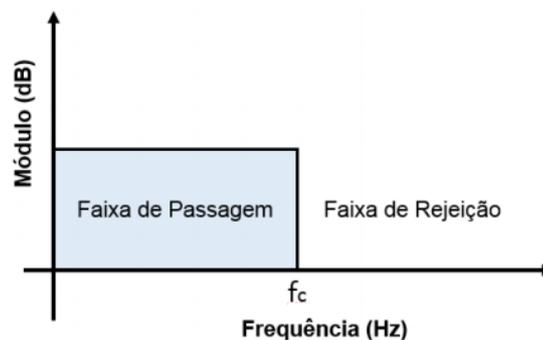


Figura 13: Resposta em frequência do FPBI [13]

Para os filtros ideais, observa-se a mudança instantânea da banda passante para a banda de rejeição, embora esses filtros possam ser implementados digitalmente, eles não podem ser realizados na prática com componentes eletrônicos.

Como visto anteriormente, é necessário limitar a largura de banda do sinal, para adequá-lo ao processo de aquisição de dados. Diante da necessidade foi escolhido um filtro passa-baixas ativo de segunda ordem, para eliminar a presença de frequências indesejáveis no sinal. Para a escolha do filtro foi levado em consideração:

- 1) Facilidade de implementação;
- 2) Resposta em frequência compatível com a necessidade;

- 3) A disponibilidade do amplificador operacional, no mesmo circuito integrado em que serão implementados os circuitos condicionadores de sinais [13].

Para a aplicação foi escolhido a topologia Sallen Key, bastante utilizado pela simplicidade na implementação de filtros: passa-baixo, passa-altas e passa-faixa. Consiste em uma topologia onde a função de transferência é obtida sem grandes dificuldades e permite controlar o ganho na faixa de passagem, podendo ser um ganho unitário ou de ordem superior.

O circuito da Figura (14), apresenta a topologia Sallen Key, para o filtro passa-baixo de segunda ordem [14].

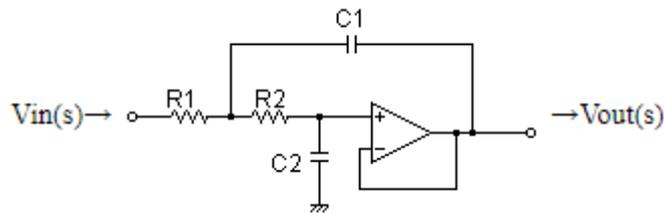


Figura 14: FPB segunda ordem ativo Sallen Key [14]

A função transferência para o Filtro é dada por:

$$\frac{Vout(s)}{Vin(s)} = \frac{1}{s^2 + \left(\frac{1}{R2C1} + \frac{1}{R1C1}\right) + \frac{1}{R1C1R2C2}} \quad (2.2)$$

A Frequência de corte para o Filtro é:

$$fc = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1C1R2C2}} \quad (2.3)$$

## Capítulo 3

### 3. Motor DC

Neste capítulo descrevo como funciona um motor DC, bem como fazer o seu acionamento através de algumas técnicas utilizadas, e por fim os tipos de motor utilizados numa Scooter elétrica.

#### 3.1. Funcionamento de motores DC

Para entender os modos acionamento de motores DC é necessário entender seus fundamentos. Os motores são normalmente formados por um ímã permanente fixo, que forma o estator, e um rotor que possui vários enrolamentos. Esse enrolamento gera um campo magnético que, em conjunto com o campo do ímã, gera um binário no rotor [15]. Para que se tenha uma saída com binário constante, os enrolamentos devem ser comutados continuamente, tarefa feita pelo comutador presente no rotor e pelas escovas, presa na carcaça do motor como apresenta na Figura (15).

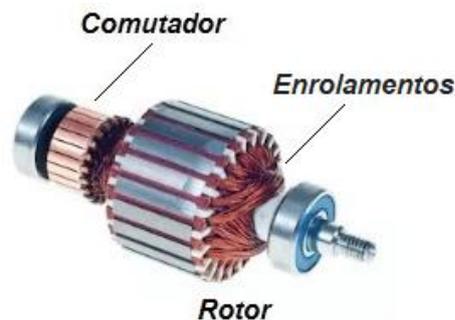


Figura 15: Rotor, explicitando o comutador e os enrolamentos do motor DC [16]

Eletricamente, o motor DC pode ser modelado por uma resistência, uma indutância e uma fonte de tensão, cujo valor é diretamente proporcional à velocidade do motor, todos em série [17].

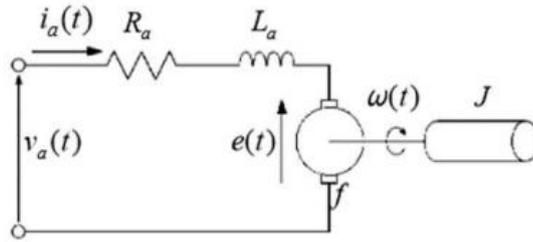


Figura 16: Modelagem elétrica de um motor DC [17]

Como se pode perceber pela Figura (16), a corrente no motor é expressa pela equação seguinte:

$$V_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a \times i_a + K \times \omega \quad (3.1)$$

Onde:

- **V<sub>a</sub>** é a tensão aplicada nos terminais do motor;
- **i<sub>a</sub>** é a corrente passando através do motor;
- **K** é uma constante que, multiplicada pela velocidade do eixo, gera a tensão induzida quando o rotor está girando (efeito gerador);
- **ω** é a velocidade angular do eixo;
- **J** é a inercia da carga.

### 3.2. Acionamento dos Motores

Ao analisar a modelagem dos motores DC, fica claro que variando a tensão nos terminais do motor, varia-se sua velocidade e caso seja necessário mudar a direção do motor, é necessário inverter os terminais do motor ou gerar uma tensão negativa entre seus terminais. Portanto, um controle simples em que um relé fica encarregado de inverter os terminais do motor e um regulador de tensão linear gera a tensão necessária para o acionamento do motor pode ser facilmente implementado.

Apesar de ser bem simples, essa abordagem tem problemas sérios, sendo o principal deles a baixa eficiência do circuito, especialmente em baixas tensões de acionamento, já que toda a energia que não é utilizada pelo motor é dissipada no regulador linear. Por exemplo, caso esse método fosse utilizado para controlar o motor NPC-T64, que possui uma resistência interna de aproximadamente 0.22 Ω e é acionado por uma tensão de 24

V, fazendo-o girar à metade de sua velocidade máxima, tendo 12 V nos seus terminais, teríamos uma corrente de 55 A passando também pelo regulador de tensão, que dissiparia os 12 V restantes. Isso geraria no total uma dissipação de potência de 660 W, o que seria inviável, já que essa potência seria desperdiçada em forma de calor que provavelmente queimaria o regulador de tensão caso ele não fosse grande o suficiente para dissipar eficientemente o calor para suportar tamanha potência [18].

Esse método ainda possui outro problema, este devido à indutância do motor. Ao utilizar o relé para inverter os terminais do motor, a corrente estará sendo desligada quase instantaneamente e, devido a isso, uma tensão muito grande será gerada pela indutância, gerando arcos nos terminais do relé, o que diminui sua vida útil [19].

### 3.2.1. Modulação por Largura de Pulso

Para conseguir uma eficiência maior e circuitos menores, é necessário utilizar um método diferente para variar a velocidade do motor, conhecido pela sigla em inglês de PWM.

Esse método consiste em ligar e desligar uma carga, neste caso o Motor, a uma frequência fixa através de um comutador, normalmente algum tipo de transístor (Bipolar ou MOSFET), fazendo com que seja aplicada no motor uma tensão média proporcional à relação entre o intervalo de tempo em que o comutador está fechado ( $T_{on}$ ), e o período da frequência de comutação ( $T$ ). A esta relação dá-se o nome de Duty Cycle ( $D$ ).

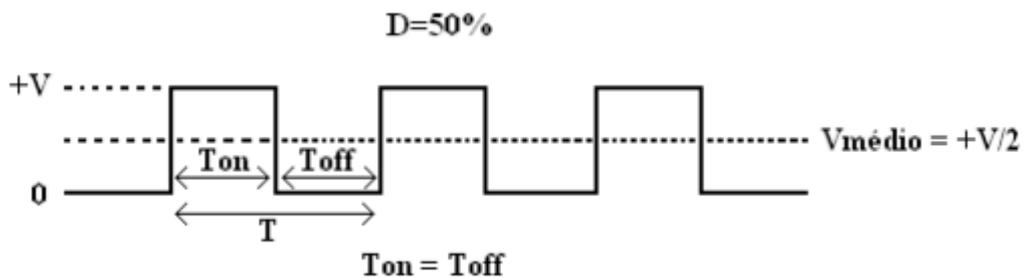


Figura 17: Sinal PWM [20]

Na Figura (17), está representado um sinal PWM com um Duty Cycle de 50% este pode ser calculado através da equação (3.2), sendo o valor médio da tensão aplicada no motor igual ao produto da tensão de alimentação (+V) pelo Duty Cycle ( $D$ ), equação (3.3):

$$D = \frac{T_{on}}{T} \times 100 \quad (3.2)$$

$$V_m = +V \times D \quad (3.3)$$

A Figura (18), é um exemplo de aplicação do PWM no controlo de velocidade de um motor DC, o sinal PWM abre e fecha o comutador a uma frequência fixa, a tensão dos pulsos aplicada ao motor é a tensão nominal eliminando o problema de controlo a baixas rotações, sendo a tensão média proporcional ao Duty Cycle.

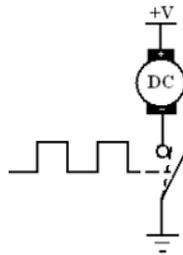


Figura 18: Implementação do controlo PWM [20]

Na figura (19), existem três formas de sinais PWM diferentes, todas tem a mesma frequência, mas Duty Cycles diferentes. A forma da esquerda (A) quando aplicada ao circuito da Figura (18), o motor rodaria com uma velocidade muito baixa, o tempo em que fica desligado é muito maior do que o tempo em que está ligado, sendo a tensão média aplicada ao motor baixa. Na forma de PWM (B), o tempo que está ligado com uma tensão nominal é igual ao tempo em que está desligado logo o valor médio de tensão é aproximadamente metade da tensão nominal sendo a velocidade também aproximadamente metade. A forma (C) é aquela em que o motor roda aproximadamente à velocidade nominal pois o valor médio de tensão aproxima-se do valor nominal.

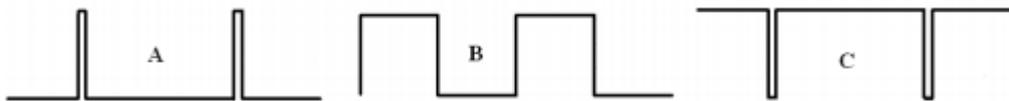


Figura 19: Sinais PWM com mesma frequência e Duty Cycles diferentes [20]

O controlo PWM é um controlo mais preciso, permite um controlo de baixa velocidade com precisão, e uma eficiência energética acima dos 90% dependendo do hardware utilizado [20 21].

Para tal, neste projeto foi usado um sinal de PWM, proveniente de uma das saídas digital do Arduino analogoutPin 9.

### 3.2.2. Ponte-H

A reversão do motor ainda é um problema utilizando os métodos citados anteriormente. As duas formas apresentadas para implementar a reversão são inverter os terminais do motor ou gerar uma tensão negativa para acioná-lo. Inverter os terminais é muito complexo, envolvendo a utilização de interruptores ou relés. Há também o problema do alto preço de componentes qualificados para suportar altas correntes, além do fato de ser necessário desconectar os fios momentaneamente para que os terminais sejam trocados. Já a opção de gerar tensão negativa também é inviável devido à complexidade do circuito necessário para isto, tendo uma bateria como alimentação principal do circuito.

Uma terceira opção é a utilização de uma ponte-H. Ela possui este nome devido à forma em que os interruptores e a carga estão dispostas no circuito. Ela é a melhor escolha por não ser necessário criar tensões negativas e nem desconectar os terminais para que eles sejam trocados.

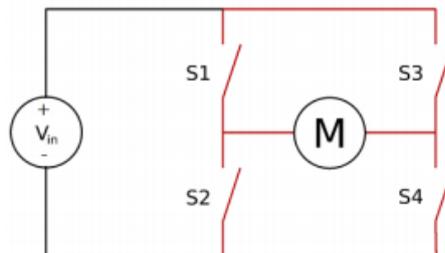


Figura 20: Ponte-H básica [22]

A Figura (20) mostra uma ponte-H básica. Fechando os interruptores S1 a S4 numa ordem fixa, pode-se fazer o motor girar para frente, para trás, assim como frear o motor. Outra vantagem é o fato de os interruptores poderem ser transístores que podem ser comutados rapidamente, suportando altas correntes, sendo baratos e acessíveis [23].

### 3.3. Tipos de motor de uma Scooter Elétrica

Geralmente, o motor de uma scooter elétrica pode ser amplamente classificado em duas partes principais, que são:

- Motores gerados pelo uso do motor de cubo;
- Motores de sistema corrente.

Em primeiro lugar, o motor de cubo é um motor elétrico alojado dentro do cubo da roda dianteira ou traseira. Em geral, um motor de cubo dianteiro cria uma tração nas quatro rodas. O motor de cubo também costuma ser usado por bicicletas elétricas. A diferença clara entre a scooter elétrica e a bicicleta elétrica, é que a bicicleta elétrica, possui um pedal para andar, enquanto que a scooter elétrica usa apenas um acelerador para controlar a velocidade da scooter. A Figura (21) apresenta um motor de cubo.



Figura 21: Motor de cubo [24]

A scooter elétrica de motor de cubo cria uma tração nas quatro rodas porque o motor aciona a roda dianteira ou traseira. O sistema do motor do cubo de uma scooter elétrica é fácil de instalar ou remover da roda porque não há um sistema de engrenagem para lidar com a corrente. A motor de cubo pode fornecer uma distribuição de peso da scooter mais equilibrada se a bateria estiver montada na parte central ou traseira da scooter. Um projeto em que se aplica essa tecnologia pode ser observado na figura a seguir.

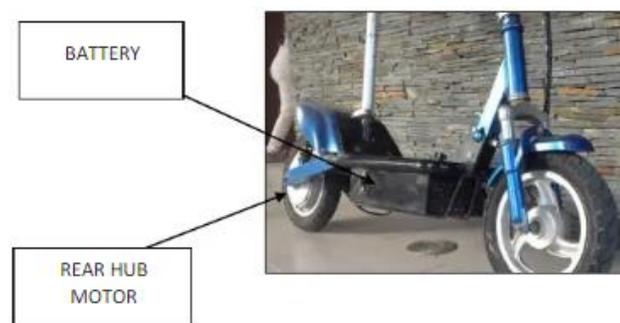


Figura 22: Motor de Cubo traseiro [24]

A scooter elétrica que usa o motor de corrente, o motor de corrente é instalado com corrente, roda dentada e a engrenagem para mover a scooter. A corrente possui um mecanismo diferente entre o motor de cubo e o de motor de corrente, porque o motor de cubo não usa nenhuma engrenagem enquanto o motor da corrente tem uma engrenagem, a Figura (23) apresenta um motor de corrente instalado em uma scooter, foi o mecanismo utilizada no protótipo.



*Figura 23: Motor de corrente instalado em uma Scooter [24]*

Normalmente, para a scooter elétrica, o motor da corrente é instalado e conectado no pneu traseiro da scooter [24].

# Capítulo 4

## 4. Hardware

Este capítulo tem como objetivo descrever todo o *hardware* usado no sistema, onde o circuito PCB foi desenvolvido pelo técnico do LSE, onde tive o privilégio de estar presente no seu desenvolvimento, portando para o caso de estudo o PCB foi utilizado para realizar o condicionamento de sinal e realizar a atuação.

### 4.1. Arquitetura do Sistema

O sistema desenvolvido é constituído pelos componentes apresentados na Figura (24), nomeadamente:

- Motor DC;
- Circuito de Potência;
- Circuito de Alimentação;
- Circuito de Segurança (Relé);
- Principais componentes do sistema de controlo.

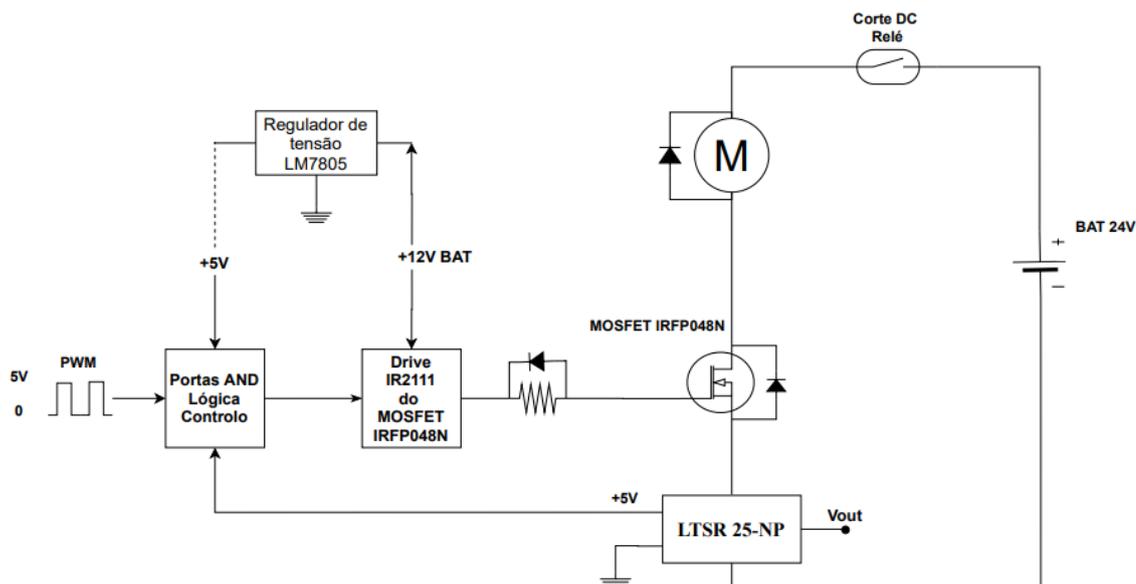


Figura 24: Diagrama de blocos do sistema

### 4.1.1. Motor DC da Scooter

A especificação do *hardware* começa sempre a partir de um motor, o ideal é encontrar um motor cujos parâmetros sejam fornecidos pelo fabricante. A Scooter proposto está equipada com o motor MY1050, os dados mais revelantes, gravados na placa do motor, encontram-se transcritos na Tabela (1).

*Tabela 1: Características do motor MY1050*

<b>Modelo</b>	MY1050
<b>Tensão de alimentação</b>	24 VDC
<b>Corrente nominal</b>	27 A
<b>Potência contínua nominal</b>	500 W
<b>Velocidade do rotor em vazio</b>	2400 RPM

### 4.1.2. Circuito de Potência (DRIVE)

No tópico abaixo, o tipo de interruptor eletrônica comumente utilizada “MOSFETS” será analisada, descrevendo a sua utilidade, também o seu controlador.

#### 4.1.2.1. Transístores de Efeito de Campo

O transístor de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico (MOSFET) de potência, é um dispositivo que pode funcionar como interruptor em níveis de potência.

Os terminais principais são o Dreno e a Source, com a corrente fluindo do Dreno para a Source e sendo controlada pela tensão entre a Gate e a Source. Existem dois tipos essenciais: o canal N e o canal P, que se distinguem pela polarização. Abaixo apresenta o símbolo do MOSFET do tipo canal N [25].

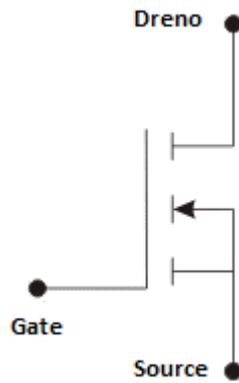


Figura 25: Símbolo MOSFET canal N de potência [25]

O MOSFET infelizmente sozinho não consegue bloquear uma tensão reversa entre Dreno e Source. Isto deve-se ao diodo acoplado internamente a sua estrutura em antiparalelo. Este diodo é chamado de diodo de corpo e serve para permitir um caminho de retorno para a corrente para a maioria das aplicações de interruptor [26]. Este diodo é visto na Figura (26).

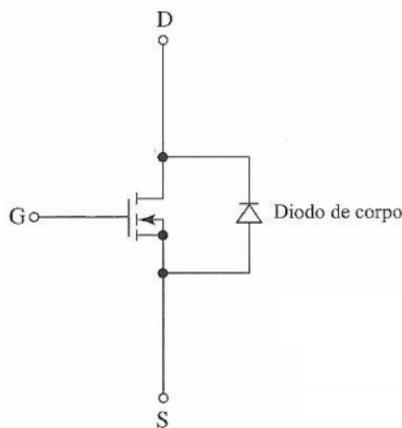


Figura 26: MOSFET canal N com diodo de corpo [26]

Em termos de aplicações, os MOSFET são usados em circuitos com resistência controlada por tensão e em circuitos de comutação.

#### 4.1.2.2. Escolha de um MOSFET

Escolher o MOSFET de potência que será usado para conduzir a corrente requerida pelo motor DC é uma parte importante. Esta escolha depende da tensão máxima e corrente máxima do motor, da frequência de comutação, que terá de ser mais elevada que a frequência de PWM usada nos sinais de entrada e da resistência  $R_{DSon}$  (resistência entre o Dreno e a Source quando o MOSFET está saturado), que, idealmente, deverá ser o mais

baixa possível. Se não for possível encontrar um MOSFET com uma corrente de Dreno suficiente, é possível conectar mais que um em paralelo de forma a aumentar o valor máximo da corrente de Dreno.

A Figura (27) apresenta o MOSFET IRFP048N utilizado, este é caracterizado pelas elevadas frequências de comutação na ordem dos 1.0 MHz e pela sua baixa resistência de condução (tipicamente  $0.016 \Omega$ ). Este MOSFET tem uma tensão de ruptura de 55 V e uma corrente contínua no dreno de 64 A [27].

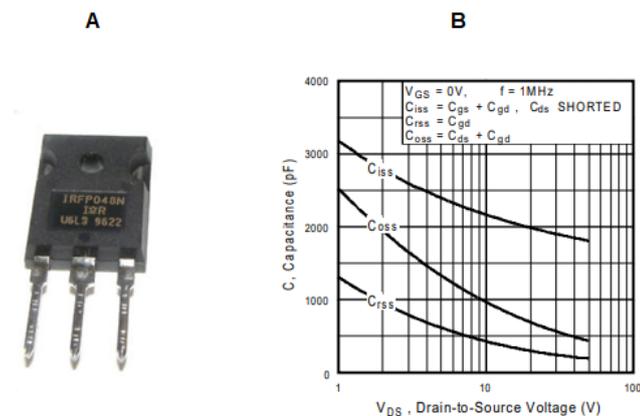


Figura 27: A) MOSFET de potência IRFP048N, B) Curva da Capacidade (pF) Vs Tensão entre o Dreno e a Source (V) [27]

#### 4.1.2.3. Controlador de MOSFET DRIVE

O controlador tem a função de acionar o MOSFET de potência uma vez que por si só não consegue acionar o motor. Ainda utilizada de interface entre o microcontrolador e o circuito de potência, de forma que os sinais PWM gerados pelo microcontrolador “excitem” as entradas do Circuito de potência.

Em geral, para ativar um MOSFET de potência, a Gate deve apresentar uma diferença de potencial de pelo menos 10 volts (dependendo do MOSFET utilizado) em relação à Source (terminal do MOSFET) (e cerca de 4 volts para MOSFET de nível lógico). Este valor é um pouco superior ao parâmetro  $V_{gsth}$  (tensão para a qual o MOSFET começa a conduzir).

Uma característica dos MOSFET de potência é que estes têm uma grande capacidade elétrica parasita entre a Gate e os restantes terminais,  $C_{iss}$ . O efeito disto é que, quando um impulso chega ao Gate, é necessário, primeiramente, carregar esta capacidade elétrica parasita, só depois disto acontecer é que o Gate do MOSFET é carregado. Por

consequente, o circuito do controlador MOSFET deve ser capaz de fornecer uma corrente razoável, para que esta capacidade elétrica parasita carregue o mais rápido possível. A melhor forma de alcançar estas exigências é utilizando um controlador MOSFET.

**Drive IR2111**, este controlador é caracterizado pelas altas frequências de comutação, e a capacidade de controlar uma ponte-H constituída por um MOSFET que apresentam uma baixa resistência de condução. A Figura (28A) apresenta o dispositivo controlador e a Figura (28B) a descrição das suas entradas e saídas [28].

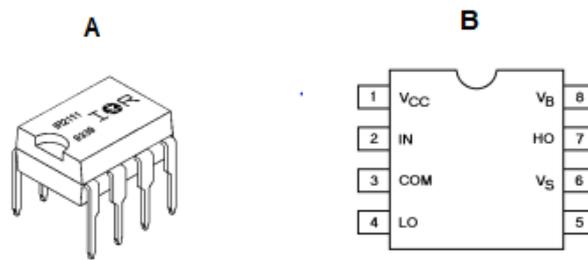


Figura 28: Controlador MOSFET Drive: A) Encapsulamento IR2111 e B) Pinout IR2111 [28]

A Figura (29) apresenta um esquema tipicamente de conexão desse controlador Drive.

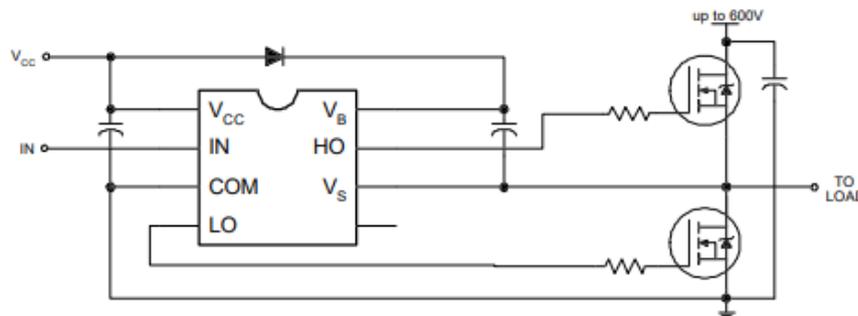


Figura 29: Esquema de ligação típica do IR2111 [28]

#### 4.1.2.4. Portas AND Lógica de Controlo

Foi utilizado portas AND para quando houver falha do PWM, a porta AND funciona como um interruptor do PWM fazendo com que quando não haja PMW a lógica de controlo inibe o PWM desligando o MOSFET e a seguir o Motor DC da scooter.

### 4.1.3. Sistema de Energia da Scooter

Como todos os veículos elétricos precisam de uma fonte de alimentação, uma Scooter não é exceção, neste tópico apresentam-se as baterias que têm como objetivo alimentar todos os circuitos existentes no projeto.

Para o projeto foi utilizado duas baterias da marca Ultracell modelo UCG 20-12(12V 20Ah/20HR), com ligações em série, esse bloco de baterias tem como principal objetivo de fornecer energia ao Motor DC da Scooter elétrica.

As baterias podem estar ligadas em série ou em paralelo e é fundamental que sejam iguais e tenham o mesmo nível de carga. As conexões em série de baterias consistem em ligar o polo positivo da primeira bateria com o polo negativo da bateria seguinte Figura (30). As baterias ligadas em série mantêm a capacidade e aumentam a tensão elétrica [29].

$$I = I_1 = I_2 = \dots I_n \quad (4.1)$$

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (4.2)$$

As duas baterias UCG 20-12 de 12 V e 20 Ah são ligadas em série fornecem uma tensão elétrica de 24 V e uma capacidade de 20 Ah (pode se observar nos anexos o sistema de ligação das baterias).



Figura 30: Ligação em série de baterias

Para a alimentação do circuito Drive foi utilizada uma bateria RS Pro, 537-5472 (12V 3.2AH/20HR), essas baterias são recarregáveis de longa duração, e consta com uma capacidade de 3.2 Ah e com uma Voltagem Nominal de 12 V [30].

#### 4.1.3.1. Circuito de Alimentação

O sistema está projetado para funcionar entre os 5 V e os 24 V, facilitando a integração com outros sistemas, sendo neste caso usado o Arduino.

O Arduino Uno é alimentado através da conexão USB. O sensor de corrente é alimentado através do Arduino UNO. Para o circuito de potência foi preciso uma outra fonte extra de alimentação que são os 24 V do bloco de baterias Ultracell.

Para conectar o Microcontrolador ao circuito controlador de MOSFET precisamos de uma tensão até os 5 V, como o circuito controlador está a ser alimentado pela bateria RS Pro de 12 V, para isso é necessário de utilizar um regulador de tensão para converter esses 12 V de alimentação do circuito controlador em 5 V.

**Circuito LM7805**, o regulador está encarregue de fornecer a corrente e tensão de alimentação ao Controlador MOSFET, com um pico máxima de 0,25 A [31].

Este é um regulador de tensão positiva de três terminais, com uma tensão de saída fixa, de 5 V. O esquemático utilizado para o regulador de tensão encontra-se apresentado na Figura (31).

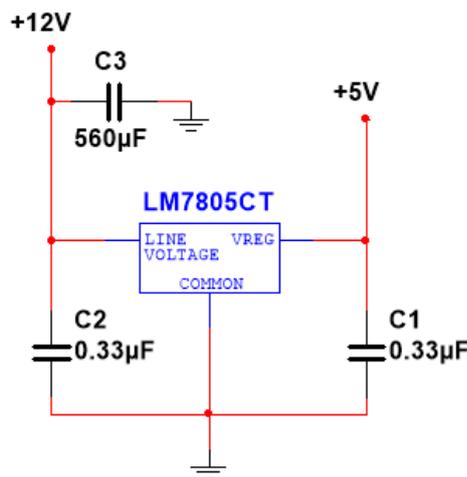


Figura 31: Circuito LM7805

#### 4.1.4. Circuito de Segurança Relé (corte DC bateria 24 V)

O relé é um circuito que funciona como um interruptor. Quando uma tensão é aplicada no lado de baixa tensão, o lado de alta tensão passa a conduzir, ou seja, o interruptor fica fechado. Para o sistema de segurança foi escolhido um Relé de estado sólido da marca Zelio modelo SSP1 ilustrada na Figura (32), este relé pode suportar correntes até 40 A e tem uma tensão de saída que varia de 1 a 150 VDC [32].



1. Terminais de parafuso de conexão de saída de carga
2. Terminais de parafuso de conexão de entrada de controle
3. Indicador LED de tensão de entrada de controle
4. Área de indicação para etiquetas ou marcações do produto

Figura 32: Relé SSP1D440BD [32]

## 4.1.5. Principais Componentes Do Sistema De Controle

### 4.1.5.1. Circuito Integrado – TLC272CP

Os AmpOp's são componentes amplamente utilizados na eletrônica, devido à sua versatilidade e, principalmente, por possibilitarem implementar operações matemáticas com os sinais. Foi utilizado no projeto o circuito integrado TLC272CP, a Figura (33) apresenta a configuração dos pinos do circuito integrado [33].

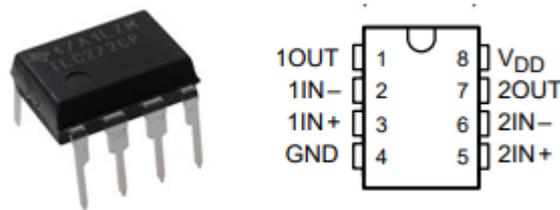


Figura 33: Amplificador operacional, TLC272CP e Pinout [33]

Um AMPOP é um componente que apresenta características próximas a de um componente ideal, dentre elas [34]:

- Impedância de Entrada Infinita;
- Impedância de Saída zero;
- Ganho de Tensão Infinito.

### 4.1.5.2. Sensor De Corrente

Para a medição de corrente do Motor utilizou-se o sensor de referência LTSR 25-NP, efeito Hall de núcleo fechado da LEM, que apresenta características desejáveis, sendo

a primeira a isolamento galvânica entre o circuito de potência e o de medição. A Figura (34) representa o sensor [35].

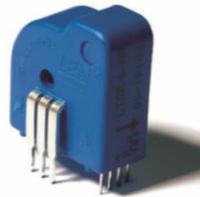


Figura 34: Sensor LTSR 25-NP [36]

A Tabela (2) apresenta um conjunto de características do sensor de corrente. Este sensor funciona com tensão de 5 V, o que facilita a sua integração com a plataforma Arduino.

Tabela 2: Características do sensor LTSR 25-NP

Característica	Valor	Unidade
Tensão de alimentação	5	V
Corrente Primário RMS	25	A
Corrente Primário Máx.	80	A
Sensibilidade de saída	25	mV/A
Temperatura de operação	[-40, 85]	°C

O **LTSR 25-NP** é um sensor que permite ter à sua saída um sinal em tensão que é proporcional à corrente na entrada e que nos permite saber a corrente que o motor está a consumir. O seu princípio de funcionamento baseia-se no mesmo dos transformadores: um primário com uma espira que é a nossa corrente e um secundário com um número muito superior de espiras de forma a reduzir a corrente. Na Figura (35) apresenta-se esse esquema.

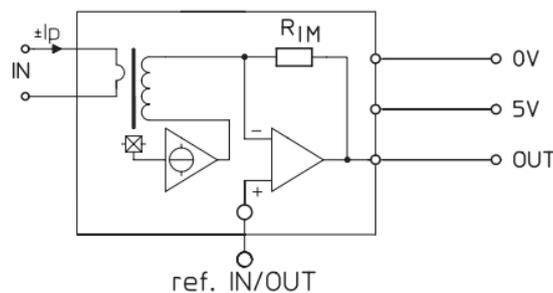


Figura 35: Esquema de conexão do LTSR 25-NP [36]

A sua função de transferência é variável, já que este sensor possui 6 pinos que podem ser ligados de forma diferente, permitindo a utilização de diferentes gamas de leituras sendo isso feito à custa da variação no número de espiras do secundário. O sensor é configurado de acordo com a corrente nominal da aplicação. A configuração é vista na Figura (36).

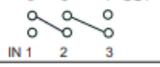
Number of primary turns	Primary nominal RMS current	Nominal output voltage <sup>1)</sup> $V_{out}$	Primary resistance $R_p$ [mΩ]	Primary insertion inductance $L_p$ [μH]	Recommended connections
1	±25	2.5 ±0.625	0.18	0.013	
2	±12	2.5 ±0.600	0.81	0.05	
3	±8	2.5 ±0.600	1.62	0.12	

Figura 36: Configuração do sensor, com base na corrente de entrada [36]

A corrente nominal do sistema é de 10 A, logo o sensor foi configurado para essa situação, apresentada na Figura (37).



Figura 37: Configuração de ligação do Sensor LTSR 25-NP [36]

A relação entre entrada e saída é linear, do tipo que se apresenta no gráfico da Figura (38), e tem a seguinte função de transferência:

$$V_{out} = I_{[A]} \times G + V \quad (4.3)$$

Onde:

- **V<sub>out</sub>** é o sinal de saída do sensor (analogin);
- **V** quando o sensor tem I=0 (V=2.5 volts);
- **G** é a sensibilidade do sensor em mVperAmp (= 0.025 volts).

Convertendo esse sinal de tensão em corrente obtemos a seguinte equação:

$$I_{[A]} = \frac{V_{out} - V}{G} \quad (4.4)$$

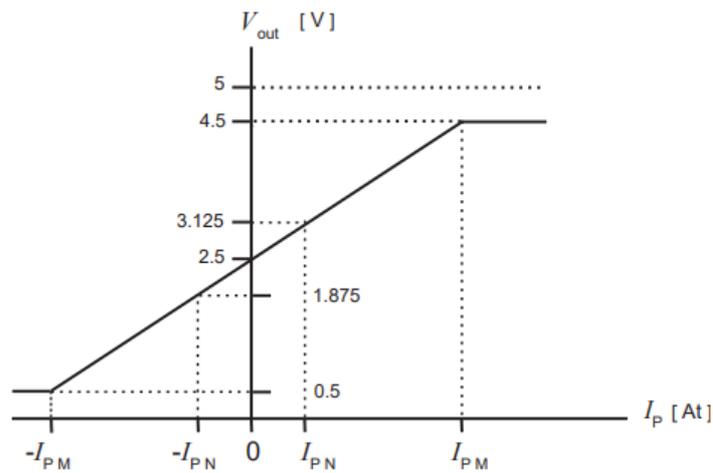


Figura 38: Gráfico de saída em tensão do LTSR 25-NP [36]

De assinalar o facto de que a tensão de offset pode variar entre 2.475 V e 2.525 V [36].

#### 4.1.5.3. Sensor De Temperatura NTC 10K

Dado que em muitas aplicações existe a necessidade de utilizar sensores não lineares para a medição de grandezas físicas, nesta secção desenvolveu-se um sistema de monitorização de temperatura em graus Celsius. O sensor definido para o projeto precisava ser um sensor de boa precisão que trabalhasse com temperaturas positivas pelo menos até 100 °C, de boa velocidade de resposta e se possível que trabalhasse com tensão nominal de 5 V.

Foi utilizado um sensor de temperatura não linear do tipo NTC de 10 KΩ significa que na temperatura de 25 °C sua resistência eléctrica é de 10 KΩ [37].



Figura 39: Termístor NTC 10KΩ [37]

A curva que defini o comportamento da temperatura em relação à resistência tem um comportamento exponencial, como pode ser visto no gráfico da Figura (40) [38].

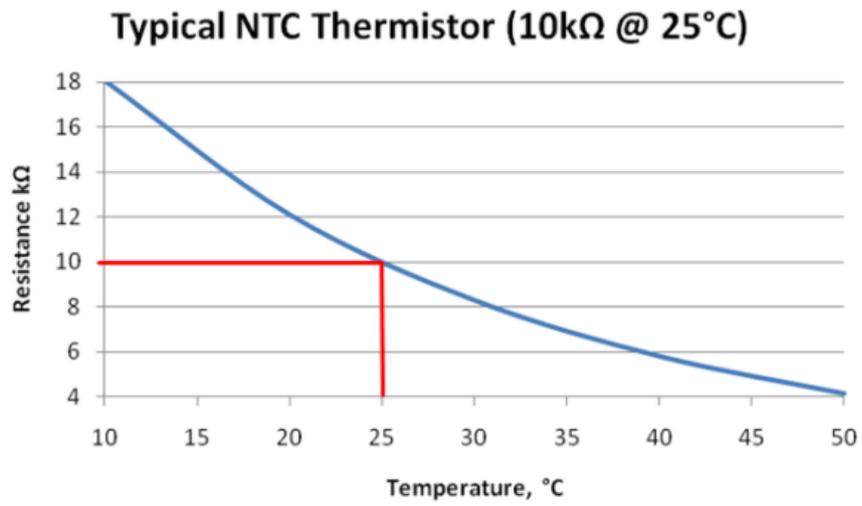


Figura 40: Curva resistiva característica do Termistor NTC 10K [38]

A curva de calibração desse termistor obtém-se através da equação Steinhart-Hart projetado no software Arduino.

# Capítulo 5

## 5. Sistema de Monitorização e Controlo

Nesse capítulo será apresentado o sistema, proposto para medição da corrente, tensão, da temperatura e controlo de velocidade. Será mostrado, ainda, as funções de cada etapa do sistema, bem como as suas principais características de funcionamento. Além disso, será apresentado o microcontrolador utilizado para processamento das informações e o software responsável pelo processamento dos sinais.

### 5.1. Sistema De Aquisição De Dados

O sistema de aquisição de dados compreende todas as etapas envolvidas no processo de aquisição, condicionamento, processamento e monitorização dos sinais de corrente, tensão e da temperatura do sistema.

Na Figura (41) apresenta um diagrama de blocos representativo do fluxo das etapas por onde os sinais passam na placa de aquisição de dados.

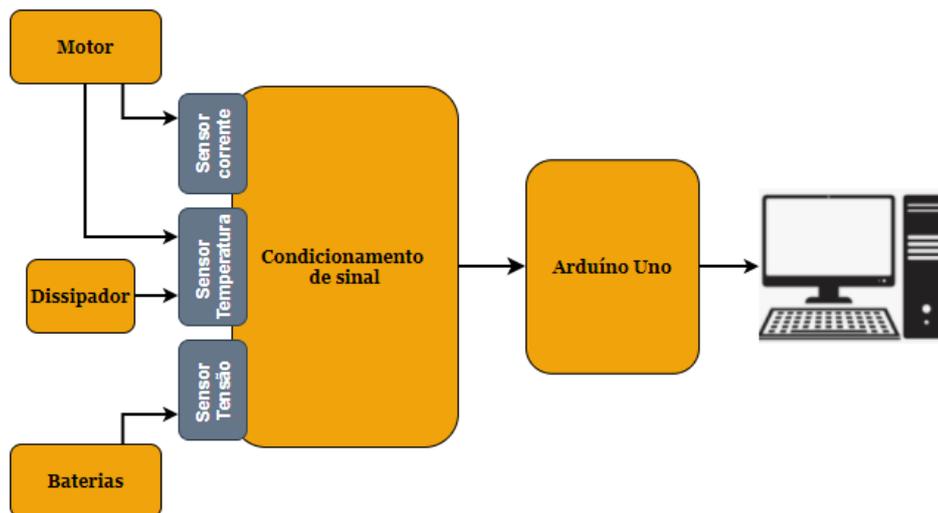


Figura 41: Sistema de controlo

A metodologia utilizada para a apresentação dos processos, consiste primeiro em simplificar as etapas em blocos, segundo fazer uma breve descrição de cada um deles e

posteriormente descrever de forma detalhada o funcionamento de cada bloco. O diagrama de blocos de maneira simplificada é apresentado na Figura (42).

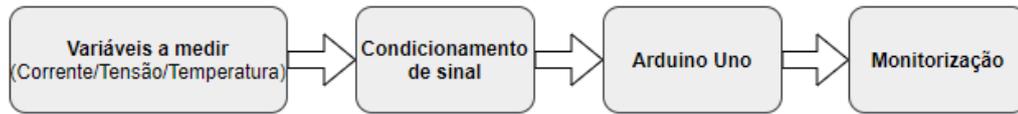


Figura 42: Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados

### **Etapa 1 - Variáveis do sistema**

Nesta etapa são definidas as variáveis a serem adquiridas, no presente caso a corrente, tensão e temperatura, e que serão medidas pelo sistema de aquisição de dados Arduino.

### **Etapa 2 - Condicionamento de Sinal**

O Condicionamento de Sinal envolve todo o processo relacionado com a adequação do sinal a níveis compatíveis com os níveis necessários para o conversor A/D. Tem início no ajuste do offset tensão saída do sensor de corrente para valores de tensão que possam ser utilizados pelos componentes das fases seguintes, sendo finalizado com a aplicação do filtro passa-baixo Sallen Key de 2ª Ordem, resultando em um sinal propício a digitalização.

### **Etapa 3 - Arduino Uno**

É a etapa do processo em que ocorre a digitalização e o processamento do sinal. Além disso, nessa etapa ocorre a transmissão dos dados para a etapa de monitorização. Os dados são transmitidos ao computador através da comunicação série, via porta USB.

### **Etapa 4 - Monitorização**

Nesta etapa os dados processados são enviados para um computador, onde o usuário pode visualizar as variáveis do sistema. Para verificar os valores do sistema de medida, basta a utilização do software que leia a porta série do computador.

## **5.2. Condicionamento de Sinal**

Condicionamento de sinal, consiste na etapa do processo responsável por adquirir os sinais da corrente do motor, tensão das baterias e de temperatura dos componentes do sistema precisamente no dissipador, e adequá-los aos níveis da entrada do conversor A/D.

O condicionamento de sinal é composto por três circuitos, sendo o primeiro responsável pelo tratamento do sinal de corrente e o segundo pelo tratamento do sinal de tensão e o por último a de Temperatura. A tensão na entrada do conversor A/D, deve estar limitada entre 0 e 5 V como apresenta a Figura (43).



Figura 43: Sinal de Tensão compatível com o conversor A/D [10]

### 5.2.1. Circuito de condicionamento de sinal de corrente

O circuito de condicionamento de sinal de corrente na forma de diagrama de blocos é apresentado na Figura (44).

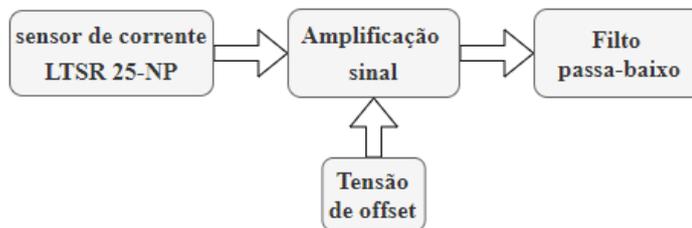


Figura 44: Diagrama de blocos do circuito controle de corrente

O primeiro bloco corresponde ao sensor de corrente LTSR 25-NP, que fornece uma tensão de saída proporcional a corrente de entrada. O sensor foi configurado para uma corrente nominal de 10 A, a Figura (45) apresenta a conexão do sensor.

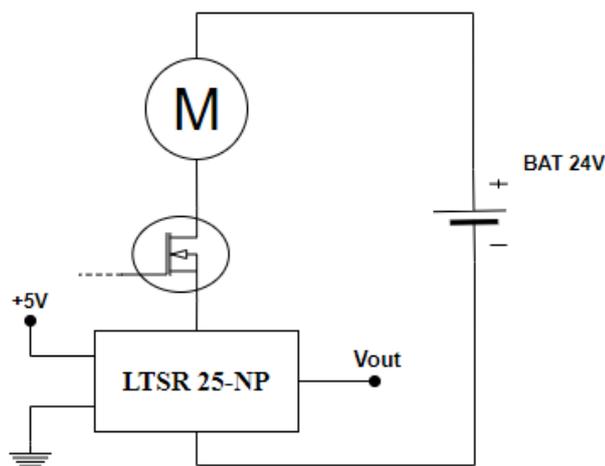


Figura 45: Ilustração da conexão do Sensor de Corrente LTSR 25-NP

O passo seguinte consiste em ajustar a tensão de saída já que o sensor apresenta um offset que se torna necessário retirar já que não traduz nenhuma parte da entrada, mas sim uma necessidade técnica inerente ao próprio funcionamento do Sensor.

O circuito de condicionamento de sinal processa o sinal de tensão obtido através do sensor de Corrente. A partir da equação (4.3), observando o gráfico de saída em tensão do LTSR 25-NP entre os [2.5 e 4.5] V, valores que possibilitam a leitura de corrente através do microcontrolador, cujo conversor A/D aceita valores entre [0 , 5] V, sendo os 5 V tensão de funcionamento do microcontrolador.

Como o sensor tem uma saída que varia entre 2.475 V e 2.525 V, com o objetivo de reduzir o erro quando este sinal for adquirido, é utilizado um amplificador inversor com ganho -2.2 obtido por  $(-R2/R1)$ , especificamente o TLC272CP cujo esquemático é apresentado na Figura (46).

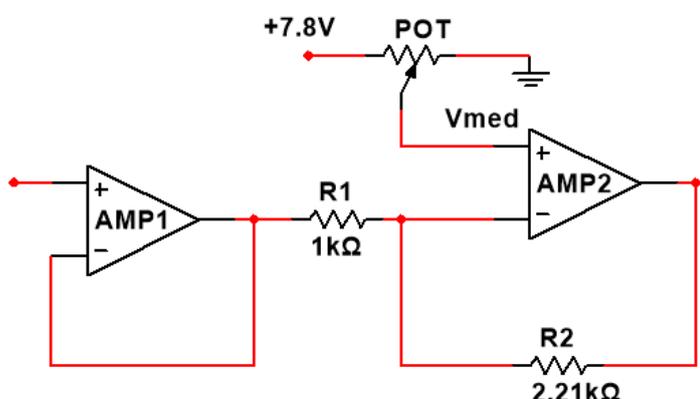


Figura 46: Circuito implementado para retirar tensão de Offset

O sinal do Sensor é aplicado à entrada 3 (VIN+) do seguidor e um sinal de referência aplicado à entrada 3 (VIN+) não inversora do segundo andar da amplificação. O sinal de referência consiste num Potenciômetro, aplicado à uma tensão DC de (+7.8 V , GND), para ajustar o sinal de saída do sensor para um intervalo entre [0 e 5] V.

Por fim, a saída do circuito de condicionamento de sinal, é a seguinte equação (5.1):

$$V_{outLEM} = -V_{sensor} \times \left(\frac{R2}{R1}\right) + V_{med} \quad (5.1)$$

A saída do amplificador (VoutLEM) é conectada diretamente ao pino analógico A0 Arduino.

$$V_{outLEM} = \frac{\text{analogin A0} \times 5}{1023} \quad (5.2)$$

Resolvendo em ordem a Vsensor (sinal gerado pelo amplificador inversor), obtém-se equação (5.3):

$$V_{sensor} = \left( \frac{V_{outLEM} - V_{med}}{-\frac{R2}{R1}} \right) \quad (5.3)$$

A seguinte equação, com base na equação (5.3), é utilizada para calcular a corrente do motor, sendo o analogin A0 o resultado da conversão A/D depois de efetuar a leitura de tensão à saída do amplificador obtém-se a corrente:

$$I[A] = \left( \frac{V_{sensor} - 2.5}{0.025} \right) \quad (5.4)$$

O seguinte passo consiste no filtro passa-baixo Sallen Key segunda ordem conforme Figura (47):

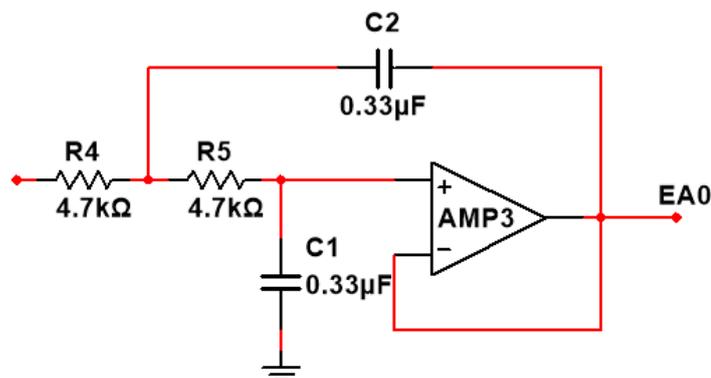


Figura 47: Filtro ativo passa-baixo de 2ª ordem Sallen Key

### 5.2.1.1. Filtragem do Sensor de Corrente

O pressuposto de criação do filtro passa-baixo Sallen key de segunda ordem, tem como objetivo de filtrar o sinal de saída do sensor de corrente para uma frequência de corte aproximadamente 100 Hz.

Os componentes do filtro foram escolhidos aleatórios, logo temos:

- Resistências:  $R4 = R5 = 4.7 \text{ k}\Omega$ ;
- Condensadores:  $C1 = C2 = 0.33 \text{ }\mu\text{F}$ .

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R4C1R5C2}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{4.7e3 \times 0.33e^{-7} \times 4.7e3 \times 0.33e^{-7}}} = 102 \text{ Hz} \quad (5.5)$$

A função de transferência desse filtro é uma função de segundo grau ela foi obtida em ferramentas computacionais OKAWA Electric Design Figura (48). A função de transferência que representa o filtro Sallen Key de segunda ordem é:

$$G(s) = \frac{415696.53487839}{s^2 + 1289,4906511928 s + 415696,53487839} \quad (5.6)$$

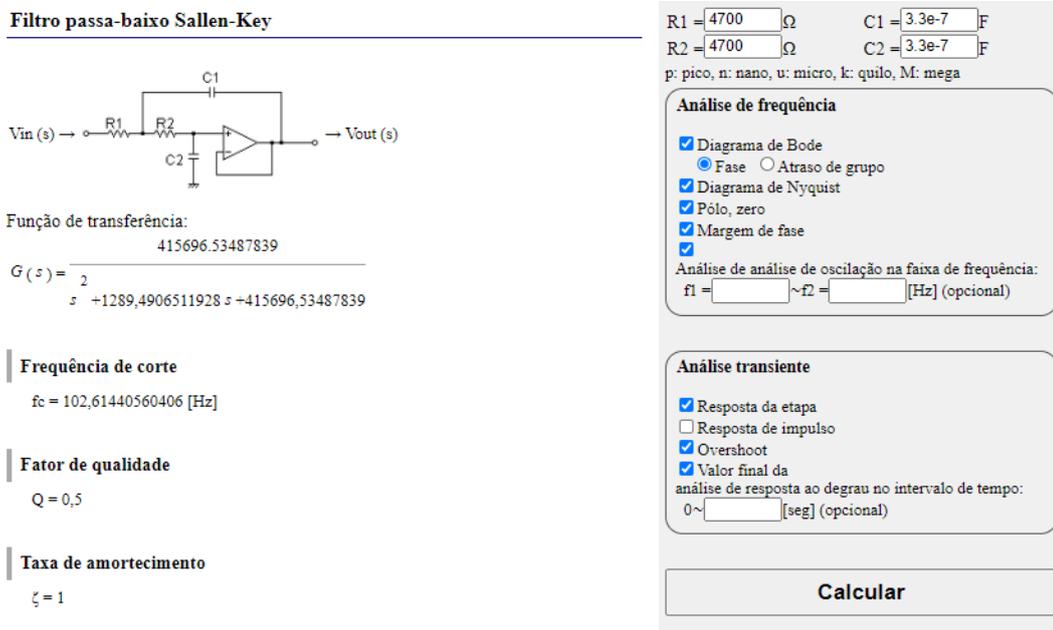


Figura 48: Simulação da frequência de corte no OKAWA Electric Design

Para traçar o gráfico de diagrama de bode para apresentar o ganho e a frequência de corte utilizou-se o software MatLab com a função transferência foi obtida no site OKAWA electric desing. Abaixo é apresentado o código MatLab.

```

% clear everything
close all
clear all
clc
%Codigo referente ao diagrama de Bode do filtro Sallen Key passo abaixo
%segunda ordem
%
%
% Transfer Function: G(s) = 1000000/s2+2000s+1000000
%
% Numerator
num = [415696.53487839];
% Denominator
den = [1 1289.4906511928 415696.53487839];

% Transfer Function
G = tf(num, den)

% Plot Frequency Response
bode(G), grid

```

É possível notar que o gráfico de resposta em frequência e a fase da função transferência caracterizam bem o filtro Sallen key de segunda ordem. Para encontrar a frequência de corte, encontrei o ponto de -6 dB da resposta em frequência na Figura (49) obtida através do código MatLab.

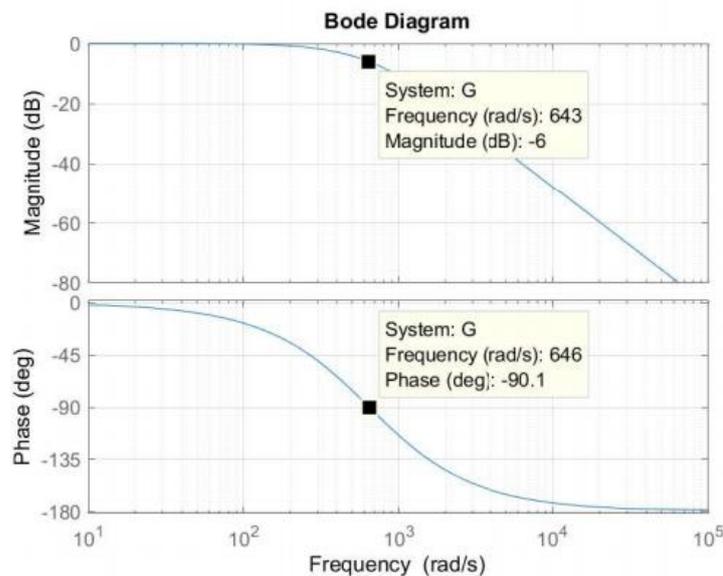


Figura 49: Gráfico de Frequência de Corte em MatLab

O ponto do gráfico é exatamente onde temos a frequência de corte logo temos:

$$f_c = \frac{f_{rad/s}}{2\pi} = \frac{643}{2\pi} = 102.33 \text{ Hz} \quad (5.7)$$

O resultado da Eq. (5.7) condiz com a realidade, já que foi projetado o circuito com uma frequência de corte de 100 Hz. Além disso, a frequência simulada do circuito no OKAWA Electric Design ficou em  $f_c = 102,61$  Hz, ou seja, todas as frequências saíram como esperado.

A resposta em frequência do projeto para frequências baixas está representada no gráfico da Figura (50), onde o CH1 é a tensão de entrada ( $V_{in}$ ) e o CH2 é a saída ( $V_{out}$ ) do filtro.

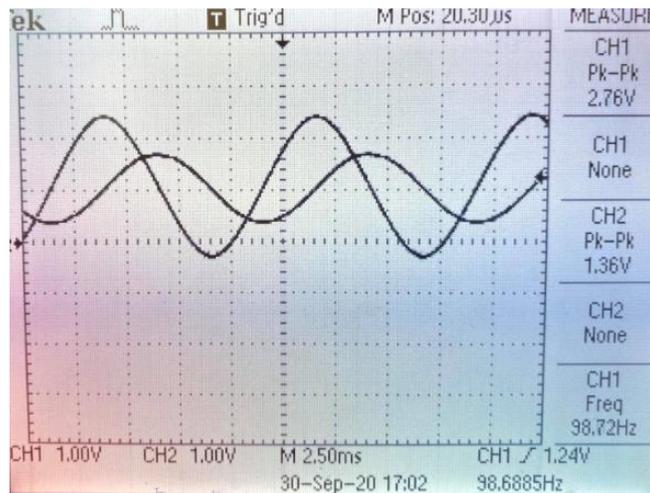


Figura 50: Gráfico do Ganho

Pode observar que o sinal de entrada é 2.76 V Pk-Pk e o sinal de saída é 1.36 V Pk-Pk, Logo:

$$Ganho = 20 \text{LOG} \left( \frac{1.36}{2.76} \right) = -6.1 \text{dB} \quad (5.8)$$

O circuito completo implementado para o sensor de corrente é apresentado na Figura (51):

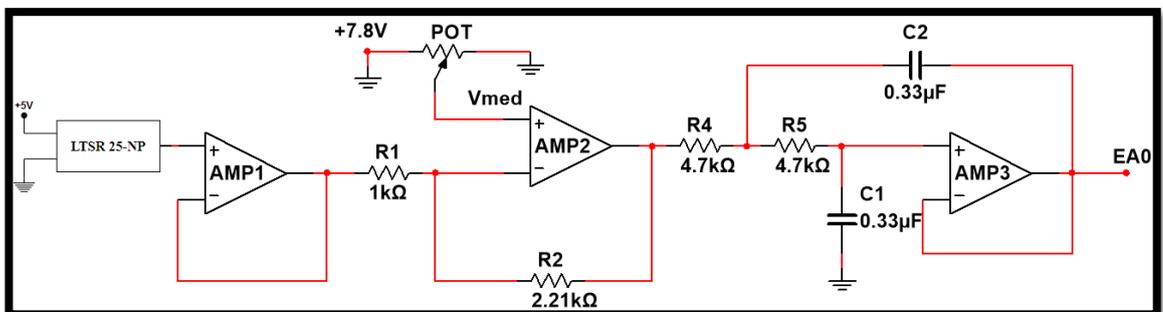


Figura 51: Condicionamento do sinal de corrente

### 5.2.1.2. Circuito comparador

Para o nosso caso em especial uma ligação que nos permita ter na entrada até 10 A é suficiente, com a equação (5.9) podemos obter o  $V_{ref}$  pretendido:

$$V_{ref} = 0.025 \times 10 + 2.5 = 2.75 \text{ V} \quad (5.9)$$

O circuito comparador tem como objetivo de proteção da corrente, quando o  $V_{sensor}$  for maior que o  $V_{ref}$  temos um fault no sistema, o  $V_{ref}$  é ajustável através do potenciômetro 9631 para os 2.75 V, a Figura (52) apresenta o circuito Comparador.

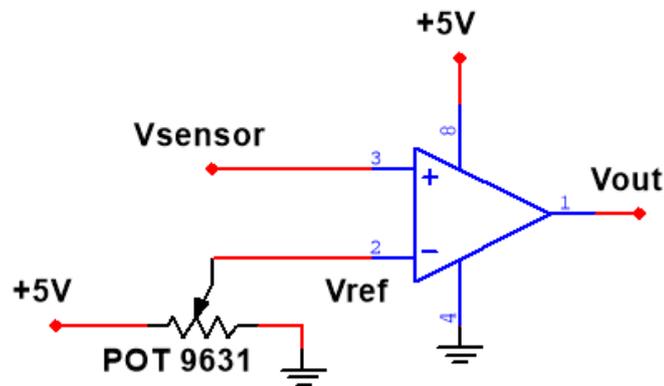


Figura 52: Circuito comparador

### 5.2.2. Circuito de Condicionamento de Sinal de Tensão

O sensor de tensão serve para indicar o estado da fonte de alimentação (baterias), para tal utilizou-se um divisor de tensão resistivo de forma a ter na entrada do conversor A/D do microcontrolador uma tensão que varie entre 0 V a 5 V correspondente à tensão das baterias.

A Figura (53) representa os circuitos utilizados para as baterias de 12 V e de 24 V, é composto por um divisor de tensão resistivo utilizando um TLC272 Amplificador seguidora tensão.

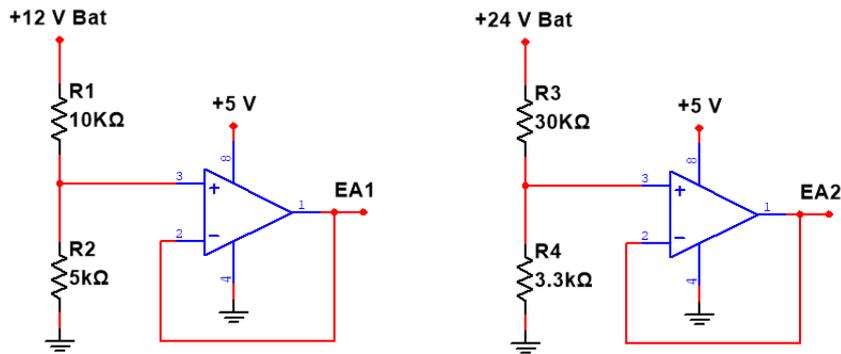


Figura 53: Circuito Divisor de tensão das baterias

A utilização do seguidor de tensão objetiva acoplar com a máxima eficiência no circuito divisor de tensão. Um amplificador configurado como um seguidor, proporciona uma Adaptação entre as impedâncias de entrada e saída, função obtida em termos das características ideais de um amplificador operacional, impedância de entrada infinita e impedância de saída zero, evitando perdas do sinal no acoplamento.

Para obter na entrada analógica do Arduino valores que possibilitam a leitura de tensão das baterias através do microcontrolador, foi montado um circuito divisor de tensão resistivo dado pela seguinte equação:

$$V_{out} = \frac{R4}{R4 + R3} \times 24 V \quad (5.10)$$

$$V_{out} = \frac{3.3}{3.3 + 30} \times 24 V$$

$$V_{out} = 2.37 V$$

Função transferência para aquisição do sinal de Tensão para o microcontrolador Arduino:

$$V_{out24V} = \frac{AnaloginA2 \times 5}{1023} \quad (5.11)$$

$$Bat24V = V_{out24V} \times \left( \frac{R3 + R4}{R4} \right) \quad (5.12)$$

Para a bateria de 12 V tem-se a seguinte equação:

$$Bat12V = V_{out12V} \times \left( \frac{R1 + R2}{R2} \right) \quad (5.13)$$

### 5.2.3. Circuito de Condicionamento de Sinal da Temperatura

Circuito implementado, termístor NTC como um divisor de tensão de acordo com o esquema a seguir:

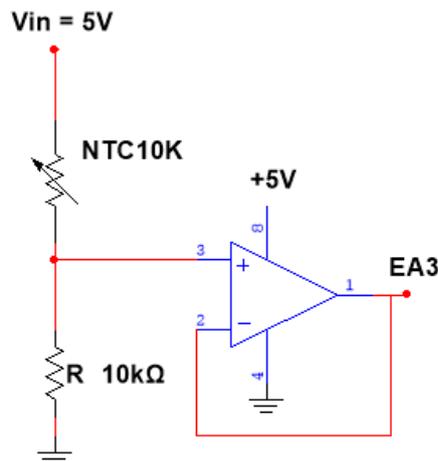


Figura 54: Circuito condicionamento de Temperatura

O sensor NTC varia sua resistência inversamente a temperatura ambiente, ou seja, quando a temperatura aumenta, a resistência diminui. Como pretendemos obter um circuito que forneça tensões mais altas quando aumentamos a temperatura, precisaremos criar um divisor de tensão com o termístor NTC na posição ilustrada na Figura (54), ou seja, um terminal conectado ao positivo e o outro no nó entre a entrada não inversora do seguidor de sinal e a resistência de 10 K $\Omega$ .

Se for invertido o NTC com a resistência como apresenta o circuito acima, o comportamento das leituras será também invertido, ou seja, o circuito irá fornecer tensões mais baixas quando aumentarmos a temperatura. Assim, quando utilizarmos a equação de **Steinhart-Hart** para calcularmos a temperatura real, os valores não serão corretos.

Para este circuito divisor de tensão determina-se a equação para o sinal de saída injetado ao microcontrolador da seguinte forma:

$$V_{out} = V_{in} \times \left( \frac{R}{R + R_{NTC}} \right) \quad (5.14)$$

Como  $V_{out}$  do circuito é igual à  $V_{in}$  da entrada analógica A3 do microcontrolador, pode-se adaptar a equação e inseri-la ao código do programa para determinar

corretamente o valor da resistência do RNTC. Este valor de resistência será utilizado na equação seguinte, à equação de Steinhart-Hart:

$$RNTC = R \times \left( \frac{V_{in}}{V_{out}} - 1 \right) \quad (5.15)$$

### 5.2.3.1. Equação de Steinhart-Hart

Analisando o gráfico da curva resistiva característica deste Termistor NTC 10K, observa-se que a resposta do sensor à variação da temperatura medida não é linear, desta forma, a interpretação do sinal de entrada injetado ao microcontrolador precisar ser resolvida através de uma equação que torne precisa qualquer temperatura medida.

A relação entre resistência e temperatura no NTC é dada pela equação de Steinhart-Hart [39]:

$$T(^{\circ}C) = \frac{1}{a + b \times \ln(RNTC) + c \times [\ln(RNTC)]^3} \quad (5.16)$$

onde a, b e c são constantes de Steinhart-Hart específicos para cada dispositivo. Valores típicos para um termistor com resistência de 10 K $\Omega$  na temperatura de (25  $^{\circ}C$  = 298.15 K) é:

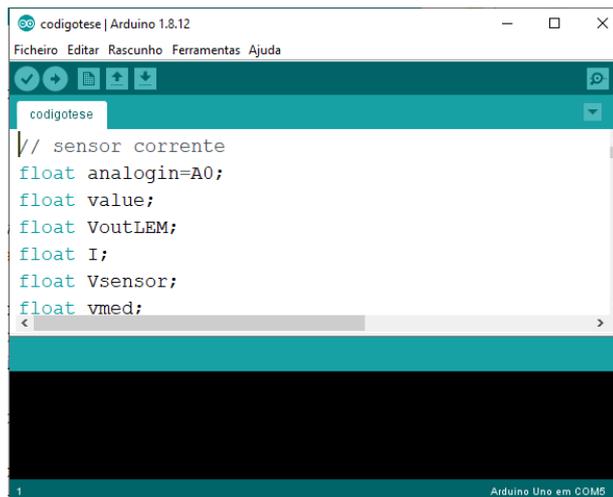
- a = 0.001129148;
- b = 0.000234125;
- c = 0.0000000876741 [40].

## 5.3. Monitorização

A monitorização é formada por um computador, onde o usuário tem acesso aos dados adquiridos possibilitando realizar a análise das variáveis do sistema.

### 5.3.1. Arduino Software (IDE)

O *software* usado para a realizar a interface com o Arduino foi o próprio série Monitor do IDE do Arduino, como pode ser visto mais em baixo na Figura (55).



```
// sensor corrente
float analogin=A0;
float value;
float VoutLEM;
float I;
float Vsensor;
float vmed;
```

Figura 55: Programa Arduino IDE ver.1.8.12

Para fazer a monitorização foi através de duas programas desenvolvidos no software Arduino e é uma parte importante do trabalho nos subcapítulos abaixo vou explicar como foi adquirido os dados.

### 5.3.1.1. Monitorização dos sensores

A leitura dos sensores de corrente, tensão e temperatura, é efetuada através das entradas analógicas A0, A1, A2 e A3 do Arduino. O GND do Arduino Uno é comum a todos os componentes do sistema.

Para obter aquisição de dados do sensor de corrente foi através das equações do circuito de condicionamento de sinal de corrente resultando na equação (4.4) onde obtém-se a corrente do motor. Para a tensão das baterias foi utilizada as equações (5.12) e (5.13), e por fim a temperatura utilizando a equação (5.16) de Steinhart-Hart. Abaixo é apresentado o programa dos sensores.

```

// sensor corrente
float analogin=A0;
float value;
float VoutLEM;
float I;
float Vsensor;
float vmed;
float V=2.5;
float Vmed=10.24;
float mVperAmp=0.025;
float Av=(-2.2);

// sensor bateria 12V
float pinoSensor12V = A1;
float Vout12V;
float Bat12V;
float R1 = 10000.0;
float R2 = 5000.0;

// sensor bateria 24V
float pinoSensor24V = A2;
float Vout24V;
float Bat24V;
float R3 = 30000.0;
float R4 = 3300.0;
float leituraSensor3;

//Termistor de temperatura
float ThermistorPin = A3;
float Vouttemp;
float R = 10000.0;
float logRNTC, RNTC, T, Tc; // Tf;
float a = 0.001129148, b = 0.000234125, c = 0.0000000876741;

```

```

void setup()
{
  pinMode(analogin, INPUT); //sensor corrent
  pinMode(pinoSensor12V, INPUT); //sensor bat12V
  pinMode(pinoSensor24V, INPUT); //sensor bat24V
  pinMode(ThermistorPin, INPUT); //Termistor de temperatura
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  // sensor corrent
  value=analogRead(analogin);
  VoutLEM=((value*5.0)/1023.0);
  Vsensor=((VoutLEM-Vmed)/Av);
  I=((Vsensor-V)/mVperAmp);

  //sensor bat12V
  leituraSensor2 = analogRead(pinoSensor12V);
  Vout12V = (leituraSensor2* 5.0) / 1023.0;
  Bat12V = Vout12V * (R1+R2)/R2;

  //sensor bat24V
  leituraSensor3 = analogRead(pinoSensor24V);
  Vout24V = (leituraSensor3 * 5.0) / 1023.0;
  Bat24V = Vout24V * (R3+R4)/R4;

  //Termistor de temperatura
  Vouttemp = analogRead(ThermistorPin);
  RNTC= R * (1023.0 / (float)Vouttemp - 1.0);
  logRNTC= log(RNTC);
  T = (1.0 / (a + b*logRNTC + c*logRNTC*logRNTC*logRNTC));
  Tc = T - 273.15; //converter K em °C
}

```

```

//sensor corrent
Serial.print("VoutLEM;");
Serial.print(VoutLEM);
Serial.print(";Vsensor;");
Serial.print(Vsensor);
Serial.print(";I;");
Serial.print(I);

//sensor bat12V
Serial.print(";Bat12V;");
Serial.print(Bat12V);

//sensor bat24V
Serial.print(";Bat24V;");
Serial.print(Bat24V);

//Termistor de temperatura
Serial.print(";Temperature;");
Serial.println(Tc);

delay(40);
}

```

### 5.3.1.2. Controlo do PWM em Malha aberta

O programa PWM é feito em malha aberta conectado no analogoutPin 9 (Saída digital PWM do Arduino), utilizando um potenciómetro que é o nosso acelerador podemos variar o Duty Cycle do PWM conectado a entrada analógica A0.

O programa lê-se a entrada analógica que é o potenciómetro, mapeando o resultado em uma faixa de 0 a 255 e usa o resultado para defini a modulação por largura de pulso (PWM) do pino de saída 9. Abaixo é apresentado o programa PWM.

```

// These constants won't change. They're used to give names to the pins
used:
const int analogInPin = A0; // Analog input pin that the potentiometer
is attached to
const int analogOutPin = 9; // Analog output pin that the LED is attached to

int sensorValue = 0; // value read from the potentiometer
int outputValue = 0; // value output to the PWM (analog out)

void setup() {
  // initialize serial communications at 9600 bps:
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // read the analog in value:
  sensorValue = analogRead(analogInPin);
  // map it to the range of the analog out:
  outputValue = map(sensorValue, 0, 1023, 0, 255);
  // change the analog out value:
  analogWrite(analogOutPin, outputValue);

  // print the results to the Serial Monitor:
  Serial.print("sensor = ");
  Serial.print(sensorValue);
  Serial.print("\t output = ");
  Serial.println(outputValue);

  // wait 2 milliseconds before the next loop for the analog-to-digital
  // converter to settle after the last reading:
  delay(2.);
}

```

## Capítulo 6

### 6. Análise de Resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos, sendo estes comparados com os valores obtidos com instrumentos de medição, como multímetro e o osciloscópio. Os sinais que serão apresentados correspondem ao PWM e sinal do sensor de corrente, apresentados no Osciloscópio.

#### 6.1. Sinal do Circuito condicionamento de sinal do sensor de Corrente

O ponto de partida na verificação dos resultados foi observar o sinal do sensor de corrente e o sinal apresentado na saída do circuito condicionador de tensão de LTSR 25-NP, com a finalidade de verificar possíveis ruídos.

Primeiramente foi elaborado um gráfico onde podemos observar a saída do circuito de condicionamento de sinal de corrente gerado no osciloscópio. O gráfico da Figura (56) representa duas ondas sinusoidal onde o CH1 temos um sinal que varia entre [0 , 2.12] V com uma tensão de offset de 3.5 V.

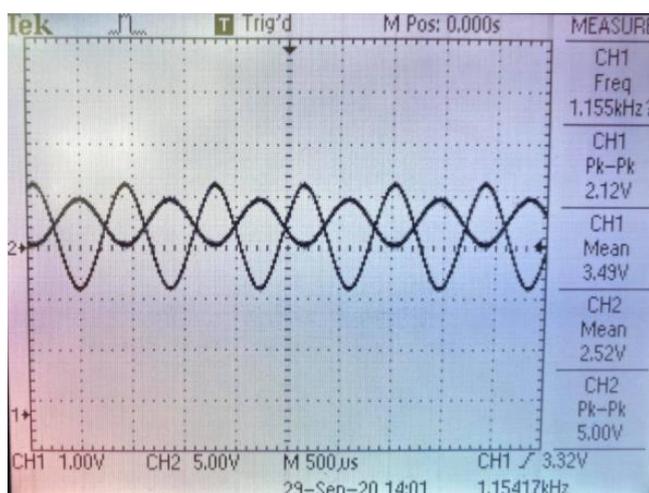


Figura 56: Comparação entre tensão offset entrada e saída

Através do potenciômetro conseguimos ajustar a saída um sinal de tensão entre os [0 , 5] V para a saída representado no CH2, (é de assinalar que vamos ter como alimentação DC de (+7.8 V , GND) gerado por uma fonte de tensão DC.

A Figura (57), ilustra a saída em tensão do sensor e a saída do Circuito de Condicionamento de sinal de Corrente apresentada no Osciloscópio, onde se verifica que o sinal do sensor antes da filtragem no CH2 apresenta um pouco ruidoso, já o CH1 é o sinal filtrado com o filtro Sallen Key. Ainda pode observar-se que o sinal do circuito de condicionamento varia de 0 a 5 V.

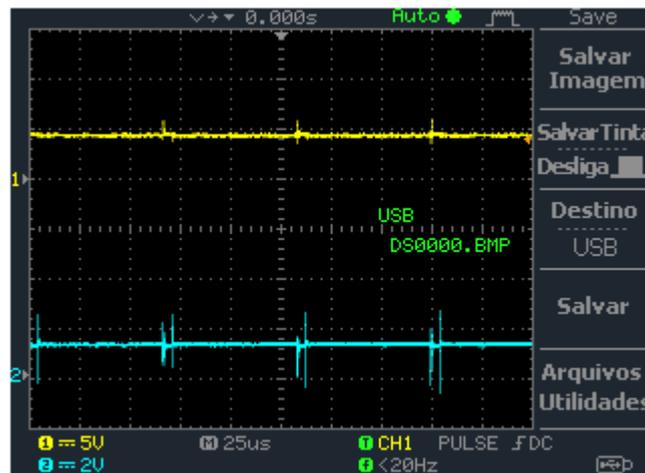


Figura 57: Relação entre o sinal do sensor LTSR 25-NP e do circuito de condicionamento de sinal

### 6.1.1. Comparação entre o sinal do PWM e do sensor de corrente

O gráfico da Figura (58) apresenta uma comparação do sinal PWM em relação ao sinal do sensor LTS 25-NP, o sinal de corrente não apresenta muitas perturbações pelo fato de a Scooter se encontra numa bancada de teste.

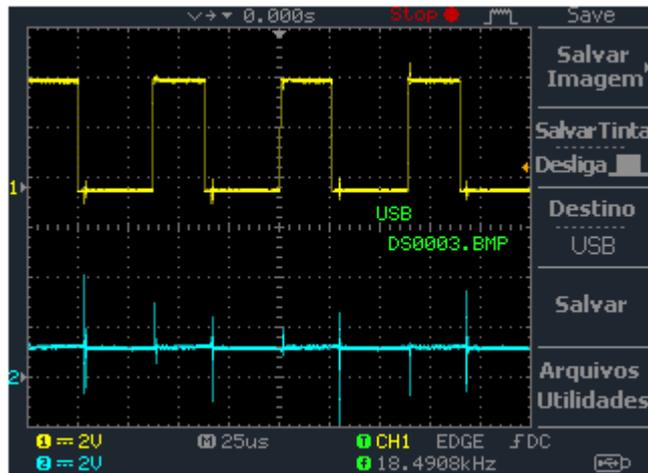


Figura 58: Comparação do sinal PWM com o sinal do sensor de corrente

## 6.2. PWM e a tensão do MOSFET entre a Source e o Dreno

O gráfico da Figura (59) apresenta a tensão do MOSFET entre a Source e o Dreno, observa-se que quando o PWM tem impulso o Drive IR2111 conduz o sinal, o MOSFET funciona como um interruptor, quando o PWM esta 0 o interruptor está aberto isso quer dizer que não á condução.

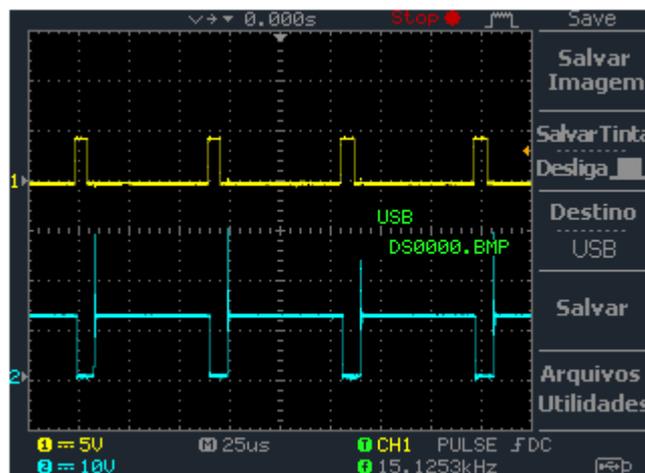


Figura 59: Tensão do PWM entre a Source e o Dreno

## 6.3. Resultados obtidos no Software

Os dados são enviados ao computador, continuamente, através da porta série, pela interface USB. Para visualizar as grandezas do sistema basta utilizar o software e os

resultados são exibidos na porta série do software Arduino, depois são projetados gráficos no Excel.

### 6.3.1. Sensor de Corrente

Os gráficos a seguir apresenta valores lidos no monitor série do software Arduino, os dados representam a corrente do motor consoante um Duty Cycle diferente.

A figura (60) representa um Duty Cycle aproximadamente 2%.

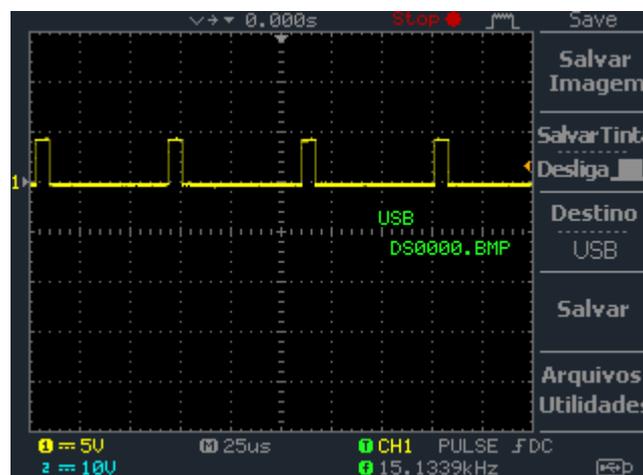


Figura 60: PWM com um Duty Cycle de 2%

A corrente varia pouco com valores a aproximadamente 2 A como mostra a figura (61).

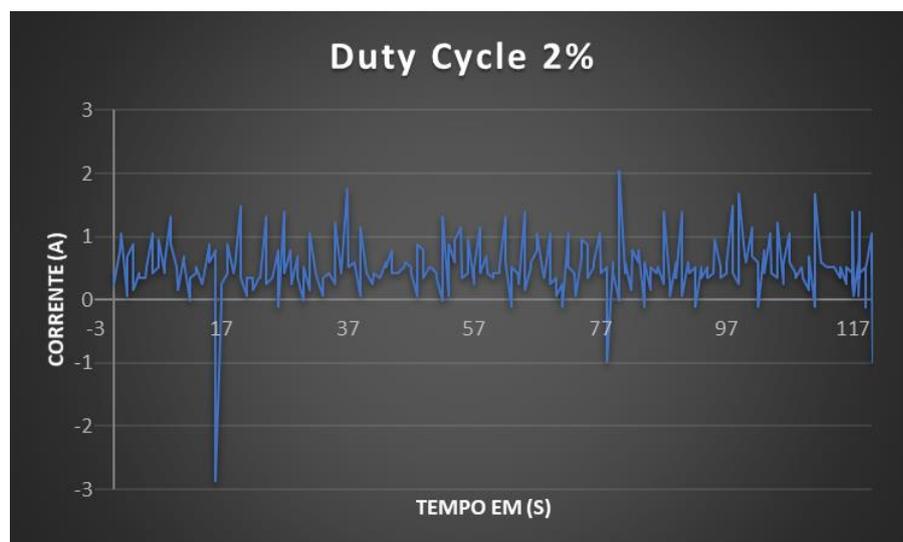


Figura 61: Gráfico da corrente com um Duty Cycle de 2%

Aumentando o Duty Cycle a corrente aumenta, como apresenta o gráfico da Figura (62).

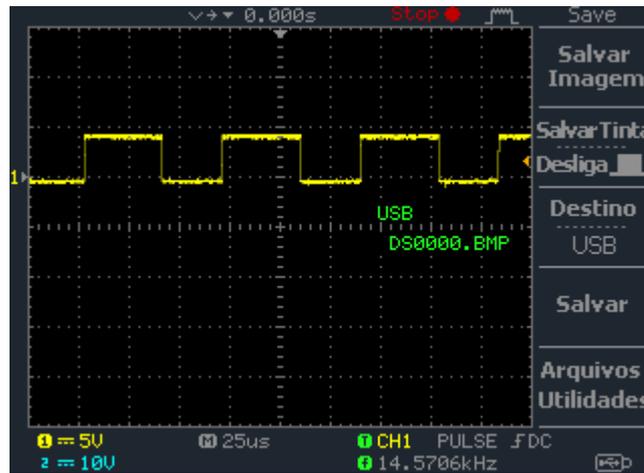


Figura 62: PWM Com um Duty Cycle de 50%

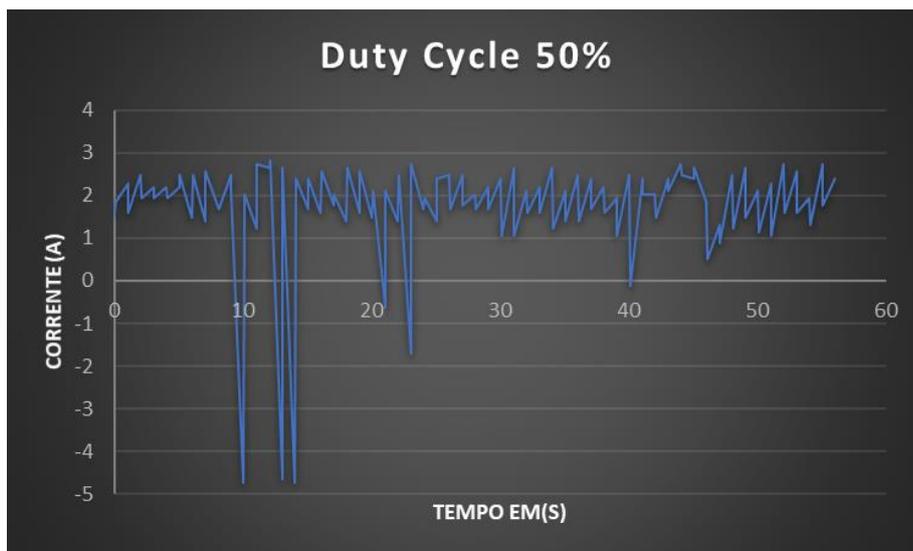


Figura 63: Corrente do Duty Cycle de 50%

Com um Duty Cycle perto do máximo a corrente aumenta aproximadamente 4 A como apresenta a Figura (64).

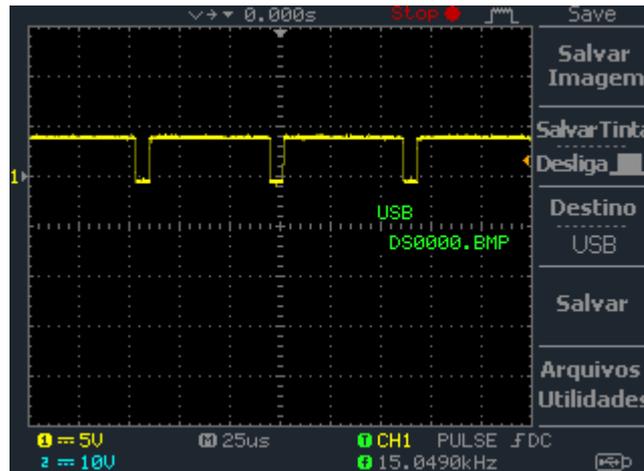


Figura 64: PWM com um Duty Cycle máximo

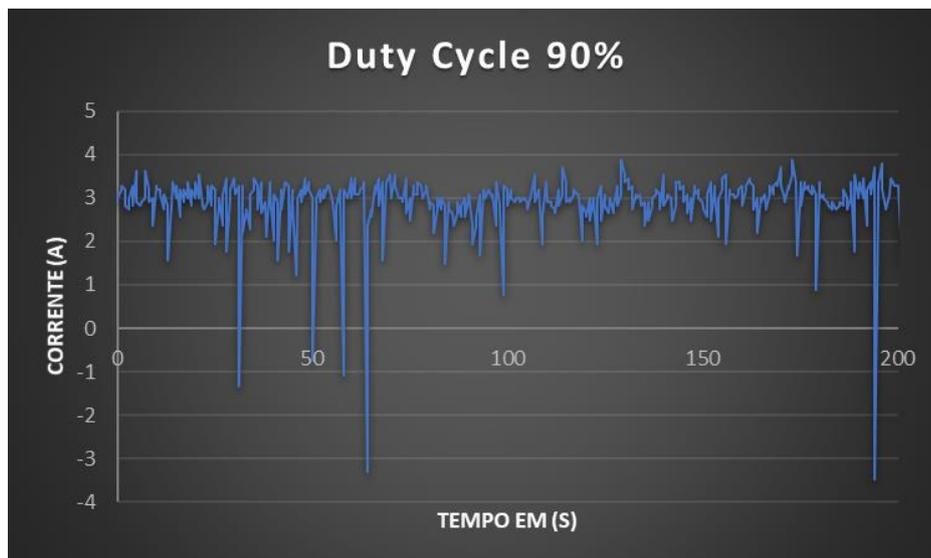


Figura 65: Corrente do Duty Cycle máximo

Como o sistema está dimensionada para uma corrente nominal 10 A o aumento para essa gama so quando freamos o pneu da scooter, por si quando a corrente ultrapassa os 10 A o sistema vai a baixo, pelo fato do  $V_{\text{sensor}} > V_{\text{ref}}$  feito pelo circuito comparador.

### 6.3.2. Sinal de Tensão da Bateria

Podemos observar na Figura (66) resultados da tensão da bateria de 12 V apresentado no LCD e a conversão pelo divisor de tenção no multímetro.

LCD EMV 1025S-01  
Tensão Bateria 12V

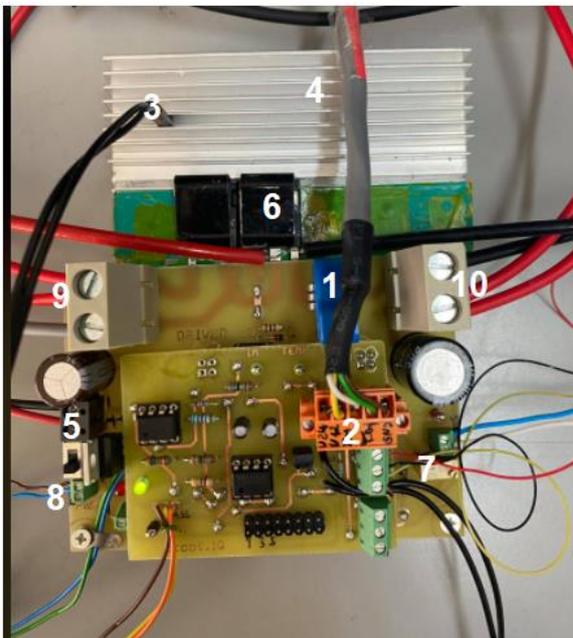


Conversão Divisor tensão  
Bateria 12V para Arduino



Figura 66: Resultados da tensão bateria 12V

A placa PCB impressa utilizada para o circuito de condicionamento do driver é mostrada na Figura (67).



**Legenda:**

- 1 - LTS 25-NP Sensor de corrente
- 2 - Saida sinal dos sensores para aquisição de dados
- 3 - NTC 10K
- 4 - Dissipador
- 5 - Bateria 12V
- 6 - Mosfet IRFP048N
- 7 - Vref potenciometro 9631
- 8 - PWM
- 9 - Bateria 24V
- 10 - Motor DC

Figura 67: Circuito do Drive e do Condicionamento de sinal

A figura (68) apresenta o circuito de aquisição de dados para o software Arduino.

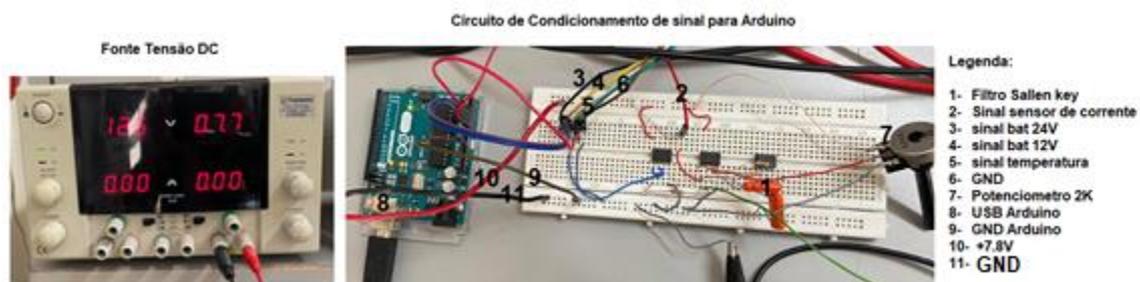


Figura 68: Circuito de aquisição de Dados

A Figura (69) apresenta o motor utilizada na Scooter, a bateria de 12 V e a bateria de 24V.



Figura 69: Componentes da scooter

# Capítulo 7

## 7. Conclusões

Este trabalho descreve o projeto e a implementação de um sistema de aquisição de dados aplicável na medição dos parâmetros da corrente do motor, das tensões das baterias, da temperatura dos dispositivos do sistema, e uma onda modulada PWM. Os resultados foram comparados com valores obtidos por instrumentos de medição, como o Osciloscópio, Multímetro e do LCD EMV 1025S-01.

Neste trabalho foi realizado o condicionamento de sinal para todos os sensores utilizados. Este condicionamento de sinal permitiu aumento de sensibilidade dos sensores, diminuição do erro de discretização e diminuição de ruído de altas frequências.

O sensor de corrente foi o componente onde teve mais atenção por causa da tensão de offset onde foi implementado várias equações para adquirir os valores de tensões de saída do sensor para valores adequados para o conversor A/D.

Por fim, o microcontrolador de aquisição de dados atendeu as necessidades do projeto, e se apresenta com uma ferramenta funcional que poderá ser tomada como ponto de partida em outros trabalhos.

## Referências Bibliográficas

- [1] The Benefits of Electric Vehicles, Available: <https://get-greennow.com/why-are-electric-cars-important/>. [Acedido em 3 dezembro 2019].
- [2] J. G. Ogden, The Kingdom of Dust, Popular Mechanics, janeiro 1911.
- [3] M.Miles, Internal-combustion alternative, Cycle World Magazine, abril 1992.
- [4] Peugeot's, incredibly frugal electric E-Vivacity scooter, Available: <https://newatlas.com/peugeots-incredibly-frugal-electric-e-vivacityscooter/13967/>. [Acedido em 3 dezembro 2019].
- [5] SEAT, Apresentação mundial SEAT da MÓ, junho 2020, Available: <https://www.seat.pt/empresa-seat/noticias-auto/novidades-seat/apresentacao-mundial-da-seat-mo.html> [Acedido em 12 agosto 2020].
- [6] SEAT, MÓ eScooter 125, 2020, Available: <https://www.motorbikemag.es/ficha-tecnica/seat-mo-escooter-125-2020/> [Acedido em 12 agosto 2020].
- [7] Engineer Ambitiously, O que é condicionamento de sinal, Available: <https://www.ni.com/pt-pt/innovations/white-papers/09/what-is-signal-conditioning-.html> [Acedido em 23 agosto 2020].
- [8] Elnatan Chargas Ferreira, Sensores condicionamento e Aquisição de Dados Available: <http://www.demic.fee.unicamp.br/~elnatan/ie327/IE327.pdf> [Acedido em 25 agosto 2020].
- [9] João Paulo Coelho, Técnicas de Condicionamento de Sinal, Available: [http://www.ipb.pt/~jpcoelho/IEM/Aulas\\_Teoricas\\_C4.pdf](http://www.ipb.pt/~jpcoelho/IEM/Aulas_Teoricas_C4.pdf) [Acedido em 12 julho 2020].
- [10] Marcelo Wendling, Sensores, Available: <https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf> [Acedido em 2 setembro 2020].
- [11] Luís Fernando Patsko, Tutorial aplicações, funcionamento e utilização de sensores Available:

[https://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000\\_kdr5000/tutorial\\_eletronica\\_-\\_aplicacoes\\_e\\_funcionamento\\_de\\_sensores.pdf](https://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf) [Acedido em 21 agosto 2020]

[12] BR-Arduino.org, Voltímetro com Arduino: como montar, programar e calibrar, Available: <https://br-arduino.org/2015/06/voltmetro-com-arduino-como-montar-programar-e-calibrar.html> [Acedido em 2 setembro 2020].

[13] Ron Mancini, Op Amps For Everyone, Editor in chief agosto 2002

[14] Sallen-Key Low-pass Filter Design Tool Available: <http://sim.okawadenshi.jp/en/OPseikiLowkeisan.htm> [Acedido em 21 novembro 2019].

[15] António Francisco, Motores Elétricos 3ª edição, Edições Técnicas e Profissionais, Julho 2009

[16] Brainly, Available: <https://brainly.com.br/tarefa/17760276> [Acedido em 18 setembro 2020].

[17] Ivan Paulo Canal, Modelagem Matemática de Motor DC e Análise Dinâmica, Available:<https://pdfs.semanticscholar.org/259c/71b8f6ec16c00f32f2575e832692344cb0c88.pdf> [Acedido em 16 agosto 2020].

[18] RioBotz, Combot Tutorial Version 2.0, march 2009, Available: [http://www.evva.com/images/riobotz\\_combot\\_tutorial.pdf](http://www.evva.com/images/riobotz_combot_tutorial.pdf) [Acedido em 16 abril 2020].

[19] Felipe Maimon, Projeto de um sistema eletrônico para o controlo de motores de alta potência por PWM, Available:

[http://meggi.usuarios.rdc.puc-rio.br/teses/TFC04\\_Felipe\\_Maimon.pdf](http://meggi.usuarios.rdc.puc-rio.br/teses/TFC04_Felipe_Maimon.pdf) [Acedido em 25 Abril 2020].

[20] Dissertação Bruno Guilherme Gonçalves de Matos, Controlador e Accionador para Motor DC em Malha Fechada, outubro 2008,

Available: <http://intranet.dei.uminho.pt/gdmi/galeria/temas/pdf/38040.pdf> [Acedido em 27 maio 2020].

[21] <https://www.electronics-tutorials.ws/blog/pulse-width-modulation.html> [Acedido em 14 maio 2020].

[22] Ponte H, Wikipédia, Available: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte\\_H](https://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_H) [Acedido em 8 fevereiro 2020].

- [23] Luís Fernando Patsko, Tutorial montagem da Ponte H, Available: [https://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000\\_kdr5000/tutorial\\_eletronica\\_-\\_montagem\\_de\\_uma\\_ponte\\_h.pdf](https://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_montagem_de_uma_ponte_h.pdf) [Acedido em 28 junho 2020].
- [24] DR. Noor Fazli Adull Manan, Kougar Scooter (E-Scooter), Available: [https://www.academia.edu/37902530/Electrical\\_Scooter\\_Mechanical\\_Engineering\\_Design\\_1\\_UiTM](https://www.academia.edu/37902530/Electrical_Scooter_Mechanical_Engineering_Design_1_UiTM) [Acedido em 12 Novembro 2019].
- [25] Carlos Márcio Freitas, Princípios básicos do IGBT, Available: <https://www.embarcados.com.br/principios-basicos-do-igbt/> [Acedido em 22 setembro 2020].
- [26] Transistores de potência, Available: <http://docshare04.docshare.tips/files/5663/56631513.pdf> [Acedido em 22 setembro 2020].
- [27] International Rectifier, IRFP048PbF, Available: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfp048n.pdf> [Acedido em 9 agosto 2020].
- [28] International Rectifier, IR2111, Available: <http://www.electroscheme.ru/datasheet/InternationalRectifier/IR2111.PDF> [Acedido em 23 agosto 2020].
- [29] MPPT Solar, Ligações de baterias em série e em paralelo, Available: <https://www.mpptsolar.com/pt/baterias-serie-paralelo.html> [Acedido em 8 junho 2020].
- [30] RS, Bateria de chumbo-acido, Available: <https://uk.rs-online.com/web/p/lead-acid-batteries/5375472/> [Acedido em 18 junho 2020].
- [31] CDIL, Terminal Positive Voltage Regulator, Available: <https://www.tme.eu/Document/8aa8ed83dc2f8e8a5f3ad4a71fd201bc/lm7805.pdf> [Acedido em 29 julho 2020].
- [32] Mouser, SSP1D440BD, Available: [https://uy.mouser.com/datasheet/2/357/Harmony\\_Relay\\_SSP1D440BD\\_document-1563620.pdf](https://uy.mouser.com/datasheet/2/357/Harmony_Relay_SSP1D440BD_document-1563620.pdf) [Acedido em 7 setembro 2020].

- [33] Newark, TLC272CP, Available: <https://canada.newark.com/texas-instruments/tlc272cp/op-amp-1-7mhz-3-6v-us-dip-8/dp/36K3642?MER=sy-me-pd-mi-acce> [Acedido em 13 setembro 2020].
- [34] Millman Halkias, Integrated Electronics: Analog And Digital Circuits And Systems, McGraw-Hill Kogakusha LTD, 1972.
- [35] FEUP, Circuito de medição de potência consumida, Available: [https://paginas.fe.up.pt/~ee03073/trabalhos\\_apont/si/2relatorio.pdf](https://paginas.fe.up.pt/~ee03073/trabalhos_apont/si/2relatorio.pdf) [Acedido em 3 julho 2020].
- [36] LEM, Current Transducer LTSR 25-NP, Available: [https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/ltsr\\_25-np.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/ltsr_25-np.pdf) [Acedido em 16 setembro 2020].
- [37] Laboratório de Garagem, Como utilizar NTC com Arduino, Available: <http://labdegargem.com/profiles/blogs/tutorial-como-utilizar-o-termistor-ntc-com-arduino> [Acedido em 20 setembro 2020].
- [38] Angelo Luis Ferreira, Projeto 41 Usando o sensor de temperatura termistor 10K com LCD Available: <http://www.squids.com.br/arduino/index.php/projetos-arduino/projetos-squids/basico/153-projeto-41-usando-o-sensor-de-temperatura-termistor-ntc-10k-com-lcd> [Acedido em 28 setembro 2020].
- [39] Ramón Pallás-Areny, John G. Webster, Sensors and Signal Conditioning, John Wiley & Sons, INC. , 1991.
- [40] Squids Arduino, compare método Steinhart-Hart calculo manual e biblioteca, Available: <http://www.squids.com.br/arduino/index.php/desafios/158-desafio22-compare-metodo-para-calcular-temperaturas-com-termistor-ntc-10k> [Acedido em 6 outubro 2020].

Datasheet do sensor de corrente

**Current Transducer LTSR 25-NP**

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed..., with galvanic separation between the primary circuit and the secondary circuit.



$I_{PN} = 25 \text{ At}$



**Electrical data**

$I_{PN}$	Primary nominal RMS current	25	At
$I_{PM}$	Primary current, measuring range	0 ... $\pm 80^{1)}$	At
$I_p$	Overload capability	250	At
$V_{out}$	Output voltage (analog) @ $I_p$	$2.5 \pm (0.625 \times I_p / I_{PN})$	V
	@ $I_p = 0$	$2.5^{2)}$	V
$V_{ref}$	Reference voltage (internal reference), Ref <sub>OUT</sub> mode	$2.5^{3)}$	V
	Reference voltage (external reference), Ref <sub>N</sub> mode	$1.9 \dots 2.7^{4)}$	V
$G$	Sensitivity	25	mV/A
$N_s$	Number of secondary turns ( $\pm 0.1\%$ )	2000	
$R_L$	Load resistance	$\geq 2$	k $\Omega$
$C_{L,max}$	Maximum capacitive loading	500	pF
$R_{IM}$	Internal measuring resistance ( $\pm 0.5\%$ )	50	$\Omega$
$TCR_{IM}$	Temperature coefficient of $R_{IM}$	$< 50$	ppm/K
$U_C$	Supply voltage ( $\pm 5\%$ )	5	V
$I_C$	Current consumption @ $U_C = 5 \text{ V}$	Typical $28 + I_s^{5)}$ ( $V_{out}/R_L$ )	mA

**Accuracy - Dynamic performance data**

$X$	Accuracy @ $I_{PN}, T_A = 25^\circ\text{C}$	$\pm 0.2$	%
	Accuracy with $R_{IM}$ @ $I_{PN}, T_A = 25^\circ\text{C}$	$\pm 0.7$	%
$\epsilon_L$	Linearity error	$< 0.1$	%
		Max	
$TCV_{out}$	Temperature coefficient of $V_{out} / V_{ref}$ @ $I_p = 0$	$-40 \dots +85^\circ\text{C}$ 37.5	ppm/K
$TCG$	Temperature coefficient of $G$	$-40 \dots +85^\circ\text{C}$ 50 <sup>6)</sup>	ppm/K
$V_{OM}$	Magnetic offset voltage @ $I_p = 0$ ,		
	after an overload of $3 \times I_{PN}$	$\pm 0.5$	mV
	after an overload of $5 \times I_{PN}$	$\pm 2.0$	mV
	after an overload of $10 \times I_{PN}$	$\pm 2.0$	mV
$TCV_{ref}$	Temperature coefficient of $V_{ref}$		
	@ $I_p = 0$ $-10 \dots +85^\circ\text{C}$	50	ppm/K
	$-40 \dots -10^\circ\text{C}$	100	ppm/K
$t_{2\sigma}$	Reaction time @ 10 % of $I_{PN}$	$< 100$	ns
$t_r$	Step response time to 90 % of $I_{PN}$ <sup>7)</sup>	$< 400$	ns

**Features**

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Unipolar supply voltage
- Insulating plastic case recognized according to UL 94-V0
- Compact design for PCB mounting
- Incorporated measuring resistance
- Extended measuring resistance
- Access to the internal voltage reference
- Possibility to feed the transducer reference from external supply.

**Advantages**

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

**Applications**

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives

# Circuito de aquisição de dados

