



# **Projeto e desenvolvimento de um banco de teste para motores elétricos**

Mestrado em Engenharia Automóvel

David Rafael Marques Curado Fleury

Leiria, dezembro de 2022





# **Projeto e desenvolvimento de um banco de teste para motores elétricos**

Mestrado em Engenharia Automóvel

David Rafael Marques Curado Fleury

Trabalho de Projeto realizado sob a orientação do Doutor Carlos Daniel Henriques Ferreira, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Luís Manuel Ventura Serrano, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, dezembro de 2022.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco.*

**“At the end, everything that is important is utterly simple.”**

**John A. Wheeler**

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco.*

## **Originalidade e Direitos de Autor**

O presente relatório de projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Automóvel, no ano letivo 2021/2022, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco.*

# **Dedicatória**

Dedico o presente trabalho a minha família, cujo apoio incondicional foi fundamental para a conclusão deste.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco.*

# Agradecimentos

A Deus acima de tudo e de todos, a Quem tudo pode e perante Sua vontade foi possível concluir este trabalho.

Aos meus orientadores Professor Doutor Calor Daniel Henriques Ferreira e Professor Luis Manuel Ventura Serrano pelas sugestões, conselhos e questionamentos ao longo do desenvolvimento deste trabalho e pelo tempo e atenção dispensada que tornaram possível a concretização deste projeto.

Aos meus pais, Geraldo Fleury (*in memoriam*) e Mariza Fleury os quais sempre defenderam o estudo como forma de crescimento.

A minha esposa, Rachel Dayrell e filhos, Ana e Felipe, os quais estiveram sempre ao meu lado e que, por inúmeros dias, foram privados de nosso convívio familiar pelo esforço requerido a conclusão deste projeto.

Ao corpo técnico da escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, que através de seu trabalho possibilitaram o desenvolvimento deste projeto.

Aos colegas e amigos que pude conhecer ao longo desta jornada académica no Instituto Politécnico de Leiria, por fazerem parte desta caminhada.

Regista-se que este trabalho foi parcialmente apoiado pelo projeto CAVALI – Cadeia de Valor do Lítio, POCI-01-0247-FEDER-047728, cofinanciado pelo COMPETE 2020, Portugal 2020 e União Europeia através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco.*

# Resumo

O presente projeto tem como objetivo desenvolver um banco de ensaio de potência que seja capaz de caracterizar motores elétricos de pequeno porte.

Efetou-se a pesquisa bibliográfica para obter o entendimento do princípio de funcionamento dos bancos de ensaio de potência e identificação dos principais dispositivos existentes para a simulação do binário de carga e também dos métodos de controlo de um sistema deste tipo.

Idealizou-se o projeto de um banco de ensaio equipado com um travão de histerese e com capacidade de ensaiar motores elétricos de até 16 kW de potência.

A etapa seguinte foi o dimensionamento e seleção dos diversos componentes e acessórios de natureza mecânica e elétrica necessários para a montagem do banco de ensaio de potência.

Posteriormente foi realizado o desenvolvimento da interface elétrica e do sistema de controlo baseado em instrumentação virtual com uso do software LabVIEW®, com vistas a possibilitar o correto funcionamento do dispositivo gerador de binário de carga.

Desenvolvida o software e controle e efetuado a montagem dos componentes do banco de ensaios, procedeu-se com a realização de testes para validação do sistema desenvolvido e sua respetiva calibração com o objetivo de se caracterizar corretamente os motores ensaiados.

Finalmente apresenta-se uma análise crítica dos resultados obtidos e termina-se o trabalho com a apresentação de sugestões para melhorias futuras ao sistema aqui proposto e projetado.

Palavras-chave: Banco de potência, Motores Elétricos, Instrumentação Virtual, Arduino

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco.*

# Abstract

This project aims to develop a power test bench that can characterize small electric motors.

Bibliographic research was carried out to obtain an understanding of the operating principle of power test benches and to identify the main existing devices for load torque simulation and the control methods for a system of this type.

The design of a test bench equipped with a hysteresis brake and capable of testing electric motors of up to 16 kW of power was conceived.

The next step was the sizing and selection of the various components and accessories of mechanical and electrical nature required for assembling the power test bench.

Subsequently, the electrical interface and control system based on virtual instrumentation was developed using LabVIEW® software to enable the correct operation of the load torque generator device.

Once the software and control were developed and the test bench components were assembled, tests were carried out to validate the developed system and its respective calibration with the aim of correctly characterizing the motors tested.

Finally, a critical analysis of the results obtained is presented and the work ends with the presentation of suggestions for future improvements to the system proposed and designed here.

Keywords: Power Bank, Electric Motors, Virtual Instrumentation, Arduino

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco.*

# Lista de publicações

## **Deste trabalho resultou a seguinte publicação:**

Carlos Ferreira, David Fleury, Helder Santos, Luís Serrano. 2022. “DEVELOPMENT OF A DYNAMOMETER FOR CHARACTERIZATION AND OPTIMIZATION OF LOW POWER ELECTRICAL MOTORS USED IN ELECTRIC MOBILITY”, trabalho a ser apresentado em 20<sup>th</sup> International Conference On Experimental Mechanics (ICEM20), Porto, Portugal.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco.*

## Índice

<b>Originalidade e Direitos de Autor .....</b>	<b>ix</b>
<b>Dedicatória .....</b>	<b>xi</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>xv</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de publicações.....</b>	<b>xix</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>xxiv</b>
<b>Lista de tabelas .....</b>	<b>xxix</b>
<b>Lista de siglas e acrónimos.....</b>	<b>xxx</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Motivação .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Estrutura do relatório .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4. Sumário .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Bancos de Ensaio de Potência.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Elemento Gerador de Carregamento .....</b>	<b>9</b>
2.2.1. Dinamómetros de Atrito .....	11
2.2.2. Dinamómetros Hidráulicos.....	13
2.2.3. Dinamómetros Elétricos .....	15
<b>2.3. Características Binário e Potência dos diferentes dinamómetros.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4. Referência bibliográfica para o projeto.....</b>	<b>21</b>
<b>2.5. Sumário .....</b>	<b>22</b>
<b>2.6. Conclusão .....</b>	<b>23</b>

<b>3.</b>	<b>Desenvolvimento do Hardware .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1.</b>	<b>Aspetos relativos aos componentes mecânicos.....</b>	<b>26</b>
3.1.1.	Rolamentos e chumaceiras .....	26
3.1.2.	Correias e polias .....	30
3.1.3.	Adequação do veio do travão de histerese .....	37
<b>3.2.</b>	<b>Aspetos relacionados aos componentes eletroeletrónicos .....</b>	<b>44</b>
3.2.1.	Travão de Histerese .....	44
3.2.2.	Célula de carga .....	47
3.2.3.	Sensor de rotações .....	49
3.2.4.	Placas de Circuito Impresso .....	50
3.2.5.	Distribuição de corrente contínua .....	58
<b>3.3.</b>	<b>Protocolos de comunicação.....</b>	<b>59</b>
3.3.1.	Protocolo de comunicação UART.....	60
3.3.2.	Protocolo de comunicação SPI.....	61
3.3.3.	Protocolo de comunicação CAN .....	63
<b>3.4.</b>	<b>Software do microcontrolador .....</b>	<b>69</b>
3.4.1.	Estrutura do código do microcontrolador.....	70
<b>3.5.</b>	<b>Sumário .....</b>	<b>74</b>
<b>3.6.</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>75</b>
<b>4.</b>	<b>Software de Visualização e Controlo.....</b>	<b>77</b>
<b>4.1.</b>	<b>Plataforma de desenvolvimento .....</b>	<b>77</b>
<b>4.2.</b>	<b>Solução desenvolvida em LabVIEW® .....</b>	<b>79</b>
4.2.1.	Separador “Início” .....	79
4.2.2.	Separador “Ensaaios Manuais” .....	81
4.2.3.	Separador “Ensaaios Automáticos” .....	85
<b>4.3.</b>	<b>Sumário .....</b>	<b>86</b>
<b>4.4.</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>87</b>

<b>5.</b>	<b>Implementação prática e testes para validação .....</b>	<b>89</b>
<b>5.1.</b>	<b>Montagem mecânica do banco de ensaio.....</b>	<b>89</b>
<b>5.2.</b>	<b>Ensaio propostos .....</b>	<b>90</b>
<b>5.3.</b>	<b>Ensaio de comunicação.....</b>	<b>91</b>
<b>5.4.</b>	<b>Implementação dos demais componentes do Banco de Ensaio.....</b>	<b>94</b>
5.4.1.	Controlador do travão de histerese VM-8 .....	94
5.4.2.	Célula de carga .....	96
5.4.3.	Sensor de rotações .....	98
5.4.4.	Medição de corrente elétrica consumida pelo motor.....	101
<b>5.5.</b>	<b>Análise dos resultados .....</b>	<b>103</b>
<b>5.6.</b>	<b>Sumário .....</b>	<b>107</b>
<b>5.7.</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>108</b>
<b>6.</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>109</b>
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>111</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>117</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1 Curva características potência e binário de um motor a combustão. Adaptado de [3].....	6
Figura 2.2 – Esquema funcional de um banco de ensaio de potência. ....	6
Figura 2.3 – Teste de um veículo em um dinamómetro de chassis [4]. ....	7
Figura 2.4 – Aspeto constituinte de um dinamómetro de chassis [5].....	7
Figura 2.5 – Dinamómetro de motores [6].....	8
Figura 2.6 – Dinamómetro de transmissões [7]. ....	8
Figura 2.7 – Classificação dos dinamómetros quanto a tomada de potência. ....	10
Figura 2.8 – Classificação dos freios dinamométricos, adaptado de [9].....	11
Figura 2.9 – Representação esquemática de um freio de corda [11].....	12
Figura 2.10 - Freio de Prony com utilização de um dinamómetro [12]. ....	12
Figura 2.11 Freio de Prony com a utilização de pesos [12]. ....	12
Figura 2.12 – Princípio de operação do dinamómetro hidráulico [10].....	14
Figura 2.13 – Dinamómetro tipo Froude [10]. ....	14
Figura 2.14 – Dinamómetro de enchimento variável [10]. ....	14
Figura 2.15 - Motor de corrente contínua [14].....	16
Figura 2.16 - Motor de indução assíncrono monofásico [14]. ....	16
Figura 2.17 – Princípio de funcionamento de um freio de correntes de Eddy [2].....	17
Figura 2.18 – Dinamómetro de corrente de Eddy [2].....	17
Figura 2.19 – Esquema construtivo travão histerese [15]. ....	19
Figura 2.20 - Aspeto da relação entre corrente e binário de um travão de histerese [15].....	19
Figura 2.21 – Gama de funcionamento típica dos dinamómetros elétricos [10]. ....	20
Figura 2.22 – Gama de funcionamento típica para dinamómetros de corrente de Eddy [10]. ....	20
Figura 2.23 – Gama de funcionamento típica para dinamómetros hidráulicos (adaptado de [10]).....	20
Figura 3.1 – Diagrama esquemático do banco de ensaio de potência, principais componentes.....	26
Figura 3.2 – Aspeto de montagem do travão de histerese. ....	27
Figura 3.3 – Caixa de mancal e produtos associados [17]. ....	29
Figura 3.4 – Dados seleção caixa de mancal, adaptado de [18]. ....	29

Figura 3.5 – Aspectos dimensionais da caixa de mancal, adaptado de [18].....	29
Figura 3.6 – Detalhe de montagem do conjunto, adaptado de [17]. .....	30
Figura 3.7 – Parâmetros do rolamento selecionado, adaptado de [20]. .....	30
Figura 3.8 – Dados técnicos motores LEM 200 com destaque para o modelo utilizado, adaptado de [21]. ...	31
Figura 3.9 – Curvas de absorção de potência, adaptado de [16].....	32
Figura 3.10 – Transmissão ampliadora de velocidade, adaptado de [22]. .....	33
Figura 3.11 – Gráfico para seleção de correias do tipo HTD 5M, 8M e 14M, adaptado de [23]. .....	35
Figura 3.12 – Polia para montagem com bucha cônica, adaptado de [23].....	36
Figura 3.13 – Polias dentadas para correias sincronizadoras “HTD”, adaptado de [23]. .....	36
Figura 3.14 – Características da bucha cônica para montagem da polia, adaptado de [23].....	37
Figura 3.15 – Veio do travão, com o diâmetro maior na extremidade direita. ....	38
Figura 3.16 – Posição de montagem do casquilho no novo veio do travão .....	38
Figura 3.17 – Veio do travão durante o processo de maquinação. ....	38
Figura 3.18 – Travão de histerese montado com o novo veio. ....	39
Figura 3.19 – Ajustamentos recomendados ISO 286. ....	39
Figura 3.20 – Ajustamentos usualmente utilizados. ....	40
Figura 3.21 – Ajustamentos recomendados em relação ao tipo de ajuste desejado sistema furo base. ....	40
Figura 3.22 – Ajustamento no sistema furo base, adaptado de [24] .....	41
Figura 3.23 – Ajustamento no sistema veio base, adaptado de [24].....	42
Figura 3.24 – Equivalência sistema furo-base veio-base.....	42
Figura 3.25 – Sistema ISO de ajuste tipo veio básico .....	43
Figura 3.26 – Tolerâncias veio e rolamento do travão histerese.....	43
Figura 3.27 – Ajuste provável entre veio e rolamento travão histerese .....	44
Figura 3.28 – Travão de histerese Magtrol AHB-6, adaptado de [16].....	45
Figura 3.29 – Aspetto de montagem do travão de histerese, adaptado de [16].....	46
Figura 3.30 – Controlador Magtrol VM-8, adaptado de [25]. .....	47
Figura 3.31 – Esquema de funcionamento do controlador do travão de histerese, adaptado de [25]. .....	47
Figura 3.32 – Célula de carga LC509, adaptado de [26]. .....	47
Figura 3.33 – Exemplos de extensómetros, adaptado de [27] .....	48
Figura 3.34 – Amplitude do sinal de saída de um circuito Ponte de Wheatstone, adaptado de [27]. .....	48

Figura 3.35 – Sensor SNG-QPCA-001, adaptado de [28].....	50
Figura 3.36 – Aspeto do sinal de saída e posições de montagem possíveis, adaptado de [28]. .....	50
Figura 3.37 – <i>Placa Master Control Board</i> : (a) representa vista 2D do plano superior e (b) representa a vista 2D do plano inferior.....	52
Figura 3.38 – Vista 3D da placa MCB com identificação destaque dos componentes e da zona isolada. ....	52
Figura 3.39 – Isolador SPI, fabricação Mikroe. Adaptado de [29]. .....	54
Figura 3.40 – <i>Placa Can_Potentiometer</i> : (a) representa a vista 2D do plano superior e (b) representa a vista 2D do plano inferior.....	54
Figura 3.41 – Placa interface CAN, adaptado de [30].....	55
Figura 3.42 – Arquitetura da placa CAN_POTENTIOMETER com referência à conexão com a placa MCB. ....	56
Figura 3.43 – <i>Placa Current_Sensor</i> : (a) representa a vista 2D do plano superior e (b) representa a vista 2D do plano inferior.....	56
Figura 3.44 – Vista em perspetiva isométrica da placa. ....	57
Figura 3.45 – Esquema de montagem do núcleo de ferrite e do sensor Hall, adaptado de [31].....	57
Figura 3.46 – Esquema de distribuição de tensão. ....	59
Figura 3.47 – Comparação entre comunicação paralela (a) e comunicação série (b), adaptado de [33].....	60
Figura 3.48 – Conexão SPI entre um dispositivo mestre e um dispositivo Escravo, adaptado de [34].....	62
Figura 3.49 – Comparação entre a topologia “estrela” (a) e a topologia <i>daisy chain</i> (b), na qual observa-se a economia de terminais do controlador. Adaptado de [34]. ....	62
Figura 3.50 – Modos de transmissão SPI, adaptado de [35]. .....	63
Figura 3.51 – Topologia típica de um barramento CAN, adaptado de [37]. .....	65
Figura 3.52 – Níveis de tensão no barramento CAN, adaptado de [38].....	65
Figura 3.53 – Método de <i>bit stuffing</i> , adaptado de [39]. .....	66
Figura 3.54 – Estrutura de um <i>data frame</i> no protocolo <i>CAN standard</i> , adaptado de [40] . ....	66
Figura 3.55 – <i>Can extended frame</i> , adaptado de [40].....	67
Figura 3.56 – Arquitetura tipo <i>Superloop</i> , adaptado de [41].....	69
Figura 3.57 – Arquitetura <i>Background/Foreground</i> , adaptado de [42]. .....	70
Figura 3.58 – Fluxograma da configuração inicial do microcontrolador. ....	72
Figura 3.59 – Fluxograma referente ao programa principal do microcontrolador. ....	74
Figura 4.1 – Programa LabVIEW®: O Painel Frontal é apresentado em (a) e o Diagrama de blocos é apresentado em (b). .....	78
Figura 4.2 – Separador “Início” do painel frontal da aplicação. ....	80

Figura 4.3 - Representação parcial diagrama de blocos do separador “Início”.....	81
Figura 4.4 - Função <i>Handshake</i> .....	81
Figura 4.5 - Separador “Ensaio Manuais”.....	83
Figura 4.6 - Função para atualização dos valores dos atuadores.....	84
Figura 4.7 - Função para envio de dados para o microcontrolador.....	84
Figura 4.8 - Função que efetua a leitura dos dados amostrados pelo microprocessador.....	84
Figura 4.9 - Função para cálculo de variáveis.....	84
Figura 4.10 – Separador para a realização de ensaios automáticos.....	85
Figura 4.11 - Rotina para criação dos pontos de teste automático.....	86
Figura 5.1 – Posicionamento do travão lateralmente ao motor.....	89
Figura 5.2 – Posicionamento do travão sob o motor.....	90
Figura 5.3 – Posicionamento de alguns componentes na estrutura.....	90
Figura 5.4 – Arranjo para verificação da tensão obtida por protocolo CAN.....	93
Figura 5.5 – Comparação entre valor medido com multímetro e valor informado por protocolo CAN.....	93
Figura 5.6 – No canto superior esquerdo há o valor da tensão obtido pelo software de controlo e o mostrador analógico a esquerda representa a velocidade estimada do motor obtida mediante multiplicação da tensão pelo valor da constante de velocidade.....	93
Figura 5.7 – Medição da velocidade rotacional do motor.....	94
Figura 5.8 – Esquema funcional do controlador do travão de histerese, adaptado de [25].....	95
Figura 5.9 – Ajuste de carga do travão de histerese a 0%.....	95
Figura 5.10 – Ajuste de carga do travão de histerese a 50%.....	95
Figura 5.11 – Ajuste de carga do travão de histerese a 75%.....	96
Figura 5.12 – Ajuste de carga do travão de histerese a 99%.....	96
Figura 5.13 – Função transferência célula de carga.....	97
Figura 5.14 – Determinação da massa de um corpo de prova.....	98
Figura 5.15 – Circuito implementado para amostragem do sinal da célula de carga.....	98
Figura 5.16 – Função transferência sensor de rotações.....	99
Figura 5.17 – Posição de montagem do sensor de rotações.....	100
Figura 5.18 - Arranjo para ensaios no banco de potência.....	100
Figura 5.19 – Captura de tela do osciloscópio e valor de rotação reportado pelo programa de controlo.....	100
Figura 5.20 – Placa <i>Current Sensor</i> com detalhe a fixação do núcleo de ferrite.....	102

Figura 5.21 – Aferição do valor da resistência shunt. ....	102
Figura 5.22 – Arranjo para aferição do valor de corrente. ....	102
Figura 5.23- Função transferência shunt de corrente. ....	103
Figura 5.24 – Curvas de Potência e Binário do travão de histerese. ....	106
Figura 5.25 – Curvas de potência e binário do motor ....	107
Figura 5.26 – Comparação estimação do binário produzido pelo motor e binário consumido pelo travão....	107

# Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Trabalhos académicos que contribuíram para a revisão bibliográfica. ....	21
Tabela 3.1 – Características técnicas do travão de histerese, adaptado de [16].....	27
Tabela 3.2 – Características técnicas do travão de histerese, adaptado de [16].....	27
Tabela 3.3 – Principais parâmetros do travão de histerese. ....	28
Tabela 3.4 - Principais parâmetros do motor LEM 200-127. ....	31
Tabela 3.5 – Binário x Velocidade rotacional do travão de histerese.....	32
Tabela 3.6 – Protocolos de comunicação utilizados no projeto.....	59
Tabela 3.7 – Modos de operação SPI, adaptado de [34].....	63
Tabela 3.8 – Estrutura do quadro de mensagem CAN <i>standard</i> . ....	67
Tabela 3.9 – Objetivos intermédios atingidos. ....	75
Tabela 4.1 – Objetivo intermédio concluído. ....	87
Tabela 5.1 – Campo de dados da mensagem CAN do controlador do motor, adaptado de [46]. ....	92
Tabela 5.2 – Aferição célula de carga. ....	97
Tabela 5.3 – Aferição do sensor de rotações. ....	99
Tabela 5.4 – Aferição shunt de corrente.....	103
Tabela 5.5 – Dados ensaio sistema.....	104
Tabela 5.6 – Cálculos de grandezas relativas ao motor.....	105
Tabela 5.7 – Dados referentes ao travão de histerese.....	106
Tabela 5.8 – Rendimento conjunto Controlador + Motor + Travão.....	106

# Lista de siglas e acrónimos

μC	Microcontrolador
AC	Corrente alternada
ADC	Conversor Analógico Digital
AI	Amplificador de instrumentação
CAN	<i>Controller Area Network</i>
DAC	Conversor Digital Analógico
DC	Corrente contínua
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
IPL	Instituto Politécnico de Leiria
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KGF	Quilograma força
LabVIEW®	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
N	Newton
NP	Normas Portuguesas
PC	<i>Personal Computer</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PWM	Modulação por largura de pulso
RPM	Rotações por minuto
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TRANSCEIVER	Transmissor Recetor
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VI	<i>Virtual Instrument</i>

# 1. Introdução

Serve o presente capítulo para realizar a apresentação daquilo que motivou o desenvolvimento deste projeto, qual é o principal objetivo a ser atingido para obter a sua conclusão e fazer a apresentação da estrutura do relatório e os respectivos assuntos que serão tratados em cada um de seus capítulos.

## 1.1. Motivação

Como forma de resposta a redução de emissões de poluentes e a busca por alternativas à redução do consumo de combustíveis fósseis, a eletrificação dos meios de mobilidade e micro mobilidade apresenta-se como uma alternativa viável. Sua adoção encontra-se em expansão nos mais diversos segmentos e adotam-se as mais diversas configurações. É uma alternativa concreta para a migração em direção a um futuro mais verde no qual a eletrificação alcança diferentes aplicações desde veículos até áreas como o lazer e o desporto, nos quais pode-se citar a eletrificação de karts, bicicletas e competições como a Formula-E<sup>®</sup> e a MotoE<sup>®</sup>. Neste processo de eletrificação, um dos componentes fulcrais são os motores elétricos e seus respectivos controladores. Faz-se necessário a existência de um sistema que possibilite a realização de ensaios e testes nestes motores, necessidade que pode surgir em diferentes momentos, como por exemplo, no refinamento de projetos de novos motores, após a intervenção para reparação de algum componente, durante a validação de ajustes implementados no respectivo controlador e, talvez uma das mais importantes aplicações, a validação dos dados de desempenho declarados pelo fabricante/fornecedor de um determinado motor.

Neste contexto, depara-se com a necessidade de dispor de um recurso que seja capaz de realizar testes e ensaios a motores elétricos com o objetivo de caracterizá-los, notadamente, no que diz respeito as suas características de binário e potência.

## 1.2. Objetivos

O objetivo deste projeto é apresentar uma solução para a necessidade de se ensaiar e caracterizar motores elétricos, para tal será desenvolvido um banco de ensaio de potência. O sistema, tal como foi concebido, realizará os ensaios em regime estático, isto é, são ajustados níveis discretos de carregamento e afere-se a respetiva potência e binário debitados pelo motor. Ressalta-se que o sistema deverá ser capaz de realizar os testes de maneira manual e automática, conforme decisão da pessoa que conduz os ensaios.

Em função da otimização de recursos disponíveis para o desenvolvimento deste projeto, deverá ser utilizado como fonte de binário de carga um travão de histerese de fabricação MAGTROL, modelo AHB-6, existente no Laboratório Engenharia Automóvel da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria. Para tal, serão pesquisados, estudados e selecionados componentes e tecnologias existentes no mercado que atendam eventuais constrangimentos ocasionados pela adoção deste travão. Propõe-se o desmembramento do objetivo principal em quatro objetivos intermédios. A conclusão destes objetivos parciais, ou intermédios, culminarão na conclusão do respetivo projeto. Apresenta-se o detalhamento de cada um destes objetivos:

**- Objetivo 1 – Efetuar a recuperação funcional e adequar o travão de histerese ao projeto em causa:** O travão de histerese utilizado neste projeto já foi aplicado a outros projetos desenvolvidos nos cursos de licenciatura e mestrado em Engenharia Automóvel do Instituto Politécnico de Leiria e por conseguinte, apresenta marcas de desgaste e danos superficiais em seu veio. Outra questão diz respeito ao comprimento deste veio, visto que se faz necessário adequá-lo ao sistema de apoio em chumaceira e sistema de transmissão idealizado. Para responder tais questões, será projetado um novo veio com o objetivo de substituir o elemento danificado e também possuir dimensões adequadas para possibilitar a respetiva montagem.

**- Objetivo 2 - Desenvolver de um sistema de aquisição de dados e interface de controlo com os elementos do banco de ensaio:** Para possibilitar o funcionamento do banco de ensaio de potência faz-se necessário que haja um conjunto de elementos que permitam a interface entre o sistema físico e o sistema computacional de controlo. Faz necessário adquirir diversos dados como por exemplo, rotação do travão de histerese, carga aplicada à célula de carga, tensão elétrica e corrente elétrica consumida pelo motor sob teste, bem como atuar sobre os dispositivos de controlo, tal como o controlador do travão de histerese, sistema

de controlo de velocidade do motor e corte de emergência do sistema, por exemplo. Essa interface será desenvolvida com recurso a uma placa Arduino<sup>®</sup>, sensores de rotação, temperatura, pressão atmosférica e outros dispositivos eletrónicos acondicionados em placa de circuito impresso a ser desenvolvida.

- **Objetivo 3 – Desenvolver de um sistema de automatização e controlo baseado em LabVIEW<sup>®</sup>:** Talvez o objetivo mais desafiante e importante do projeto. Trata-se do desenvolvimento da aplicação computacional que será responsável pelo controlo, interface Homem-Máquina, apresentação gráfica de resultados e gravação de ficheiros com resultados dos ensaios. Tal aplicação será desenvolvida com recurso ao conceito de Instrumentação Virtual suportada pelo software LabVIEW<sup>®</sup>.

- **Objetivo 4 - Executar testes para validação, calibração e afinação do modelo:** Ao término do desenvolvimento do banco de ensaio, será necessário proceder com a calibração e afinação do sistema, por exemplo, identificar os dados de saída da célula de carga sem nenhum binário aplicado pelo travão e parametrizar esse valor no sistema de controlo como “carga aplicada = 0 (zero)”. Há de se esperar uma maior exatidão dos ensaios subsequentes de maneira a caracterizar o mais precisamente possível os motores sob ensaio após realização desta calibração.

### 1.3.Estrutura do relatório

O relatório deste projeto encontra-se estruturado em seis capítulos.

O presente capítulo (**capítulo 1**) diz respeito a introdução do projeto, a motivação para o seu desenvolvimento, quais os objetivos a serem alcançados e a respetiva estruturação do relatório.

O **capítulo 2** envolve a revisão bibliográfica a respeito dos bancos de ensaios de potência, aos diferentes tipos de dispositivos existentes para o desenvolvimento de binário de carga e pesquisa de literatura de referência para o projeto.

O **capítulo 3** é aquele dedicado a descrição da tecnologia de suporte ao projeto, relacionando os componentes mecânicos e eletroeletrónicos adotados e as respetivas justificações para a seleção destes.

O **capítulo 4** é dedicado a apresentação do desenvolvimento do sistema computacional responsável pela operação e controlo do banco de ensaio de potência.

O **capítulo 5** aborda os aspetos de montagem do sistema e os ensaios de afinação e validação do projeto.

Finalmente, no **capítulo 6** são apresentados e discutidos os resultados obtidos bem como são apresentadas sugestões de melhoria e desenvolvimentos futuros.

## 1.4. Sumário

Neste capítulo foi apresentado o problema ao qual este projeto busca apresentar uma resposta, que é a realização de testes e ensaios para a caracterização de motores elétricos de pequeno porte. Definiu-se como objetivo principal o desenvolvimento de um banco de potência, mediante utilização de um travão de histerese como elemento gerador de carregamento.

O objetivo principal foi desmembrado em quatro objetivos intermédios:

- Efetuar a recuperação funcional e adequar o travão de histerese ao projeto em causa.
- Desenvolver de um sistema de aquisição de dados e interface de controlo com os elementos do banco de ensaio.
- Desenvolver de um sistema de automatização e controlo baseado em LabVIEW®.
- Executar testes para validação, calibração e afinação do modelo.

O capítulo é finalizado com a apresentação da estrutura do relatório na qual descreve-se quais os assuntos serão abordados em cada um de suas partes.

## 2. Revisão Bibliográfica

O presente projeto possui um caráter eminente prático, entretanto neste capítulo será apresentada uma contextualização bibliográfica que abordará os diferentes tipos de bancos de ensaios de potência e a caracterização de alguns dos elementos mais usuais para a geração de binário de carga e que são empregados nos bancos de ensaios de potência. O embasamento teórico apresentado neste capítulo tem como objetivo introduzir conceitos e metodologias gerais relacionadas aos ensaios de motores. Há de se registrar que alguma das soluções apresentadas podem ser adequadas para a realização de ensaios de motores a combustão, enquanto outras soluções podem se mostrar mais adequadas para os ensaios de motores elétricos. Finaliza-se o capítulo com a apresentação da literatura de referência para o projeto.

### 2.1. Bancos de Ensaio de Potência

Existem diferentes maneiras de se definir o que é um banco de ensaio de potência. Uma destas definições refere que os bancos de ensaio de potência são “dispositivos capazes de realizar medições de força, binário ou potência e concebidos para simular diferentes exigências de carregamento” com o objetivo de se testar as prestações de um motor [1]. Os bancos de ensaio de potência são dotados de dispositivos que efetuam a medição de velocidade rotacional e do binário de carga e calculam a potência desenvolvida pelo motor ensaiado conforme a equação (1), na qual **P** expressa a potência em watt (W), **M** o binário em newton metro (Nm) e  $\omega$  a velocidade angular em radianos por segundo (rad/s).

$$P = M \times \omega \quad (1)$$

O resultado pode ser apresentado de diferentes maneiras, de acordo com o foco do ensaio a ser realizado. Entretanto, uma forma trivial de mostrar o resultado é a apresentação de curvas de potência e binário em função da velocidade, conforme figura 2.1.

É possível definir três grupos funcionais principais que constituem um banco de ensaio de potência conforme esquema representado pela figura 2.2. O primeiro bloco funcional diz a

respeito a conexão entre o elemento sob ensaio e o banco de ensaio; o segundo bloco funcional, de grande relevância, é o mecanismo responsável pela geração de binário de carga; o terceiro bloco funcional, também de elevada relevância, é o sistema de controlo e aquisição de dados do ensaio, notadamente os valores de velocidade rotacional e de binário aplicado pelo elemento gerador de carregamento [2]. Visto que uma das principais finalidades de um banco de ensaio de potência é medir as forças atuantes em determinado equipamento, decorre desta finalidade o facto dos bancos de ensaio de potência serem conhecidos por dinamómetros. Face essa consideração no presente trabalho o termo **dinamómetro** terá o mesmo significado a banco de ensaio de potência.



Figura 2.1 Curva características potência e binário de um motor a combustão. Adaptado de [3].

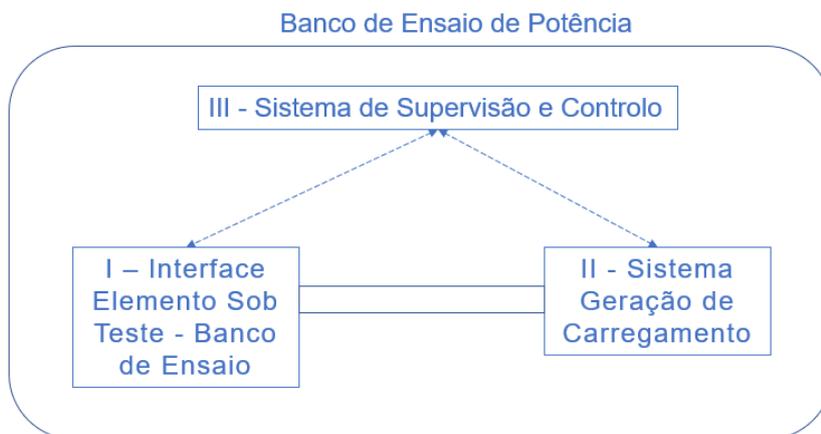


Figura 2.2 – Esquema funcional de um banco de ensaio de potência.

Existem diversos tipos de dinamómetros dos quais os mais usuais são aqueles que permitem avaliar todo o conjunto motor e sistema de transmissão de um veículo (dinamómetro de chassis), aqueles que permitem a avaliação apenas dos motores (dinamómetros de motores) e também existem modelos destinados a avaliação de transmissões (dinamómetros de transmissões). Nas figuras 2.3 a 2.6 é possível observar o respetivo aspeto de cada um destes tipos de dinamómetros.



Figura 2.3 – Teste de um veículo em um dinamómetro de chassis [4].

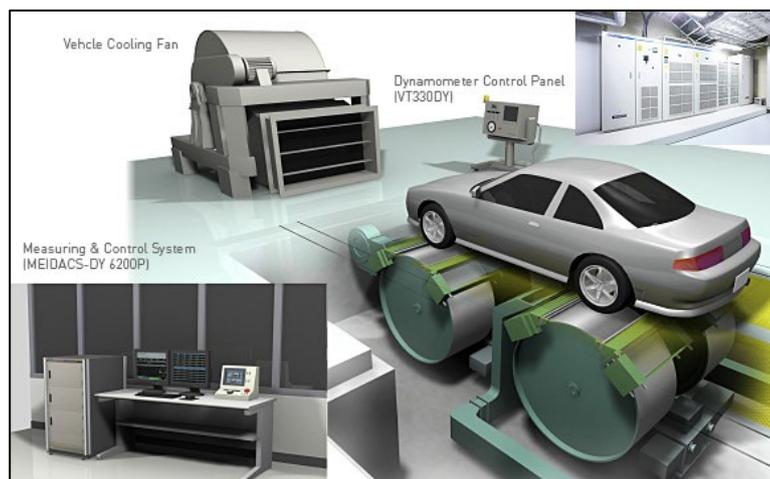


Figura 2.4 – Aspeto constituinte de um dinamómetro de chassis [5].



Figura 2.5 – Dinamômetro de motores [6].



Figura 2.6 – Dinamômetro de transmissões [7].

**Dinamômetro de chassis:** Neste tipo de equipamento o motor não é retirado do veículo para realização do ensaio. O veículo é posicionado sobre o equipamento e a transferência de energia se dá pelas rodas do veículo. Por esse motivo a utilização dos dinamômetros de chassis facilita a realização de testes e é possível verificar a energia efetivamente disponibilizada a roda, ou seja, a energia produzida pelo motor subtraída da parcela que é perdida ao longo da cadeia de transmissão. Existem modelos para veículos com tração em um único eixo e também modelos de dinamômetros para veículos dotados de tração às 4 rodas. Uma importante observação no que diz respeito a segurança de pessoas, equipamentos e instalações é o correto posicionamento do veículo no banco de ensaio e a sua respetiva ancoragem.

**Dinamómetros de bancada ou de motor:** Este tipo de equipamento é caracterizado pela montagem do motor ao banco de ensaio, usualmente a transmissão de energia é feita por intermédio de um sistema de acoplamento dotado de um veio. É um sistema de ensaio algo mais complexo visto a necessidade de desmontagem do motor do veículo e a sua respetiva instalação ao dinamómetro. A célula de ensaio deverá possuir sistemas auxiliares para assegurar a alimentação de combustível, suprimento de água, circulação de ar, exaustão dos gases de escape entre outros.

**Dinamómetros de transmissões:** Esta categoria de equipamento é destinada a realização de testes e ensaios de transmissões. É dotado de um motor para fornecer energia a transmissão e de um elemento conectado a saída da transmissão que poderá efetuar medições ou simular uma carga.

## 2.2.Elemento Gerador de Carregamento

Um dos constituintes mais importantes de um banco de ensaio de potência é o elemento responsável pela geração de carregamento, o qual deverá ser selecionado mediante a aplicação de diferentes critérios e que influenciará grandemente as características técnico-operacionais do banco de ensaio. Alguns destes fatores a se levar em consideração são:

- Gama de potência dos motores a serem ensaiados;
- Tipo de motores a serem ensaiados;
- Velocidade de resposta desejada;
- Custos;
- Tipos de testes que se deseja efetuar.

Tem-se então duas categorias de elementos para a geração de carregamento, os dinamómetros de transmissão e os dinamómetros de absorção. Há de se referir ainda que os dinamómetros de absorção podem ser divididos em dinamómetros de travagem e em dinamómetros inerciais. Os primeiros medem o binário e a potência do motor travando-o a determinada velocidade rotacional. Este tipo de equipamento é utilizado para medições de cariz mais científico, nas quais é possível levantar variados dados relativos ao motor, por exemplo, desempenho, consumo e emissão de poluentes. Os dinamómetros inerciais são voltados para medições de cariz mais “técnico” como, por exemplo, pequenas

transformações de motores. São utilizados para simular a inércia do veículo, medindo a velocidade do veículo em função do tempo, dotados de cilindros de inércia (massas) que são obrigadas a rodar pelo veículo. São fáceis de usar e proporcionam resultados sob a forma de curvas binário e potência em poucos segundos, entretanto não são apropriados para “mapear” um motor [8]. Será dada ênfase aos dinamômetros de travagem uma vez que, no presente projeto, utilizar-se-á um elemento desta categoria para a geração de binário resistente. O dinamómetro de travagem, ou freio dinamométrico, pode ser classificado de acordo com o princípio físico envolvido para a absorção de potência mecânica. Pode ser por princípios mecânicos, nos quais a energia é dissipada por intermédio do atrito e consequente geração de calor, pode ser por fenómenos hidráulicos, os quais, a exceção do dinamómetro de discos, funcionam pela movimentação de água entre o rotor contra um estator ou ainda com os dinamómetros elétricos, que são aqueles que utilizam uma máquina elétrica para geração do efeito de travagem. Ressalta-se que neste projeto será utilizado como elemento absorvedor de energia um travão de histerese, dispositivo que se enquadra na categoria dos travões eletromagnéticos. Na figura 2.7 encontra-se representada a classificação dos dinamómetros em relação ao ponto de tomada de potência e na figura 2.8 representa-se uma classificação dos dinamómetros de acordo com o princípio de absorção de potência mecânica.

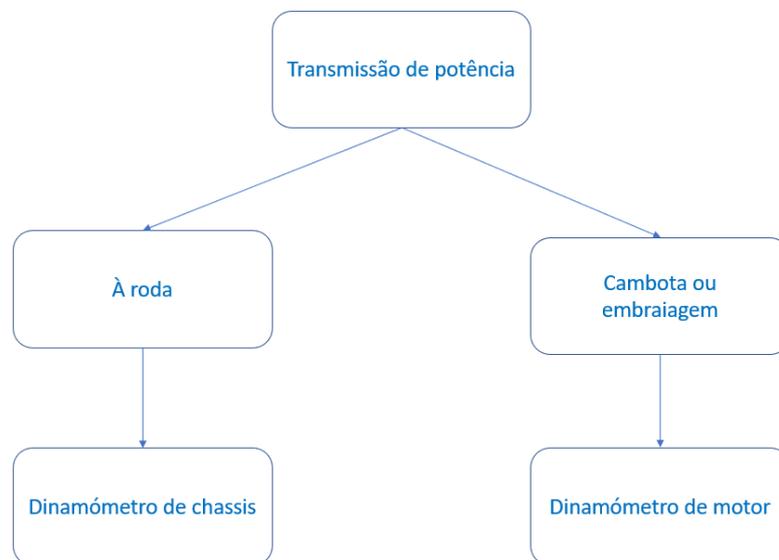


Figura 2.7 – Classificação dos dinamómetros quanto a tomada de potência.

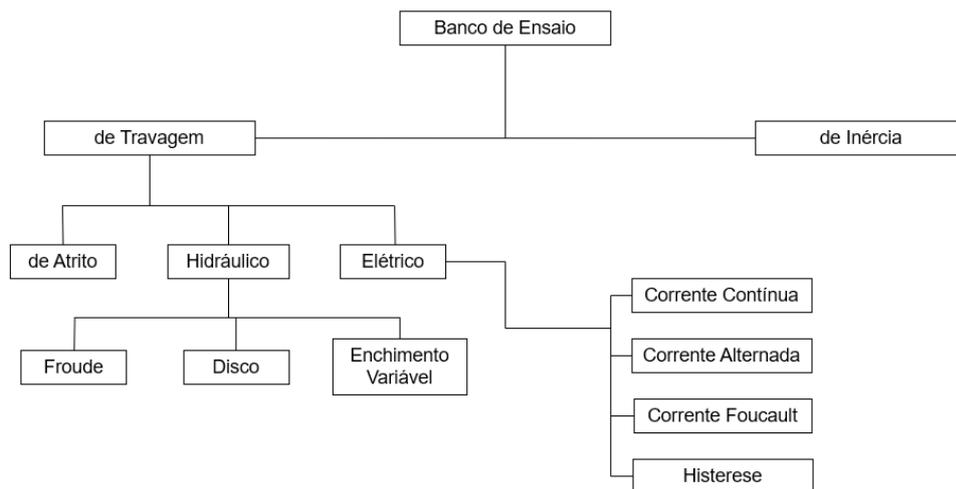


Figura 2.8 – Classificação dos freios dinamométricos, adaptado de [9].

### 2.2.1. Dinamómetros de Atrito

Os dispositivos de atrito foram as formas primitivas de se efetuar a medição de potência, datam do início do século XIX. Na figura 2.9 tem-se representado o Freio de Corda, “um dispositivo extremamente perigoso que, entretanto, é capaz de medir potência com alguma precisão” [10]. Foi sucedido pelo freio de Prony, que também utiliza atrito para imprimir carregamento ao motor sob ensaio. O freio de Prony é formado por duas maxilas reguláveis responsáveis por promover o travamento do motor. Existe também um braço de comprimento conhecido no qual, em seu extremo livre, poderá haver um dinamómetro para indicação de carga aplicada ou em versões mais simples, um recetáculo para o posicionamento de pesos para promover o equilíbrio ao binário transmitido pelo motor que induz uma tendência de giro ao braço [2], [9], [10], nas figuras 2.10 e 2.11 há a representação de um freio de Prony e na figura 2.11 é possível observar que o binário produzido pelo motor é equilibrado pela reação da força peso em newton (N), representada pela letra  $F$ , multiplicada pelo braço de alavanca  $l$  em metro (m). Ambos são dispositivos considerados obsoletos.

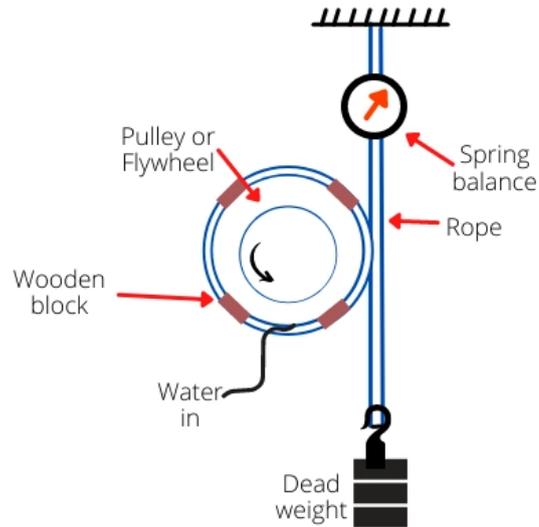


Figura 2.9 – Representação esquemática de um freio de corda [11].

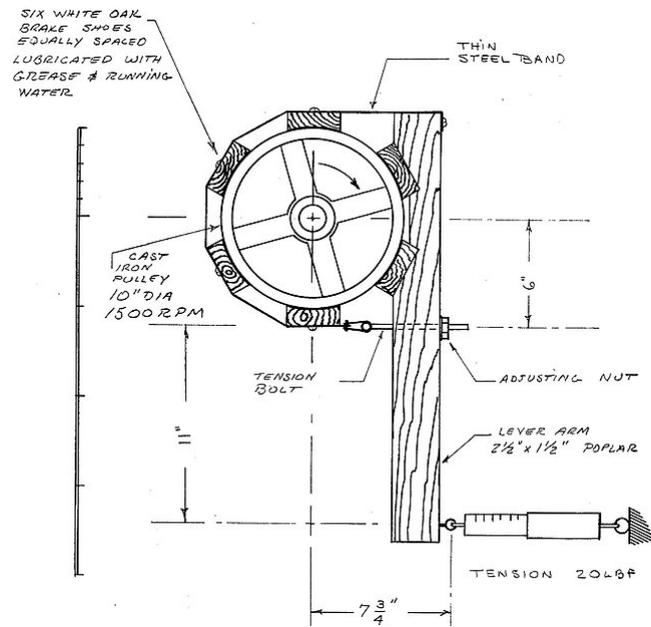


Figura 2.10 - Freio de Prony com utilização de um dinamómetro [12].

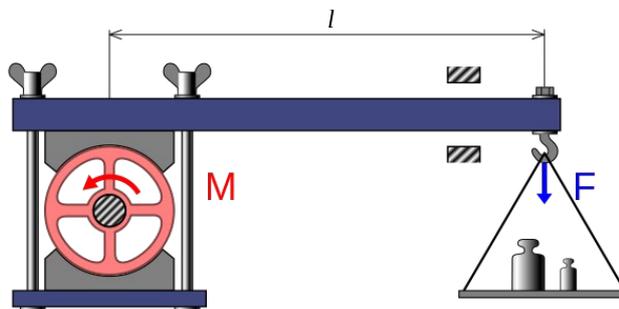


Figura 2.11 Freio de Prony com a utilização de pesos [12].

### 2.2.2. Dinamómetros Hidráulicos

A exceção do dinamómetro de disco, todos os dinamómetros hidráulicos baseiam-se no mesmo princípio de funcionamento. O motor é conectado por intermédio de um veio ao rotor, que ao ser rotacionado gera uma intensa circulação de água por cavidades existentes em sua estrutura e também do estator, este efeito causa a transferência de binário do rotor para o estator que acaba por ocasionar uma reação igual e de sentido contrário em sua carcaça [10], na figura 2.12 apresenta-se o princípio de funcionamento deste equipamento e na representação mais a direita observa-se o aspeto toroidal dos vórtices de escoamento de água os quais transferem o binário do rotor para o estator. Neste processo há dissipação de potência sob forma de calor, portanto a água assume dois papéis neste tipo de equipamento, atua como fluido de trabalho e também como fluido de refrigeração [13]. Os dinamómetros hidráulicos podem ser classificados de duas maneiras, de acordo com a maneira que o binário resistivo é variado:

- Dispositivos de enchimento constante ou dinamómetro tipo Froude;
- Dispositivos de enchimento variável.

#### *Dinamómetro tipo Froude*

Neste tipo de equipamento o binário da máquina é controlado pela adição ou retirada de finas placas posicionadas entre o rotor e o estator, controlando a geração de vórtices, ver figura 2.13.

#### *Dinamómetros de enchimento variável*

Essencialmente são equipamentos similares aos dispositivos tipo Froude, entretanto o ajuste do binário absorvido é feito mediante o controlo do caudal de água em circulação no interior do dinamómetro por intermédio de uma válvula na saída da água e um sistema de controlo de variada complexidade. Possuem a vantagem de uma resposta dinâmica mais rápida quando comparadas aos dispositivos de enchimento constante [10]. Encontram-se na família dos maiores dinamómetros jamais feitos, há equipamentos com rotores de diâmetro de aproximadamente cinco metros [9].

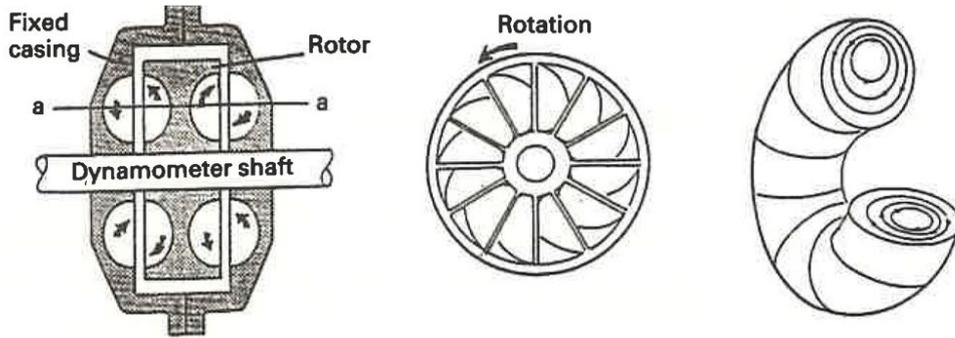
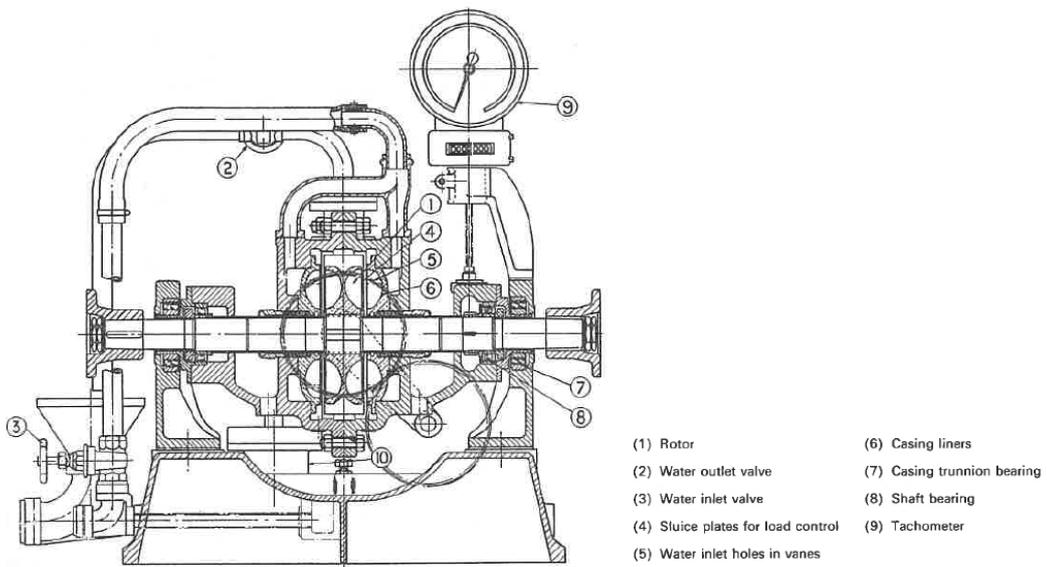


Figura 2.12 – Princípio de operação do dinamómetro hidráulico [10].



Typical cross-section through casing of Froude dynamometer, type DPX

Figura 2.13 – Dinamómetro tipo Froude [10].

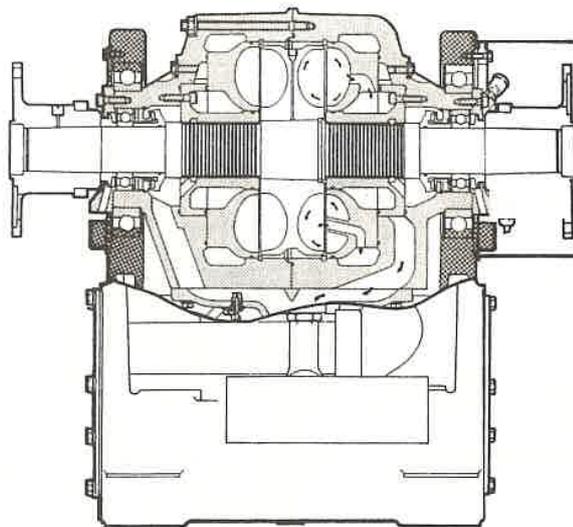


Figura 2.14 – Dinamómetro de enchimento variável [10].

### *Dinamómetros de disco*

Estas máquinas não são muito utilizadas, consiste em um ou mais discos planos localizados entre placas no estator com uma folga bastante pequena. Nesta categoria de equipamento a potência é dissipada por cisalhamento da água enquanto o controlo é efetuado de maneira semelhante aos dispositivos de enchimento variável. Possuem desempenho deficiente para baixas velocidades, entretanto suas boas características para velocidades elevadas fazem deste equipamento uma escolha acertada para o ensaio de turbinas a gás [10].

### **2.2.3. Dinamómetros Eléctricos**

A característica comum destes equipamentos é o facto de absorverem potência mediante conversão de energia mecânica em energia eléctrica. A energia absorvida então pode ser retirada sob a forma de electricidade nas máquinas de corrente contínua ou de corrente alternada ou sob a forma de calor nas máquinas de corrente Eddy, que é absorvido por um fluido de arrefecimento.

### *Dinamómetros de corrente contínua (d.c.)*

Este tipo de dinamómetro é constituído por uma máquina de corrente contínua controlada eletronicamente que pode operar como motor ou como gerador. A máquina de corrente contínua absorve energia mecânica ao operar como gerador e é capaz de fornecer energia mecânica quando opera com motor. São máquinas robustas, de construção simples e facilmente controláveis. Suas desvantagens dizem respeito a velocidade máxima limitada, e alta inércia [10]. Há uma tendência de substituição das máquinas de corrente contínua pelas máquinas de corrente alternada uma vez que há uma evolução tecnológica dos sistemas de controlo de velocidade e binário destas máquinas, o que faz com que seu controlo seja assemelhado ao controlo das máquinas de corrente contínua.

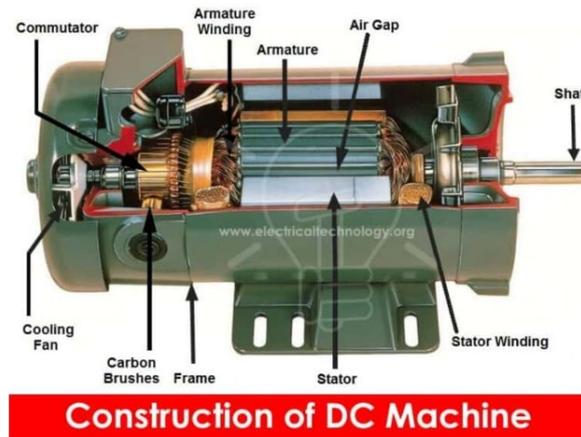


Figura 2.15 - Motor de corrente contínua [14].

### *Dinamómetros de corrente alternada (a.c.)*

São dinamómetros equipados com máquinas de corrente alternada, estas podem ser do tipo síncrona ou assíncrona e também são capazes de operar como motor ou como gerador. O desenvolvimento dos sistemas eletrónicos de controlo das máquinas a.c. possibilitou a sua utilização em substituição às máquinas de corrente contínua com vantagens relativas a custos, menores inércias e partilhando as mesmas vantagens das máquinas de corrente contínua.

As máquinas **assíncronas** usualmente são do tipo gaiola de esquilo, tipo de máquina em que o rotor é constituído por barras metálicas curto-circuitadas por anéis em suas extremidades e o seu controlo é feito por intermédio de variadores eletrónicos de tensão-frequência. As máquinas **síncronas**, que permitem um maior controlo em funcionamento e capazes de um desempenho dinâmico superior devido à sua inércia mais baixa que a dos motores síncronos, entretanto requerem um sistema de controlo mais elaborado.

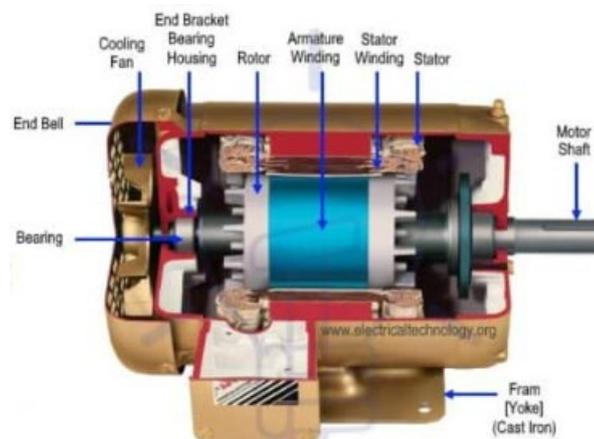


Figura 2.16 - Motor de indução assíncrono monofásico [14].

### *Dinamômetros de corrente de Eddy*

O funcionamento deste tipo de dinamómetro é baseado no princípio de geração de correntes parasitas (correntes de Foucault ou correntes de Eddy) no interior de massas metálicas condutoras, no interior de campos magnéticos variantes no tempo. A figura 2.17 representa o princípio de geração de correntes de Eddy quando o eletroímã é alimentado por uma corrente elétrica. Neste momento é induzido um campo magnético no disco, surgem as correntes de Eddy que geram um campo magnético, cuja interação com o campo magnético do eletroímã produz o efeito de travagem do disco metálico [2]. Neste tipo de dinamómetro é desenvolvido um binário resistente no rotor e o correspondente binário de reação no estator. O binário de reação pode ser medido por intermédio de uma célula de carga montada a uma distância específica do centro da carcaça. Conhecendo-se a velocidade do veio que suporta o rotor é possível calcular a potência.

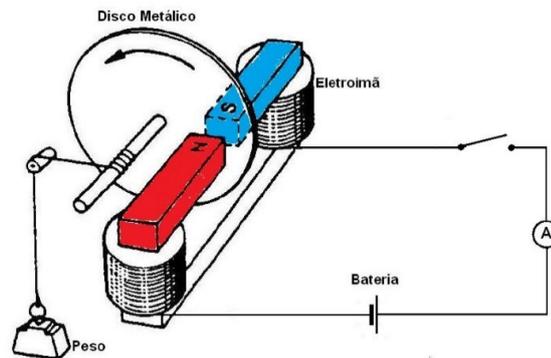


Figura 2.17 – Princípio de funcionamento de um freio de correntes de Eddy [2].

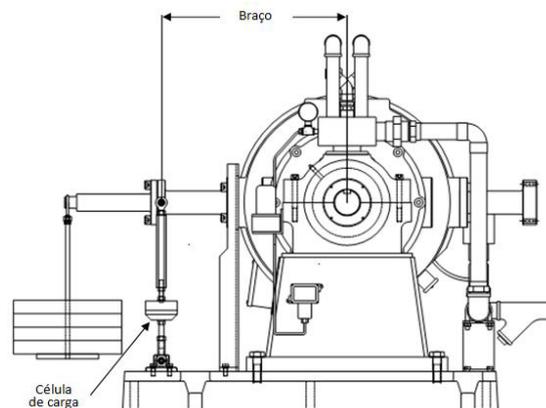


Figura 2.18 – Dinamómetro de corrente de Eddy [2].

### *Travão eletromagnético*

Para o desenvolvimento deste projeto será utilizado um travão de histerese e uma célula de carga, constituindo-se então em uma unidade funcional que atuará como um dinamómetro de travagem. Regista-se que os travões de histerese pertencem a categoria dos travões eletromagnéticos e muitas das vezes confunde-se o seu funcionamento com o daqueles baseados em correntes de Eddy.

Os travões de histerese são constituídos por dois membros primários, um rotor e uma estrutura de pólo, que interagem magneticamente para produzir a força de travagem. A estrutura de pólo é composta por um pólo interior, uma carcaça e uma bobine que formam a parte fixa do travão. A estrutura do pólo é feita de tal forma que existe um pequeno entreferro no qual gira o copo de arraste (ou rotor). O rotor é fixado à um eixo e suportado por um conjunto de rolamentos, este arranjo constitui a parte móvel do travão de histerese, ver figura 2.19. Ao energizar a bobine, um campo magnético proporcional à corrente é estabelecido através do entreferro. O rotor, localizado no interior deste entreferro, fica magnetizado. Devido às suas propriedades específicas de histerese, o rotor resiste ao movimento, criando um binário de travagem entre a estrutura de pólo e o rotor. O binário transmitido permanece constante e suave à medida que o rotor é forçado a rodar dentro da caixa de ar e responderá aos aumentos e diminuições da corrente da bobine com os correspondentes aumentos e diminuições de binário. Em condições normais de funcionamento, a orientação magnética do rotor está constantemente a ser realinhada à medida que roda dentro da estrutura do pólo e que a corrente da bobina é aumentada ou diminuída. Nestas condições dinâmicas, a remoção da corrente da bobina, e/ou alterações na corrente da bobina, resultam numa transição suave de um nível de binário para o seguinte. Embora um ligeiro efeito de corrente de Eddy esteja presente num dispositivo de histerese, o binário nominal total pode ser fornecido independentemente da velocidade de deslizamento e essa é uma das principais diferenças em relação aos dispositivos que funcionam por corrente de Eddy e necessitam de elevadas velocidades rotacionais [15].

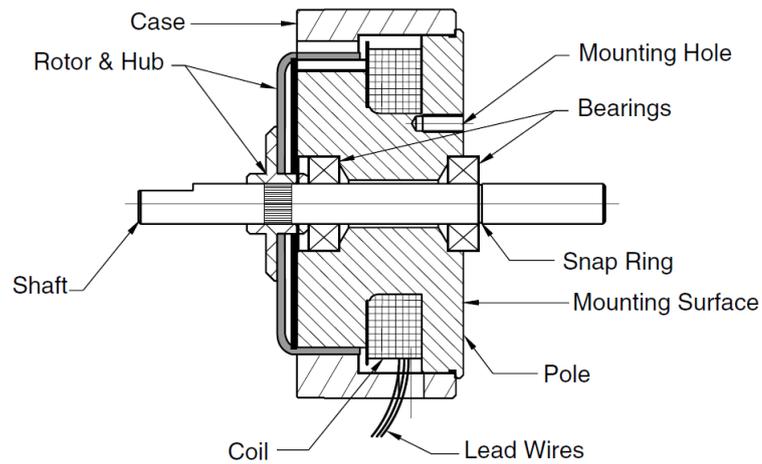


Figura 2.19 – Esquema construtivo travão histerese [15].

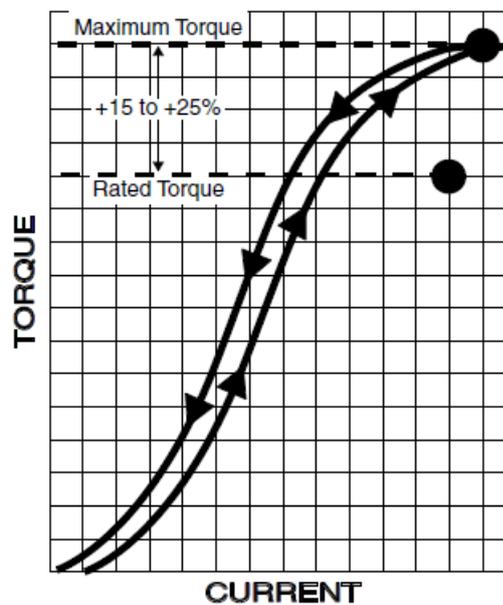


Figura 2.20 - Aspeto da relação entre corrente e binário de um travão de histerese [15].

### 2.3.Caraterísticas Binário e Potência dos diferentes dinamómetros

Conforme citado, cada tipo de dinamómetro possui uma característica própria de absorção de energia. Alguns podem ser mais apropriados para aplicações de baixa velocidade, outros para velocidades mais elevadas, uma determinada aplicação pode dissipar energia desde velocidade nula, outra aplicação poderá exigir uma resposta dinâmica elevada. A pessoa que está a seleccionar o dinamómetro para uma determinada aplicação deverá escolher aquele que melhor corresponde a gama de equipamento sob ensaio, de maneira a caracterizar

corretamente suas propriedades. Nas figuras 2.21 a 2.24 é possível observar as curvas típicas de binário e potência para diferentes tipos de dinamômetros.

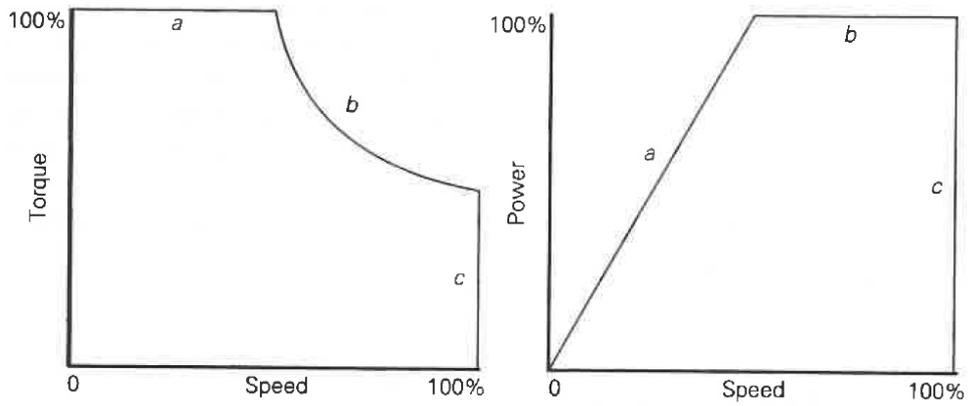


Figura 2.21 – Gama de funcionamento típica dos dinamômetros elétricos [10].

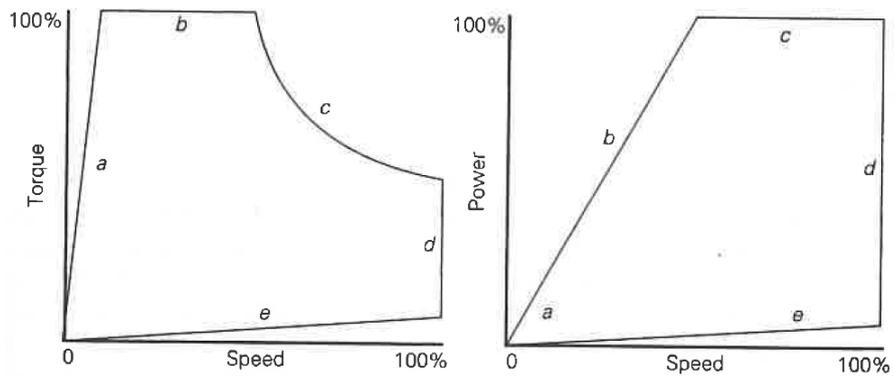


Figura 2.22 – Gama de funcionamento típica para dinamômetros de corrente de Eddy [10].

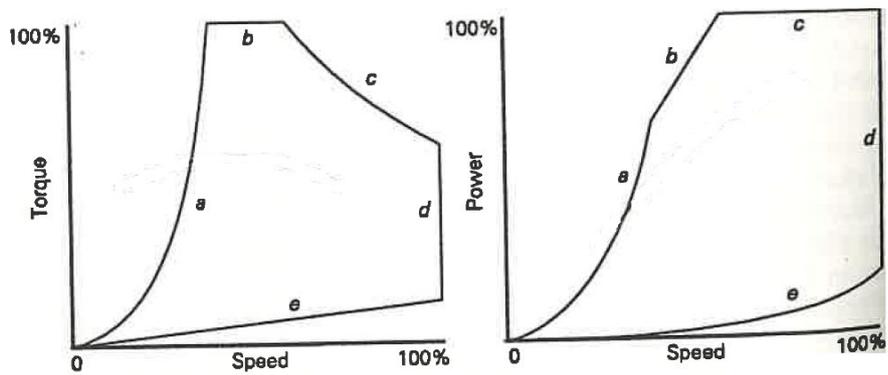


Figura 2.23 – Gama de funcionamento típica para dinamômetros hidráulicos (adaptado de [10]).

## 2.4. Referência bibliográfica para o projeto

A pesquisa bibliográfica para referência deste projeto baseou-se em três linhas:

- Pesquisa de trabalhos académicos referentes a bancos de ensaio de potência que fazem uso de travões de histerese e controlo mediante utilização de instrumentação virtual (LabVIEW®);
- Pesquisa de trabalhos académicos referentes a bancos de ensaio de potência que fazem uso de travões de histerese. E;
- Pesquisa de trabalhos académicos referentes a bancos de ensaio de potência que possuem controlo efetuado por instrumentação virtual (LabVIEW®).

Na tabela 2.1 abaixo encontram-se relacionados alguns trabalhos académicos que de uma maneira ou outra relacionam-se com os critérios apresentados com a respetiva linha de trabalho desenvolvida.

**Tabela 2.1 – Trabalhos académicos que contribuíram para a revisão bibliográfica.**

Nome do trabalho	Autor	Linha de trabalho	Relevância para o presente projeto
“Plataforma de testes de desempenho veicular para dinamómetros inerciais em linguagem labview©.”	Joseanne C. O. Viana	Desenvolver um sistema de aquisição de dados para dinamómetros inerciais utilizando a ferramenta de programação LabVIEW®	Utilização da ferramenta de programação LabVIEW®.
“Sistema de aquisição de dados baseado em labview para um dinamómetro de chassi.”	Luis G. G. K. Gesteira	Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados baseado em LabVIEW para retrofit de um banco de ensaio de chassis BOSCH FLA 203.	Utilização da ferramenta de programação LabVIEW®.
“Freio dinamométrico para ensaio de pequenos veículos de tracção eléctrica.”	Pedro G. D. Baptista	Desenvolver um banco de ensaio capaz de caracterizar, em regime estático e dinâmico, o desempenho do conjunto motor eléctrico, redutor, semieixo e roda de um veículo eléctrico.	Ensaio de motor eléctrico.
“Desenvolvimento de Bancadas Para Testes de Motores e Veículos.”	Sérgio P. F. Marques	Desenvolvimento de um dinamómetro de inércia, desenvolvimento de uma bancada de testes para EV e desenvolvimento de um dinamómetro de chassis	Bancada de ensaio para veículos eléctricos.
“ <i>Fractional horsepower dynamometer - a general purpose Hardware-in-the-loop real-time simulation platform for nonlinear control Research and education.</i> ”	<i>Yashodhan Tarte, Yangquan Chen, Wei Rent and Kevin Moore</i>	Utilização de um dinamómetro para ensaios de motores “ <i>fractional horsepower</i> ”, emulando não-linearidades e esquemas de controle não linear.	Utilização de freio de histerese em um dinamómetro.

Existem outros trabalhos que não foram citados e também contribuíram para o desenvolvimento da revisão bibliográfica, entretanto a grande maioria dos trabalhos encontrados diz respeito a utilização dos travões baseados em corrente de Eddy e também aplicações relacionadas ao desenvolvimento de bancos de ensaio de chassis. Foi possível encontrar algumas referências a utilização do travão de histerese em bancos de ensaio de menor potência, por exemplo com potências inferiores a 1 cv. Pode-se concluir que a aplicação do programa LabVIEW® e/ou utilização do conceito de instrumentação virtual é bastante utilizada, foram encontrados diversos artigos a respeito da utilização deste software em bancos de ensaio de potência. Portanto o que foi encontrado acaba por corroborar a utilidade do desenvolvimento deste projeto, principalmente no que tange a utilização de um travão de histerese para o ensaio de motores com potência acima de 1 cv.

## 2.5. Sumário

No presente capítulo definiu-se o que é um banco de ensaio de potência apresentando os diferentes tipos existentes, cada qual destinado a um tipo de ensaio. Sob este aspeto tem-se:

- Bancos de ensaio de motores: São aqueles destinados a efetuar os testes e ensaios somente do motor, sem os demais componentes do *powertrain*, faz-se necessário a retirada do motor do veículo para a realização dos testes;
- Bancos de ensaio de chassis: Neste tipo de equipamento realiza-se os testes e ensaio com o motor instalado no veículo, no qual efetua-se uma análise de todo o *powertrain* visto que a transmissão de potência entre o dispositivo sob teste e o banco de potencia, em via de regra, é feita pelas rodas.
- Bancos de ensaio de transmissões: São equipamentos de teste destinados ao ensaio de transmissões. Em uma extremidade (entrada da transmissão) há o elemento de geração de potência e na outra extremidade (saída da transmissão) há o elemento gerador de carregamento.

Ainda em relação aos bancos de ensaios de potência, também foi apresentado no presente capítulo os diferentes dispositivos que podem ser utilizados para a geração de caga, notadamente:

- Os dispositivos de inércia, que devido ao enfoque do presente projeto não houve maiores detalhamentos;
- Os dispositivos de travagem, tais como os dinamómetros de atrito, hidráulico e os elétricos.

Neste projeto utilizar-se-á um dinamómetro do tipo eléctrico, mais precisamente um travão de histerese.

## **2.6. Conclusão**

No universo dos dispositivos para ensaios de potência é possível identificar diferentes tipos de equipamentos, cada qual voltado para uma forma de ensaio diferente, caracterizando o binário e a potência produzidos por um motor sob diferentes aspetos. Na literatura pesquisada para suporte ao desenvolvimento do presente projeto foi possível constatar a utilização de travão de histerese para bancos de potência destinados ao ensaio de motores de baixa potência e a utilização de motores de corrente alternada ou dinamómetros hidráulicos quando o motor sob ensaio é de maior potência.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco.*

### 3. Desenvolvimento do Hardware

O projeto concebido consiste em um elemento gerador de carregamento, um elemento sensor para mensurar o carregamento exigido, um sistema de transmissão de potência, um microcontrolador e o sistema computacional de controlo. O dispositivo gerador de carregamento é o travão de histerese e o seu respetivo controlador, possui um veio apoiado em duas chumaceiras e, ao ser energizado, gera um binário de acoplamento entre o estator e o rotor proporcional ao valor da corrente aplicada, com isso o estator gira solidário ao veio até encontrar a célula de carga, que é o elemento sensor de carregamento. O contacto do estator com a célula de carga provoca uma reação que gerará um binário contrário e de igual intensidade àquele gerado pelo travão de histerese, essa reação é mensurada pelo sinal de saída da célula de carga, assim é possível quantificar o binário requisitado pelo travão de histerese ao motor sob ensaio. O sistema de transmissão é constituído por um conjunto de polias e correia de sincronismo o qual conectará o travão de histerese ao motor sob ensaio. São utilizados alguns outros sensores para mensurar demais grandezas pertinentes ao funcionamento do banco de ensaio de potência, tais como sensor de rotação, sensor de corrente e medição de tensão para calcular a potência elétrica consumida pelo motor sob ensaio. Utiliza-se um microcontrolador como elemento de interface entre os diversos sensores, dispositivos de controlo e sistema computacional de controlo. O sistema computacional de controlo foi desenvolvido em LabVIEW® e é executado em um computador pessoal. Completa-se a montagem com a utilização de um motor de fabricação Lynch, modelo LEM 200-127 e o respetivo controlador, fabricação Sigmadrive, modelo PMT 445M que serão utilizados para realização dos ensaios e testes de validação. Na figura 3.1 representa-se esquematicamente o sistema proposto neste projeto.

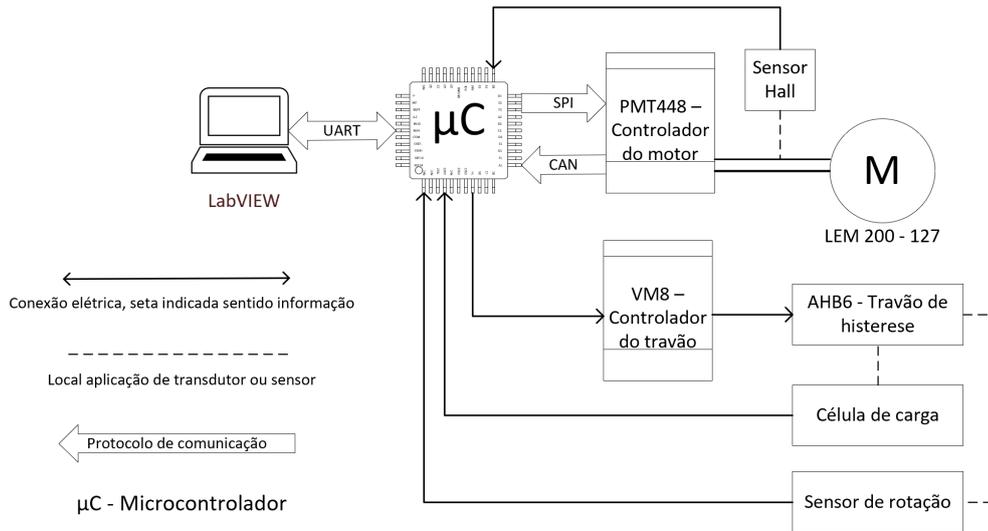


Figura 3.1 – Diagrama esquemático do banco de ensaio de potência, principais componentes.

O presente capítulo dedica-se a descrever os elementos seleccionados para utilização no projeto, relata constrangimentos impostos pelos principais equipamentos utilizados e eventuais considerações assumidas para superá-los. Inicia-se pela descrição dos componentes mecânicos do projeto, de seguida aborda-se os componentes eletroeletrónicos e por fim o microcontrolador com o respetivo código. O sistema de controlo será abordado no capítulo seguinte.

### 3.1. Aspectos relativos aos componentes mecânicos

Nesta seção serão apresentados os principais componentes mecânicos seleccionados para possibilitar o desenvolvimento do banco de ensaio de potência, notadamente a seleção das chumaceiras e rolamentos, a seleção dos dispositivos de transmissão de potência entre o travão de histerese e o motor sob ensaio e também serão apresentados aspectos relativos a substituição do veio do travão.

#### 3.1.1. Rolamentos e chumaceiras

Apresenta-se na figura 3.2 a montagem do travão de histerese, na qual observa-se que o mesmo será suportado por um conjunto de chumaceiras. Nas tabelas 3.1 e 3.2 são apresentadas as características técnicas do travão de histerese a partir das quais é possível extrair os parâmetros necessários para seleção da chumaceira e respetivos rolamentos. Há de

se observar que pela característica do sistema proposto, os esforços serão predominantemente radiais.

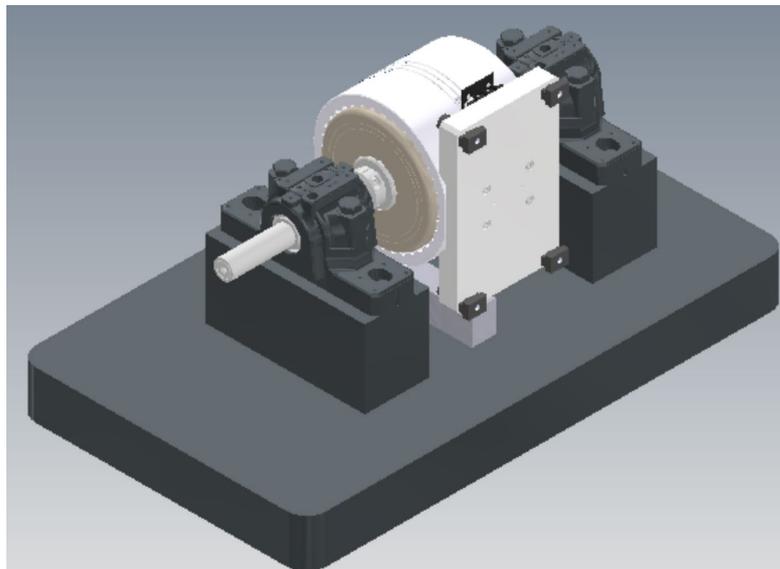


Figura 3.2 – Aspeto de montagem do travão de histerese.

Tabela 3.1 – Características técnicas do travão de histerese, adaptado de [16].

MODEL	MIN. TORQUE AT RATED CURRENT	RATED CURRENT	MAXIMUM SPEED	KINETIC POWER <sup>a)</sup>			
				WITH AIR		WITHOUT AIR	
				5 min.	Continuous	5 min.	Continuous
	N·m	mA	rpm	W	W	W	W
AHB-0.3 <sup>c)</sup>	0.30	300	25000	500	500	90	25
AHB-0.75 <sup>c)</sup>	0.65	400	35000	1200	1200	250	55
AHB-1	1.00	400	25000	1200	1200	250	55
AHB-1.5	1.50	400	25000	1300	1300	450	70
AHB-3	3.00	750	20000	1800	1800	800	160
AHB-3.3 <sup>b)</sup>	3.30	800	25000	2000	1400	800	140
AHB-5	5.00	380	15000	2500	1000	1300	120
AHB-6	6.00	1500	20000	3000	3000	1400	225
AHB-12	12.00	1200	12000	2800	1800	2200	250
AHB-24	24.00	2400	12000	5300	3000	4000	450

Tabela 3.2 – Características técnicas do travão de histerese, adaptado de [16].

MODEL	DRAG TORQUE DE-ENERGIZED at 1000 rpm	NOMINAL POWER	RESISTANCE at 25°C ±10%	EXTERNAL INERTIA	WEIGHT	
	N·m				W	Ω
AHB-0.3 <sup>c)</sup>	5 x 10 <sup>-3</sup>	8.10	90.0	1.830 x 10 <sup>-1</sup>	1.56	3.50
AHB-0.75 <sup>c)</sup>	N/A	9.60	60.0	9.130 x 10 <sup>-1</sup>	2.50	5.40
AHB-1	5.42 x 10 <sup>-3</sup>	9.60	60.0	8.760 x 10 <sup>-1</sup>	2.00	4.40
AHB-1.5	7.77 x 10 <sup>-3</sup>	10.24	64.0	5.750 x 10 <sup>0</sup>	4.20	9.30
AHB-3	1.51 x 10 <sup>-2</sup>	18.60	33.0	6.890 x 10 <sup>0</sup>	6.50	14.30
AHB-3.3 <sup>b)</sup>	N/A	20.48	32.0	5.584 x 10 <sup>-4</sup>	8.50	18.74
AHB-5	5.00 x 10 <sup>-2</sup>	8.70	60.0	1.310 x 10 <sup>1</sup>	12.40	27.34
AHB-6	2.82 x 10 <sup>-2</sup>	37.10	16.5	1.380 x 10 <sup>1</sup>	12.70	28.00
AHB-12	9.18 x 10 <sup>-2</sup>	28.80	20.0	5.600 x 10 <sup>1</sup>	24.00	53.00
AHB-24	1.36 x 10 <sup>-1</sup>	57.60	10.0	1.120 x 10 <sup>2</sup>	47.00	103.60

A tabela 3.3 apresenta um resumo dos principais parâmetros do travão de histerese, os quais serão levados em consideração para o dimensionamento mecânico dos componentes:

**Tabela 3.3 – Principais parâmetros do travão de histerese.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Energia Cinética Máxima	$K_{Tmax}$	3,0	kW
Velocidade Máxima	$n_{Tmax}$	20 000	Rpm
Binário Nominal	$M_T$	6,0	Nm
Massa do travão	$m_T$	13,2	kg
Peso do travão	$P_T$	129,50	N

Ressalta-se o aumento da massa total do travão de histerese comparado ao valor indicado na tabela 3.2 devido a substituição do veio de origem por uma peça de maior dimensão.

Considerando-se a disponibilidade de fornecimento de material por distribuidores locais, optou-se pela eleição do fabricante SKF para a seleção da chumaceira e dos respetivos rolamentos. Ao consultar os guias de aplicação disponibilizados pelo fabricante selecionou-se a caixa de mancal da família SNL, modelo 505. Trata-se de uma caixa de mancal em ferro fundido do tipo bipartida, característica que confere facilidade de montagem, permite uma flexibilidade na seleção do rolamento por não o possuir integrado ao conjunto e aplica-se a veios com 20 mm de diâmetro. O próprio fabricante sugere um conjunto de montagem composto pela caixa de mancal SNL 505, rolamento autocompensador de esferas 1205 EKTN9 e bucha de fixação para eixos métricos modelo H 205. Completa-se a montagem com vedações do tipo TSN 505 A e anéis de fixação FRB 5/52, conforme [17]. Na figura 3.7 pode-se observar as características do rolamento a ser utilizado na montagem, o elemento em questão é adequado para altas rotações e permite trabalhar com um desalinhamento angular de até 2.5°. Ressalta-se que de acordo com os critérios de dimensionamento do fabricante, o rolamento selecionado não operará com a carga mínima recomendada, portanto supõe-se que seu mecanismo de falha não ocorra por fadiga do material [18].

SNL 505 + 1205 K + H 205



Caixas de mancal pillow block SNL para rolamentos em uma bucha de fixação, com vedações padrão

Especificações técnicas

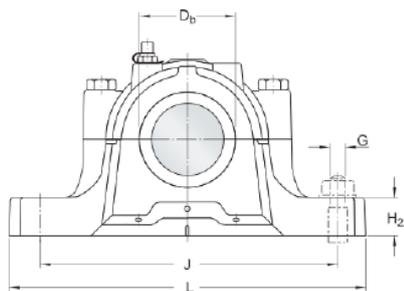
PRODUTOS ASSOCIADOS

Caixa de mancal	SNL 505
Rolamento (designação básica)	1205 EKTN9
Bucha de fixação	H 205
Anel de fixação	2 x FRB 5/52

Figura 3.3 – Caixa de mancal e produtos associados [17].

Diâmetro do eixo $d_a$	Caixa de mancal	Peças apropriadas Rolamento <sup>1)</sup>	Bucha de fixação <sup>2)</sup>	Anel de fixação <sup>3)</sup>	Vedações	Tampa de fechamento	Largura com vedações $A_2$
mm	–	–	–	–	–	–	mm
20	SNL 505	1205 EKTN9	H 205	FRB 5/52	TSN 505 A	ASNH 505	67
		2205 EKTN9	H 305	FRB 3.5/52	TSN 505 C		67
		22205 EK	H 305	FRB 3.5/52	TSN 505 S		80
		C 2205 KTN9	H 305 E	FRB 3.5/52	TSN 505 ND		125

Figura 3.4 – Dados seleção caixa de mancal, adaptado de [18].



$N_1$  15 mm      Largura do furo para parafuso de fixação

PINOS DE AJUSTE

$J_t$  152 mm      Distância entre pinos de ajuste

$J_s$  16 mm      Deslocamento axial dos pinos de ajuste

$N$  max. 5 mm      Diâmetro dos pinos de ajuste

DIMENSÕES DA VEDAÇÃO

$A_t$  80 mm      Largura das vedações de labirinto

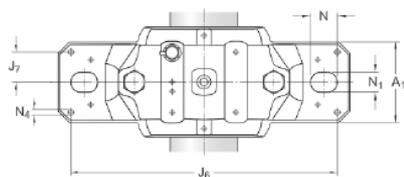
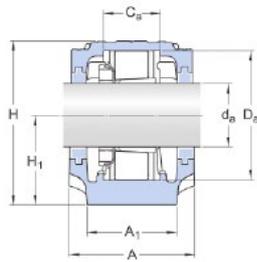


Figura 3.5 – Aspectos dimensionais da caixa de mancal, adaptado de [18].



DIMENSÕES

$d_a$	20 mm	Diâmetro do eixo
$C_a$	25 mm	Largura do assento do rolamento
$D_a$	52 mm	Diâmetro do assento do rolamento
$D_b$	31.5 mm	Diâmetro do furo
$A$	67 mm	Largura
$A_1$	46 mm	Largura do pé
$H$	74 mm	Altura
$H_1$	40 mm	Altura central do assento do rolamento
$H_2$	19 mm	Altura do pé
$J$	130 mm	Distância entre os parafusos de fixação
$L$	165 mm	Comprimento
$N$	20 mm	Comprimento do furo para parafuso de fixação

Figura 3.6 – Detalhe de montagem do conjunto, adaptado de [17].



DADOS DE CÁLCULO

Classificação de carga dinâmica básica	$C$	14.3 kN
Classificação de carga estática básica	$C_0$	4 kN
Limite de carga de fadiga	$P_u$	0.204 kN
Velocidade de referência		28 000 r/min
Velocidade-limite		18 000 r/min
Desalinhamento angular permitido	$\alpha$	2.5 °

Figura 3.7 – Parâmetros do rolamento selecionado, adaptado de [20].

**3.1.2. Correias e polias**

No desenvolvimento do projeto do banco de ensaio foi dada a diretriz de se realizar a transmissão de potência entre o travão de histerese e o motor sob ensaio por intermédio de um sistema de transmissão por correia. A adoção deste tipo de solução confere uma operação mais “limpa” em comparação a corrente de rolos. Também traz benefícios como facilidade de montagem e é relativamente fácil a substituição da polia motora ou da polia movida para se obter diferentes relações de transmissão. Como citado anteriormente, para a validação do

sistema projetado será utilizado um motor elétrico de corrente contínua de ímanes permanentes, de fabricação Lynch e modelo LEM 200-127. Suas características técnicas são apresentadas na figura 3.8. Por sua vez, na tabela 3.4 são destacadas as principais características que devem ser levadas em consideração para a seleção dos componentes do sistema de transmissão.

Motor	No load Current A	Torque Constant Nm/A	Speed Constant Rpm/V	Armature Resistance DC mΩ	Armature Inductance @ 15kHz pH	Armature Inertia kgm <sup>2</sup>	Peak Power KW	Peak Efficiency %	Peak Current A	Rated Power kW	Rated Speed Rpm	Rated Voltage V	Rated Current A	Rated Torque Nm
95	6	0.113	81	21.5	22	0.0238	18	92	400	10	3888	48	220	28
126	10	0.0737	120	175	6	0.0234	7.59	83	400	5	2880	24	170	19.2
127	5	0.15	60	22.5	23	0.0236	16.08	89	400	8	2880	48	200	31.5
D95B	6	0.14	76	20.5	11	0.0238	28.50	92	400	15.00	5472	72	210	30
D126	5	0.0748	104	138	5	0.0234	11.14	81	400	6	3744	36	250	18.3
D127	4	0.17	52	17.5	13	0.0236	25.38	92	400	13	3600	72	200	33.3
D135	3.5	0.185	45	16.75	16	0.0236	29.04	93	400	14	3780	84	200	36.4
D135 RAG	7.36	0.207	42	16.95	16	0.0238	34.32	93	400	16	4032	96	200	39.9
D135 RAGS	7.45	0.21	40	16.95	16	0.0238	36.00	93	400	18.00	4400	110	200	42.0

Figura 3.8 – Dados técnicos motores LEM 200 com destaque para o modelo utilizado, adaptado de [21].

Tabela 3.4 - Principais parâmetros do motor LEM 200-127.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Nominal	$P_M$	8,0	kW
Potência Máxima	$P_{M_{max}}$	16,08	kW
Binário Nominal	$M_M$	31,05	Nm
Velocidade Nominal	$n_M$	2 880	rpm

Pelo exposto o conjunto polias – correias deverão ser selecionados compatibilizando as velocidades do motor e do travão de histerese e ser capaz de transmitir a potência de pico do motor que é de 16,08 kW aproximadamente. É importante observar que a velocidade nominal do motor são 2 880 rpm e do travão de histerese a velocidade máxima são de 20 000 rpm, entretanto o fabricante do travão fornece uma curva que relaciona a velocidade rotacional com o binário de travagem produzido, a qual pode ser observada na figura 3.9 e serve como meio para a obtenção de alguns pontos de operação do travão que se encontram relacionados na tabela 3.5:

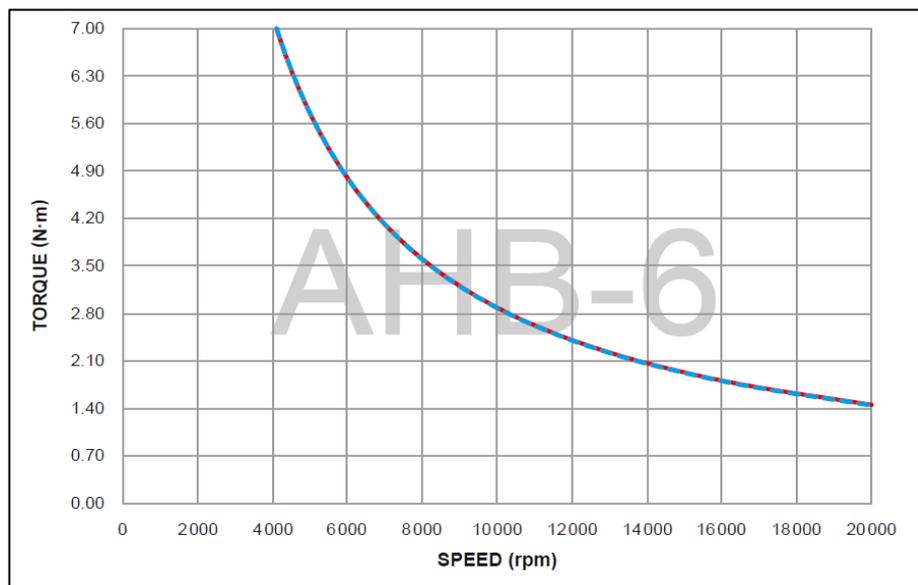


Figura 3.9 – Curvas de absorção de potência, adaptado de [16].

Tabela 3.5 – Binário x Velocidade rotacional do travão de histerese

$n_T$ (rpm)	$M_T$ (Nm)
4 000	7,0
6 000	4,9
8 000	3,55
10 000	2,80
12 000	2,33
14 000	2,00
16 000	1,75
18 000	1,55
20 000	1,40

Observa-se que ao operar o travão de histerese na faixa de velocidades de 4 000 a 14 000 rpm é possível exigir um maior valor de binário do motor, logo deverá ser seleccionada uma relação de transmissão que faça a compatibilização da velocidade do motor com essa faixa rotacional do travão. Deverá ser utilizada uma transmissão ampliadora de velocidade, uma vez que a velocidade nominal do travão de histerese é maior que a velocidade nominal do motor, recorre-se a cinemática para calcular a relação de transmissão de acordo com a equação (2) e figura 3.6 [22]. Há de se registar que a polia movida será aquela instalada no travão de histerese e a polia motora será aquela instalada no motor.

$$i = \frac{d_2}{d_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{M_{T_2}}{M_{T_1}} \quad (2)$$

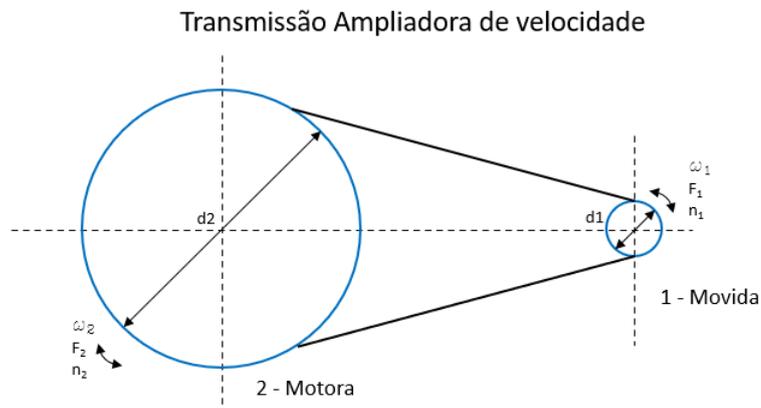


Figura 3.10 – Transmissão ampliadora de velocidade, adaptado de [22].

Portanto, considerando a velocidade máxima de operação do travão como 14 000 rpm e a velocidade máxima do motor 2 880 rpm e recorrendo a equação (2), obtém-se uma relação de transmissão igual a **1:4,86**.

O próximo passo é a seleção da correia de transmissão. Conhecendo-se a potência a ser transmitida, as velocidades envolvidas e a relação de transmissão adotada, buscou-se a utilização da ferramenta de design automático disponibilizada pelo fabricante Gates, a ferramenta recebe o nome de “*Design Power*”. O resultado da seleção recomenda produtos que não são padrões de estoque e consequentemente possuem um custo maior ou necessitam de um tempo mais alargado para o fornecimento, o resultado pode ser visualizado no anexo A. Opta-se então pelo dimensionamento manual da correia de transmissão, o qual foi realizado fazendo uso das diretrizes de dimensionamento do fabricante Continental e catálogo de peças de um fornecedor da região. Foi possível seleccionar componentes que

atendem aos requisitos de projeto, ainda que fora necessário considerar alguns constrangimentos e extrapolar ligeiramente as recomendações de aplicação dos produtos acarretando em um ligeiro sobredimensionamento da correia selecionada para compensar a questão das velocidades envolvidas. Em linhas gerais, faz-se necessário conhecer/determinar os seguintes parâmetros para a seleção da correia:

- Potência a ser transmitida;
- Fatores de serviço;
- Distância entre centros das polias motora e movida;
- Relação de transmissão;
- Escolha do passo da correia;
- Determinação da largura da correia.

Com estes parâmetros definidos e/ou calculados e após cumprir as etapas de dimensionamento recomendadas pelo fabricante foi possível selecionar uma correia do tipo síncrona HTD que se adequa ao projeto em causa, mais especificamente o modelo HTD 1360-8M-30, 1 360 mm de comprimento, passo 8M e largura de 30 mm. Por intermédio da figura 3.12 é possível constatar que a seleção da correia não é feita de maneira direta, fez necessária a não observação de algumas diretrizes recomendadas pelo fabricante durante o processo de dimensionamento. Após definição da correia o próximo passo foi a seleção das polias. Para a polia movida, que será instalada no travão, optou-se por escolher um modelo que permite a montagem utilizando-se bucha cônica, assim o modelo TL-24-8M-30 foi selecionado. Em relação a polia motora, a qual será instalada no motor, não foi possível adotar este sistema de montagem pois, devido ao tamanho da polia motora, a bucha cônica adequada possui tamanho incompatível com o veio do motor, não havendo espaço suficiente para a montagem e, portanto, será utilizada uma polia para montagem convencional com a utilização de escatel, mais especificamente o modelo HTD 112-8M-30. Nas figuras 3.13 e 3.14 são apresentadas características técnicas das polias e na figura 3.14 há informação referente a bucha cônica de montagem da polia. Há de se registrar que com a utilização das polias referidas anteriormente, obteve-se uma relação de transmissão de 1:4,66, muito próxima daquela definida durante as etapas iniciais de projeto que era de 1:4,86.

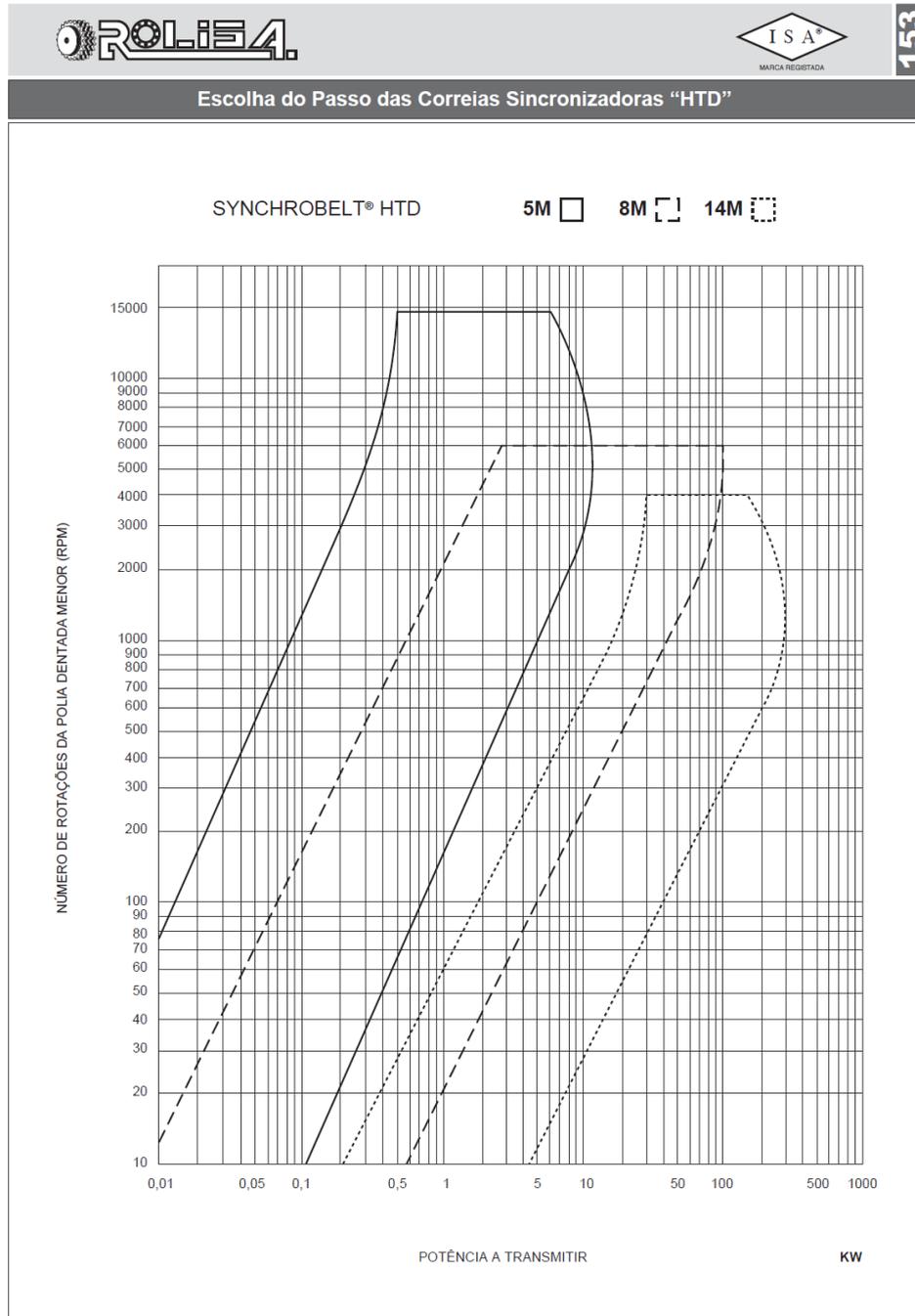


Figura 3.11 – Gráfico para seleção de correias do tipo HTD 5M, 8M e 14M, adaptado de [23].

**148** **ROLISA** **ISA** MARCA REGISTRADA

**Polias Dentadas de Bussola Cônica para Correias Sincronizadoras "HTD"**

**8M - 20**

Material	Código	Tipo	Dentes	Bussola	Furo max.	Dp	De	Df	Dm	Di	F	L	R	Nº Flange	Kg
AÇO	TL 22-8M-20	16F	22	1008	25	56,02	54,65	60	-	37	28	22	6	308	0,25
	TL 24-8M-20	16F	24	1108	25	61,11	59,74	66	-	44	28	22	6	310	0,30
	TL 26-8M-20	16F	26	1108	25	66,21	64,84	71	-	45	28	22	6	311	0,36
	TL 28-8M-20	16F	28	1108	25	71,30	70,08	75	-	50	28	22	6	312	0,45
	TL 30-8M-20	16F	30	1108	25	76,39	75,13	83	-	58	28	22	6	314	0,55
	TL 32-8M-20	16F	32	1610	42	81,49	80,16	87	-	63	28	25	3	315	0,43
	TL 34-8M-20	16F	34	1610	42	86,58	85,21	91	-	64	28	25	3	316	0,57
	TL 36-8M-20	16F	36	1610	42	91,67	90,30	98	-	68	28	25	3	319	0,70
	TL 38-8M-20	16F	38	1610	42	96,77	95,39	103	-	72	28	25	3	320	0,82
	TL 40-8M-20	16F	40	1610	42	101,86	100,49	106	-	76	28	25	3	321	1,10
	TL 44-8M-20	10F	44	2012	50	112,05	110,67	119	92	-	28	32	4	325	1,20
	TL 48-8M-20	10F	48	2012	50	122,23	120,86	127	96	-	28	32	4	327	1,65
	TL 56-8M-20	10F	56	2012	50	142,60	141,23	148	110	-	28	32	4	333	2,50
	TL 64-8M-20	11F	64	2012	50	162,97	161,60	168	110	137	28	32	4	338	2,60
TL 72-8M-20	11F	72	2012	50	183,35	181,97	192	110	158	28	32	4	340	3,40	

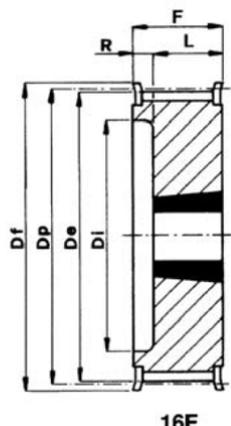


Figura 3.12 – Polia para montagem com bucha cônica, adaptado de [23].

**143** **ROLISA** **ISA** MARCA REGISTRADA

**Polias Dentadas para Correias Sincronizadoras "HTD"**

**8M - 30**

Material	Código	Tipo	Dentes	Dp	De	Df	Dm	Di	F	L	d	Nº Flange	Kg
AÇO	22 - 8M - 30	2F	22	56,02	54,65	60	43	-	38	48	12	308	0,75
	24 - 8M - 30	2F	24	61,11	59,74	66	45	-	38	48	12	310	0,90
	26 - 8M - 30	2F	26	66,21	64,84	71	48	-	38	48	12	311	1,10
	28 - 8M - 30	2F	28	71,30	70,08	75	50	-	38	48	14	312	1,20
	30 - 8M - 30	2F	30	76,39	75,13	83	55	-	38	48	14	314	1,32
	32 - 8M - 30	2F	32	81,49	80,16	87	60	-	38	48	14	315	1,55
	34 - 8M - 30	2F	34	86,58	85,21	91	66	-	38	48	14	316	1,80
	36 - 8M - 30	2F	36	91,67	90,30	98,5	70	-	38	48	14	319	2,10
	38 - 8M - 30	2F	38	96,77	95,39	103	75	-	38	48	14	320	2,30
	40 - 8M - 30	2F	40	101,86	100,49	106	75	-	38	48	14	321	2,47
	44 - 8M - 30	2F	44	112,05	110,67	119	75	-	38	48	14	325	2,95
	48 - 8M - 30	2F	48	122,23	120,86	127	75	-	38	48	14	327	3,30
	56 - 8M - 30	3F	56	142,60	141,23	148	90	116	38	48	14	333	4,02
	64 - 8M - 30	3F	64	162,97	161,60	168	90	137	38	48	14	338	4,60
72 - 8M - 30	3F	72	183,35	181,97	192	95	158	38	48	14	340	5,41	
FUNDAÇÃO	80 - 8M - 30	3	80	203,72	202,35	-	100	180	38	48	14	-	5,23
	90 - 8M - 30	3	90	229,18	227,81	-	100	204	38	48	14	-	6,42
	112 - 8M - 30	4	112	285,21	283,83	-	100	254	38	48	18	-	8,12
	144 - 8M - 30	4	144	366,69	365,32	-	100	336	38	48	20	-	10,36
	168 - 8M - 30	4	168	427,81	426,44	-	100	400	38	48	20	-	12,37
192 - 8M - 30	4	192	488,92	487,55	-	100	460	38	48	20	-	14,31	

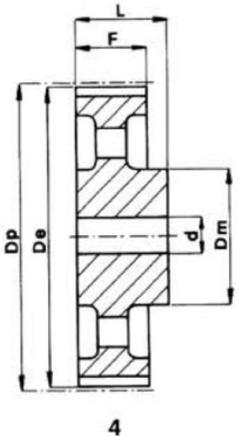


Figura 3.13 – Polias dentadas para correias sincronizadoras "HTD", adaptado de [23].

176 **ROLISA** **ISA**  
MARCA REGISTRADA

**Bussola Cônica de Aperto**



SÉRIE MÉTRICA:  
Dimensões em mm. Classe ISO E 8  
Escatel segundo DIN 6885

Tipo Bussola	L	D 1	Furo D 2
1008	22,3	35	9 - 10 - 11 - 12 - 14 - 15 - 16 - 18 - 19 - 20 - 22 - 24 - (25)
1108	22,3	38	9 - 10 - 11 - 12 - 14 - 15 - 16 - 18 - 19 - 20 - 22 - 24 - 25 - (28)
1210	25,4	47	11 - 12 - 14 - 15 - 16 - 18 - 19 - 20 - 22 - 24 - 25 - 28 - 30 - (32)
1215	38,1	47	11 - 14 - 16 - 18 - 19 - 20 - 22 - 24 - 25 - 28 - 30 - (32)
1610	25,4	57	12 - 14 - 15 - 16 - 18 - 19 - 20 - 22 - 24 - 25 - 28 - 30 - 32 - 35 - 38 - 40 - (42)
1615	38,1	57	14 - 15 - 16 - 18 - 19 - 20 - 22 - 24 - 25 - 28 - 30 - 32 - 35 - 38 - 40 - (42)
2012	31,8	70	14 - 16 - 18 - 19 - 20 - 22 - 24 - 25 - 28 - 30 - 32 - 35 - 38 - 40 - 42 - 45 - 48 - 50
2517	44,5	85	16 - 18 - 19 - 20 - 22 - 24 - 25 - 28 - 30 - 32 - 35 - 38 - 40 - 42 - 45 - 48 - 50 - 55 - 60 - (65)
3020	50,8	108	25 - 28 - 30 - 32 - 35 - 38 - 40 - 42 - 45 - 48 - 50 - 55 - 60 - 65 - 70 - 75
3030	76,2	108	25 - 28 - 30 - 32 - 35 - 38 - 40 - 42 - 45 - 48 - 50 - 55 - 60 - 65 - 70 - 75
3525	64,9	127	35 - 38 - 40 - 42 - 45 - 48 - 50 - 55 - 60 - 65 - 70 - 75 - 80 - 85 - (90)
3535	88,9	127	35 - 38 - 40 - 42 - 45 - 48 - 50 - 55 - 60 - 65 - 70 - 75 - 80 - 85 - (90)
4040	101,6	146	40 - 42 - 45 - 48 - 50 - 55 - 60 - 65 - 70 - 75 - 80 - 85 - 90 - 95 - 100
4545	114,3	162	55 - 60 - 65 - 70 - 75 - 80 - 85 - 90 - 95 - 100 - 105 - 110
5050	127	178	60 - 65 - 70 - 75 - 80 - 85 - 90 - 95 - 100 - 105 - 110 - 115 - 120 - 125

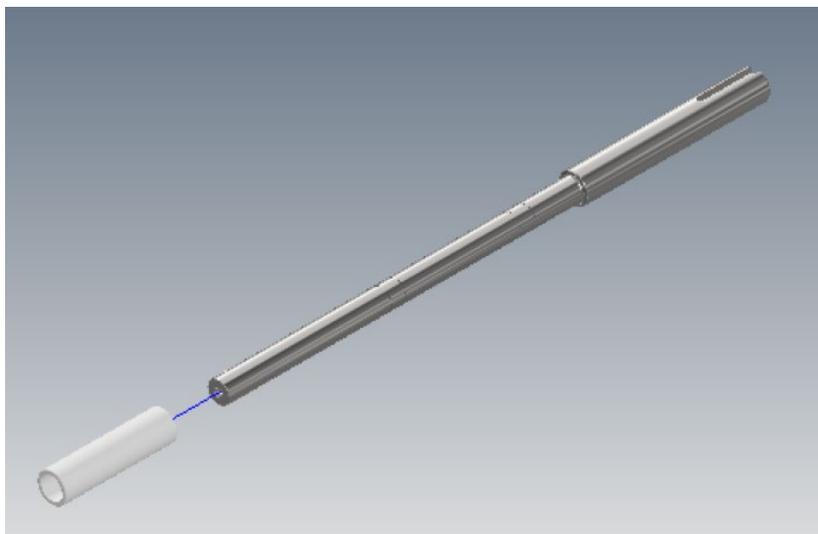
Figura 3.14 – Características da bucha cônica para montagem da polia, adaptado de [23].

### 3.1.3. Adequação do veio do travão de histerese

De acordo com o citado na seção 1.2 houve a necessidade de se proceder com a recuperação do veio do travão de histerese. A peça de origem era um veio em aço com 202 mm de comprimento e um diâmetro de 15 mm. Ao consultar os catálogos de diversos fabricantes para a seleção de rolamentos e chumaceiras, decidiu-se que o novo veio fosse maquinado com um diâmetro de 20 mm. A adoção desta medida ampliou o leque de rolamentos e chumaceiras que poderiam ser selecionados e mostrou-se uma decisão acertada. Também foi necessário aumentar o comprimento do veio para possibilitar a montagem idealizada e apresentada anteriormente na figura 3.1, portanto considerando-se as dimensões das chumaceiras e da polia a ser montada no veio do travão desenhou-se a nova peça com um comprimento de 370 mm. Para possibilitar a montagem no travão de histerese, o novo veio foi desenhado com o diâmetro de 20 mm em uma das extremidades, na porção intermédia manteve-se os 15 mm de origem e na extremidade oposta foi utilizado um casquilho com diâmetro externo de 20 mm e interno de 15 mm, para possibilitar sua montagem no veio. O novo veio foi maquinado na própria ESTG, no departamento de Engenharia Mecânica, na figura 3.18 é possível ver o veio durante o processo de maquinação e na figura 3.19 tem-se o travão de histerese já montado com o novo veio.



**Figura 3.15 – Veio do travão, com o diâmetro maior na extremidade direita.**



**Figura 3.16 – Posição de montagem do casquilho no novo veio do travão**



**Figura 3.17 – Veio do travão durante o processo de maquinação.**



AJUSTES USUALMENTE UTILIZADOS									
Casos para emprego				Eixos (afastamento)	Furos				
					H6	H7	H8	H9	H11
				Eixos (IT)					
Peças móveis uma em relação à outra	Peça onde o funcionamento necessita de uma grande folga. (dilatação, mau alinhamento, etc)			c				9	11
	Casos comuns de peças que giraram ou deslizam em anéis ou guias. (deve-se assegurar boa lubrificação)			e		7	8	9	
	Peças com guia precisa para movimentos de pequena amplitude			f	6	6-7	7		
				g	5	6			
				h	5	6	7	8	
Peças imóveis uma em relação à outra	Desmontagem e remontagem possível sem danificar as peças	O acoplamento não pode transmitir esforços	Montagem possível à mão	js	5	6			
			Montagem por golpe	k	5				
				m		6			
			Montagem com prensa	p		6			
	Desmontagem impossível sem danificar as peças	O acoplamento pode transmitir esforços	Montagem com prensa ou por dilatação	s			7		
				u			7		
				x			7		
				z			7		

■ Graus de tolerância padrão mais utilizados

Figura 3.20 – Ajustamentos usualmente utilizados.

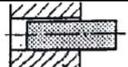
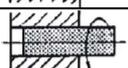
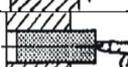
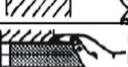
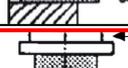
AJUSTES RECOMENDADOS						
TIPO DE AJUSTE	EXEMPLO DE AJUSTE	EXTRA-PRECISO	MECÂNICA PRECISA	MECÂNICA MÉDIA	MECÂNICA ORDINÁRIA	EXEMPLO DE APLICAÇÃO
LIVRE	 Montagem à mão, podendo girar sem esforço.	H6 e7	H7 e7 H7 e8	H11 e9	H11a11	Peças cujos funcionamentos necessitam de folga por força de dilatação, ou mau alinhados, etc
ROTATIVO	 Montagem à mão, com facilidade.	H6 f6	H7 f7	H8 f8	H10 d10 H11 d11	Peças que deslizam ou giram com boa lubrificação. Ex: eixos, mancais, etc.
DESGLIZANTE	 Montagem à mão, com leve pressão.	H6 g5	H7 g5	H8 g8 H8 h8	H10 h10 H11 h11	Peças que deslizam ou giram com grande precisão. Ex: anéis de rolamentos, corrediços, etc
DESGLIZANTE JUSTO	 Montagem a mão, porém necessitando de algum esforço.	H6 h5	H7 h6			Encaixes fixos de precisão, órgãos lubrificados descartáveis à mão. Ex: punções, guias, etc.
ADERENTE FORÇADO LEVE	 Montagem com auxílio de martelo.	H6 j5	H7 j6			Órgãos que necessitam frequentes desmontagens. Ex: polias, engrenagens, rolamentos, etc.
FORÇADO DURO	 Montagem com auxílio de martelo pesado.	H6 m5	H7 m6			Órgãos possíveis de montagem e desmontagem sem deformação da peça.
À PRESSÃO COM ESFORÇO	 Montagem com auxílio de balancim ou por dilatação.	H6 p5	H7 p6			Peças impossíveis de serem desmontadas sem deformação. Ex: buchas à pressão, etc.

Figura 3.21 – Ajustamentos recomendados em relação ao tipo de ajuste desejado sistema furo base.

**- Ajustamento entre veio e casquilho:**

Para essa montagem, é desejado que haja a possibilidade de desmontagem sem deformação das partes envolvidas. Eventualmente poderá ser necessário efetuar a desmontagem desta união para, por exemplo, possibilitar a desmontagem do travão de histerese. Na hipótese de adotar o sistema de furo base, no qual o desvio inferior do furo é igual a  $0 \mu\text{m}$  e, por conseguinte, a cota mínima do furo será igual a dimensão nominal da peça, o ajustamento recomendado será o **H7m6**. Neste ajustamento o furo possuirá uma classe de tolerância **H7** e o veio uma classe de tolerância **m6**. Entretanto para essa classe de tolerância, as dimensões máximas e mínimas prováveis do veio são maiores que as dimensões nominais. Neste cenário a montagem dos rolamentos do travão de histerese deverão ser feitas à pressão com esforço e eventualmente poderá ocasionar danos aos mesmos. De maneira a contornar essa situação e manter os valores de tolerância fundamental e desvio fundamental selecionados opta-se por adotar o sistema veio base e o ajustamento homólogo ao selecionado. Desta maneira o veio possuirá dimensão nominal, evitando a montagem sob esforço dos rolamentos e mantém-se a montagem do casquilho com o ajuste forçado duro.

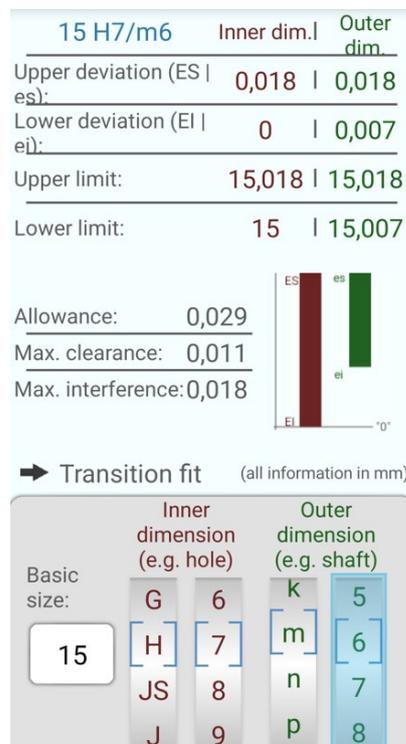


Figura 3.22 – Ajustamento no sistema furo base, adaptado de [24]

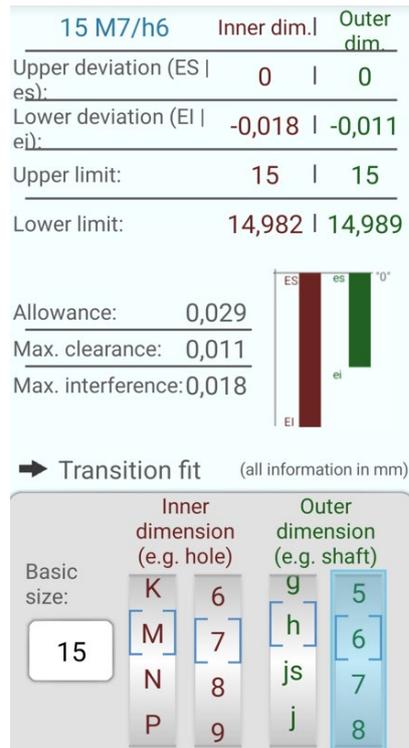


Figura 3.23 – Ajustamento no sistema veio base, adaptado de [24].

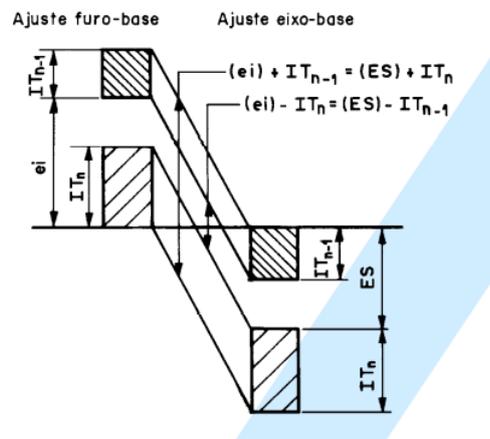


Figura 3.24 – Equivalência sistema furo-base veio-base

Diante o exposto, o casquilho deverá possuir uma classe de tolerância **M7** e o veio na região de montagem do casquilho deverá ser maquinado com uma tolerância **h6**.

Em resumo:

Casquilho: **15 M7** →  $C_{máx} = 15 \text{ mm}$   $C_{min} = 14,982 \text{ mm}$

Veio: **h6** →  $C_{máx} = 15 \text{ mm}$   $C_{min} = 14,989 \text{ mm}$

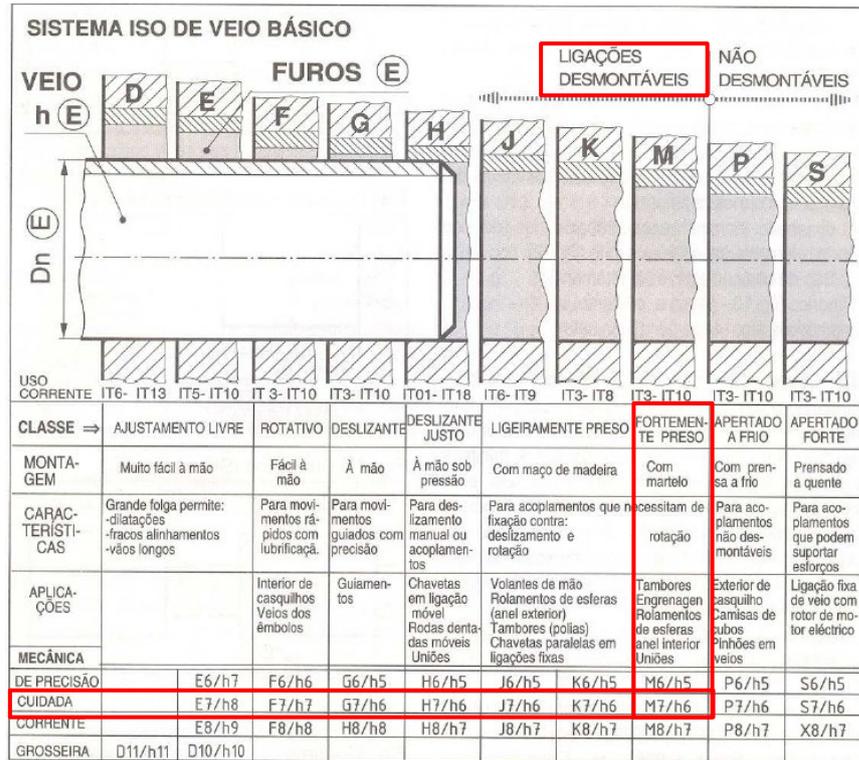


Figura 3.25 – Sistema ISO de ajuste tipo veio básico

*Ajustamento entre o veio e os rolamentos 6002:*

Para os sítios de montagem dos rolamentos 6002-z, adota-se uma classe de tolerância **k6**. Uma vez que o diâmetro nominal são 15 mm tem-se as seguintes dimensões:  $c_{\text{máx}} = 15,012 \text{ mm}$  e  $c_{\text{mín}} = 15,001 \text{ mm}$ . Ao consultar a ferramenta de dimensionamento disponibilizada pela SKF constata-se que a montagem será com interferência.

**Tolerâncias**

**SKF**

Designação	Diâmetro externo do eixo		Furo do rolamento	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo
	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )
■ 6002-Z	1	12	-8	0

Figura 3.26 – Tolerâncias veio e rolamento do travão histerese

 Ajustes Provável Interferência (+) / folga (-)

Designação	Eixo		
	Provável mínimo	Médio	Provável máximo
	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )
■ 6002-Z	-3	4	10

Figura 3.27 – Ajuste provável entre veio e rolamento travão histerese

## 3.2. Aspectos relacionados aos componentes eletroeletrónicos

Na presente seção serão abordados os diversos componentes de natureza elétrica e eletrónicas utilizados para o desenvolvimento deste projeto. Descrever-se-á também os protocolos de comunicação que foram utilizados para promover a interconexão e a troca de dados entre elementos do banco de ensaio de potência. Na figura 3.28, tem-se uma representação dos principais constituintes do banco de potência e como estes elementos encontram-se interconectados. Serão descritos cada um destes componentes, com o objetivo de caracterizar o respetivo funcionamento, inclusive, ainda que o foco do projeto seja a utilização do travão de histerese e desenvolvimento do sistema de controlo e registo de dados, haverá uma sucinta descrição do motor e de seu controlador que serão utilizados para os testes e ensaios de validação do projeto.

### 3.2.1. Travão de Histerese

O travão de histerese é o elemento utilizado para a geração de carregamento no banco de potência. O dispositivo utilizado no presente projeto é fabricado pela empresa Magtrol, modelo AHB-6 e na figura 3.29 é possível observar seu aspeto.



Figura 3.28 – Travão de histerese Magtrol AHB-6, adaptado de [16].

O princípio de funcionamento dos travões de histerese foi descrito no capítulo 2. A lembrar que o princípio magnético da histerese para controlo de binário é obtido pela utilização de dois componentes básicos o estator formado por um pólo reticulado e o conjunto rotor/veio. O conjunto estator e rotor são montados juntos, porém não são solidários de tal maneira que há movimento relativo de rotação entre as partes. Enquanto o travão de histerese não é energizado, o rotor gira livremente apoiado em rolamentos de esfera. Ao ser energizado surge um campo magnético no entreferro de tal maneira que o rotor é magneticamente constrangido, ocorrendo uma ação de travagem entre o rotor e o estator. O dispositivo possui uma longa vida de serviço devido a praticamente não existir materiais de fricção ou submetido a esforços cortante, como opera sem contacto físico entre rotor e estator, o único elemento sujeito a desgaste são os rolamentos que suportam o veio. A quantidade de binário de travagem é obtida pelo controlo da corrente contínua aplicada ao enrolamento de campo, a faixa de ajuste do binário vai desde um valor mínimo relacionado ao atrito dos rolamentos até o valor máximo nominal do equipamento. A polaridade da corrente não influencia a operação do travão de histerese, apenas recomenda-se a utilização de uma fonte de corrente contínua estabilizada para garantir uma operação suave. Na figura 3.30 pode-se observar os detalhes de montagem do travão de histerese.

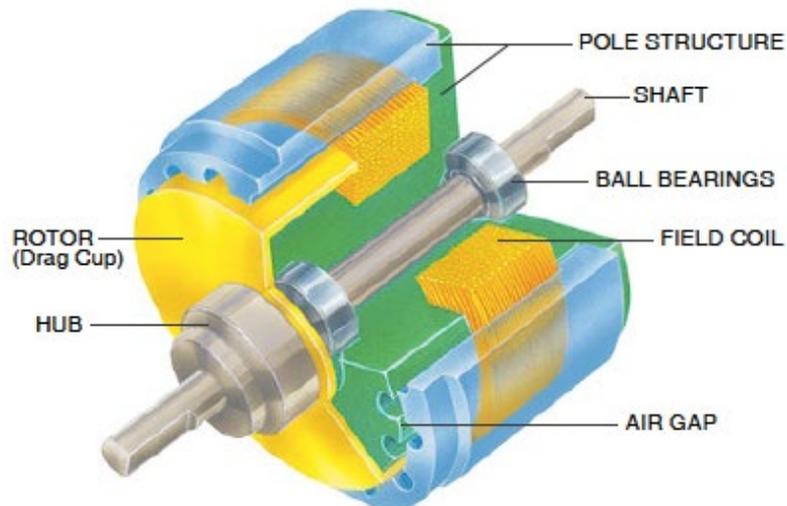


Figura 3.29 – Aspeto de montagem do travão de histerese, adaptado de [16].

Utilizar-se-á como fonte de tensão um dispositivo fornecido pelo mesmo fabricante do travão de histerese, trata-se de um controlador proporcional/amplificador modelo VM-8. Dispositivo que é utilizado como fonte de corrente com capacidade de fornecer até 3 A. O dispositivo pode ser alimentado por uma tensão de 20 a 30 V, o sinal de controle do travão de histerese possui amplitude máxima de 10 V e o sinal de saída é um PWM de 5 kHz de frequência de chaveamento. Na figura 3.32 tem-se um diagrama de funcionamento do controlador do travão, o sinal de controlo será proveniente do microcontrolador utilizado no projeto. Há de se registar que a saída do controlador possui uma amplitude de 0 a 5 V, entretanto o próprio controlador VM-8 possui um amplificador que será utilizado para compatibilização do nível de sinal, assim o ajuste de 0 a 100% de binário de travagem corresponderá a uma saída de 0 a 5 V no microcontrolador, que por sua vez será amplificado para um sinal de 0 a 10 V na saída do amplificador/entrada do controlador.



Figura 3.30 – Controlador Magtrol VM-8, adaptado de [25].

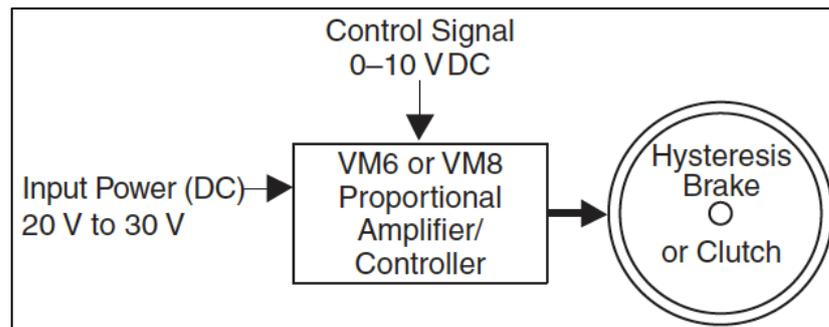


Figura 3.31 – Esquema de funcionamento do controlador do travão de histerese, adaptado de [25].

### 3.2.2. Célula de carga

A célula de carga é o elemento sensor do binário consumido pelo travão de histerese. O modelo utilizado no projeto é de fabricação Omega Engineering, modelo LC 509. Trata-se de uma célula de carga do tipo viga cuja carga máxima são 100 lbf.



Figura 3.32 – Célula de carga LC509, adaptado de [26].

O seu funcionamento baseia-se na conversão de força em um sinal elétrico por intermédio de sensores do tipo extensómetros, que são sensores do tipo resistivo. Estes sensores são montados em contacto com o corpo da célula de carga que o ser submetida a uma força acaba-se por deformar. A deformação é transmitida para o extensómetro ocasionando a mudança no valor de sua resistência que é proporcional ao valor da força aplicada. O sensor faz parte de um circuito do tipo Ponte de Wheatstone que fornecerá um sinal de saída proporcional a variação da resistência [27].

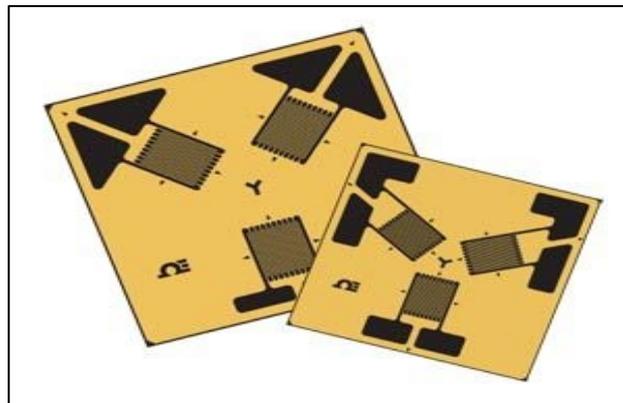


Figura 3.33 – Exemplos de extensómetros, adaptado de [27]

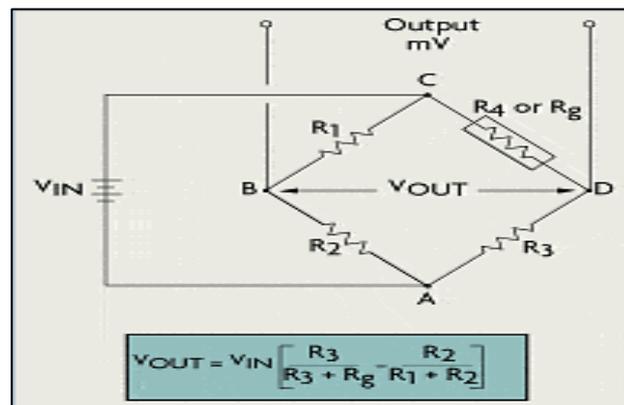


Figura 3.34 – Amplitude do sinal de saída de um circuito Ponte de Wheatstone, adaptado de [27].

Neste projeto o binário máximo que o travão de histerese produz são 6 Nm, a montagem como idealizada possui uma distância medida do centro do veio do travão de histerese a linha de ação da força no ponto de contacto com a célula de carga de 70,5 mm, portanto de acordo com a equação (3), na qual **F** é a força aplicada em newton (N), **d** é a distancia da linha de ação da força ao centro do veio em metro (m) e **M** é o binário em Nm, a força

aplicada a célula de carga será de 85,10 N, o que equivale a uma força de 8,6784 kgf. Trata-se de um valor inferior a 10% da capacidade da célula de carga. Pela impossibilidade de se aumentar a força aplicada pelo travão de histerese mediante redução do braço de alavanca, deverá ser considerada a possibilidade de se substituir a célula de carga por uma apropriada para forças de menor magnitude.

$$M = F \times d \quad (3)$$

### 3.2.3. Sensor de rotações

A caracterização do motor se dá pela determinação do binário e da potência produzidos. A menos das perdas na transmissão e no sistema de chumaceiras, os valores de potência e binário consumido pelo travão de histerese aproxima-se dos valores produzidos pelo motor sob ensaio. Com a utilização da célula de carga é possível calcular o binário, falta então o cálculo da potência que é possível de ser feito conhecendo-se o binário e a velocidade rotacional do travão, de acordo com a equação (9), [22]:

$$P = F_T \times v_p \quad (4)$$

$$F_T = \frac{M_T}{r} \quad (5)$$

$$v_p = \omega \times r \quad (6)$$

Substituindo-se (4) e (5) em (3) tem-se:

$$P = M_T \times \omega \quad (7)$$

Como

$$\omega = \frac{\pi \times n}{30} \quad (8)$$

Tem-se:

$$M_T = \frac{30}{\pi} \times \frac{P}{n} \quad (9)$$

Com P – Potência [W],  $M_T$  – Binário travão [Nm],  $\omega$  – velocidade angular [rad/s] e n – rotação [rpm],  $F_T$  – Força travão [N],  $v_p$  – velocidade periférica [m/s].

Portanto para medição da velocidade rotacional do travão de histerese será utilizado um sensor de rotação modelo SNG-QPCA-001, de fabricação Honeywel. O sensor pode ser alimentado por uma de tensão de 4,5 a 26 V e fornece um sinal de saída em onda quadrada. Deve ser instalado com uma distância de até 2,0 mm do ponto de medição. Na figura 3.36 é apresentado o aspeto físico do sensor e na figura 3.37 é possível observar a característica do sinal de saída e posições de montagem possíveis de se utilizar. O sensor de rotação será conectado ao microcontrolador para aquisição e tratamento do sinal de saída.



Figura 3.35 – Sensor SNG-QPCA-001, adaptado de [28].

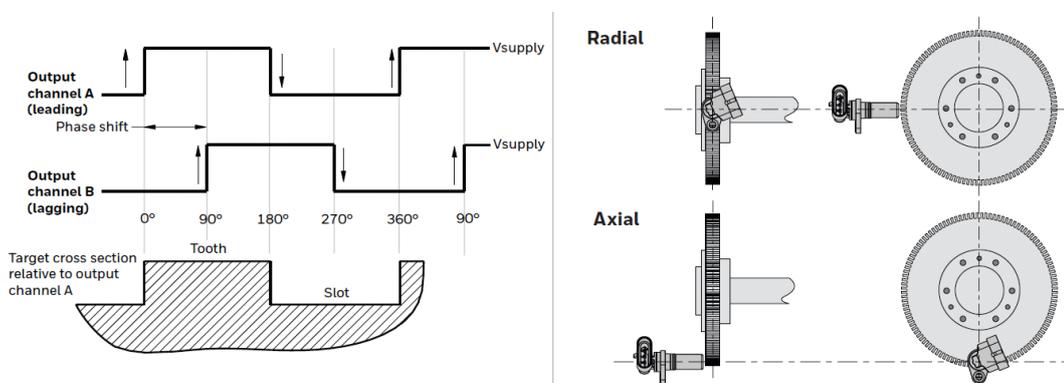


Figura 3.36 – Aspeto do sinal de saída e posições de montagem possíveis, adaptado de [28].

### 3.2.4. Placas de Circuito Impresso

Para o correto funcionamento do banco de ensaio de potência objeto deste projeto faz-se necessária a interconexão de diferentes dispositivos, são os controladores, os sensores e o computador pessoal no qual é executado o software de controlo.

Para efeito, projetou-se três placas de circuito impresso, do inglês *Printed Circuit Board* – *PCB*. Optou-se por uma arquitetura modular para haver flexibilidade da instalação e conexão dos diferentes constituintes do banco de potência. A placa principal denominada MCB, que é o acrônimo em inglês de *Master Control Board* ou Placa de Controlo Principal, é constituída pelo microcontrolador, por uma placa auxiliar (*Shield*) de isolamento do barramento SPI e o conversor de tensão de 24 V para 5 V. A segunda placa é responsável pela interface com o controlador do motor sob ensaio, essencialmente é constituída por um potenciômetro digital que controlará a velocidade do motor e de uma placa auxiliar conversora de protocolo SPI e CAN, protocolo que é utilizado para comunicar com o controlador do motor para obter a magnitude da tensão aplicada ao motor e repassá-la ao microcontrolador. Há de se registrar que a conexão desta placa com a placa MCB é feito por intermédio de um opto acoplador, com isso consegue-se isolar o sistema que está ligado ao motor dos demais circuitos, impedindo a propagação de ruído elétrico que tem potencial para perturbar o correto funcionamento dos demais circuitos. Finalmente, mas não menos importante, tem-se uma *PCB* equipada com um sensor Hall. Esta placa é responsável pela medição da intensidade da corrente de alimentação do motor que conjuntamente com a tensão aplicada permite o cálculo da potência elétrica absorvida pelo motor. Todas as placas foram desenvolvidas com auxílio do software Altium®.

### *MASTER CONTROL BOARD*

Esta é a placa principal é composta por um conversor de tensão de 24 V para 5 V, pelo microcontrolador que é responsável pela interface com os controladores do motor, com o controlador do travão de histerese, com o computador pessoal que executa o sistema de controlo, com o sensor de velocidade e célula de carga e, por fim, há uma placa auxiliar que é responsável pelo isolamento do barramento de conexão SPI com a placa interligada ao controlador do motor. Na figura 3.38 observa-se as vistas superior e inferior da placa projetada e a disposição dos componentes e na figura 3.39 observa-se a vista superior da placa com os componentes posicionados com destaque para a parte isolada que estará interligada ao controlador do motor. Como dito anteriormente, essa solução propicia isolamento a nível de ruído e também dos níveis de tensão de alimentação do motor.

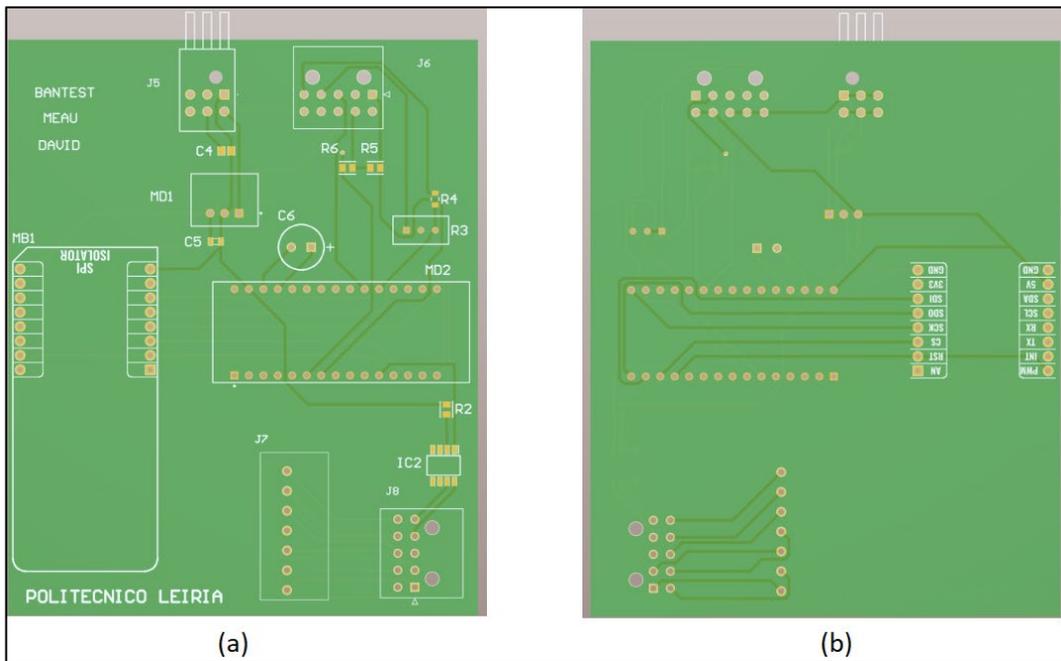


Figura 3.37 – Placa Master Control Board: (a) representa vista 2D do plano superior e (b) representa a vista 2D do plano inferior.

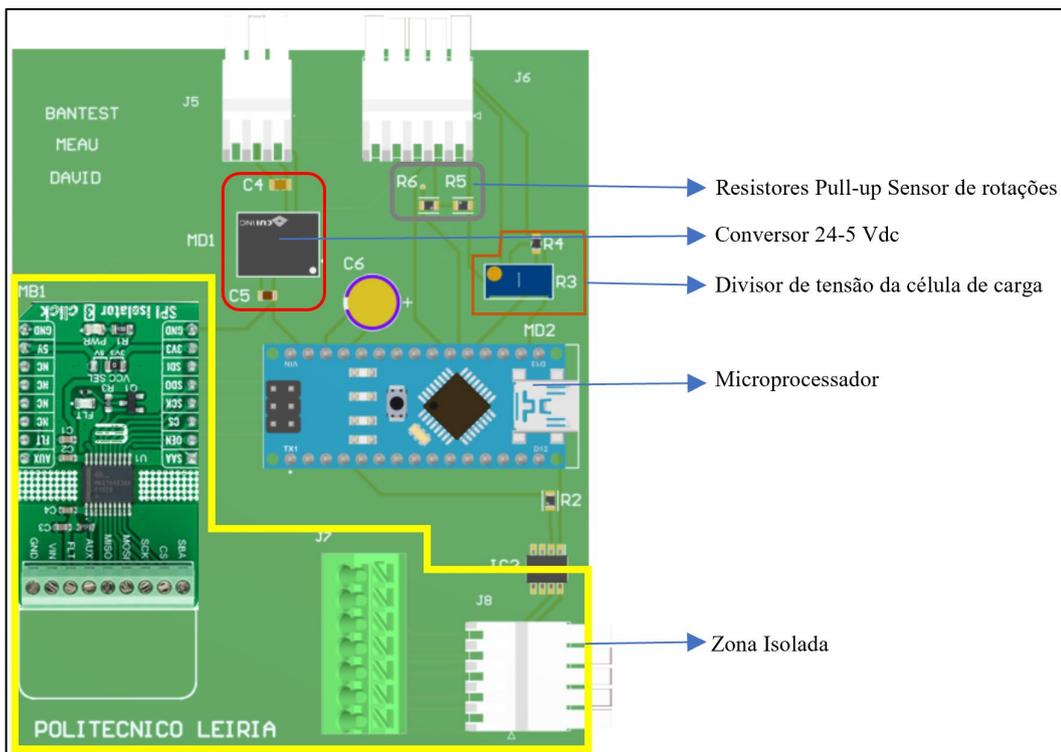


Figura 3.38 – Vista 3D da placa MCB com identificação destaque dos componentes e da zona isolada.

Neste projeto utilizou-se como microprocessador uma placa Arduino Nano, equipada com o microprocessador ATmega 328, desenvolvido pela Microchip®, que possui arquitetura

*AVR, Advanced RISC Architecture*, de 8 bits e frequência de trabalho de 16 MHz, memória flash 32 kb e 2 kb de memória estática, são números modestos em comparação com outras placas da família Arduino, entretanto atendem ao proposto, visto que o esforço computacional é realizado na plataforma LabVIEW®. A placa possui 14 portas de entrada e saída das quais seis com capacidade de operar como saída PWM, pode ser alimentada através de uma fonte externa com valores de 6 a 20 V ou através da interface USB mini-B, a qual também é utilizada para interface com o computador pessoal. Optou-se por utilizar uma placa completa, por possuir todos os componentes acessórios necessários ao funcionamento e interface do microcontrolador, ganhando-se em tempo de engenharia, há de se observar que existem placas de boa qualidade de fabrico por preços interessantes.

Outro componente de destaque é o isolador SPI que foi aplicado nesta placa. Os dados relativos a tensão aplicada ao motor e o controlo da aceleração são trocadas entre o microcontrolador e o controlador do motor, entretanto pelas características de funcionamento deste dispositivo há grande geração de ruído elétrico, que eventualmente podem causar mal funcionamento ou queima de componentes eletrónicos mais sensíveis. Outro aspeto é o fato do controlador do motor estar conectado ao sistema de alta tensão, na hipótese de ocorrer algum problema de isolamento, elevados níveis de tensão podem surgir nos demais dispositivos e elementos interligados ao controlador. Consegue-se superar estes problemas com a utilização de um dispositivo que promove a isolação entre as partes que neste projeto é o isolador SPI. O controlo do potenciómetro digital é feito por intermédio do protocolo de comunicação SPI, entre este dispositivo e o microcontrolador e as informações relativas a tensão aplicada são externadas pelo controlador por intermédio de protocolo CAN, entretanto como o microcontrolador não possui interface CAN nativa é utilizada uma placa auxiliar baseada no chip MCP2515 e MCP2562 fabricados pela Microchip® e que, de maneira muito resumida, permitem a conexão do microcontrolador a um barramento CAN utilizado a interface SPI. Pois, nesta situação consegue-se a conexão de dois dispositivos diferentes ao microcontrolador usando o mesmo barramento de comunicação e ao se utilizar um dispositivo que promova sua isolação, consegue-se separar o controlador do motor da placa MCB. Para tal, foi utilizada uma placa auxiliar baseada no chip MAX14483 de fabricação Maxim Integrated™. Esse chip possui seis canais digitais isolados galvanicamente até 3,75 kV, destes canais três são de baixa latência permitindo frequência de operação de até 100 MHz e 200 Mbps de taxa de dados. Estes canais de alta velocidade são utilizados para conectar as linhas SDI, SDO e SCLK e os outros canais isolados, de

menor velocidade, são utilizados para a linha CS, um canal auxiliar que pode ser utilizado como a linha CS de um outro dispositivo escravo e o último canal pode ser utilizado como monitoramento da alimentação entre o lado do dispositivo mestre e o lado do dispositivo escravo. A placa é assemblada pela MIKROE e possui todos os demais componentes necessários para o seu funcionamento, seu aspeto pode ser observado na figura 3.40.

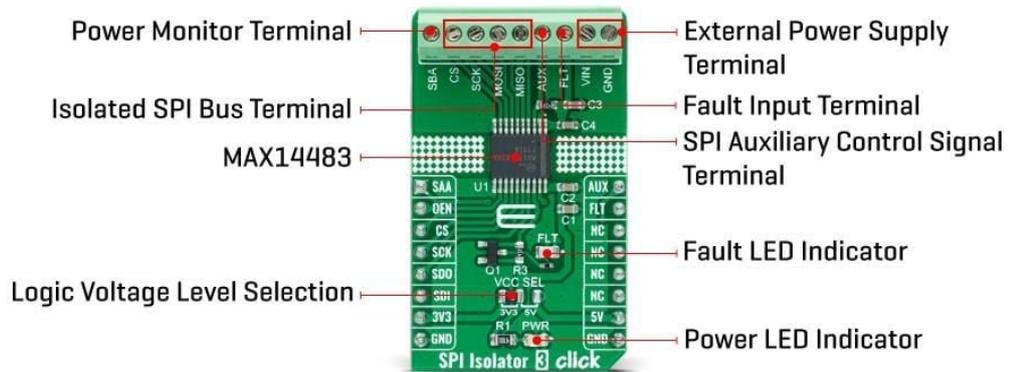


Figura 3.39 – Isolador SPI, fabricação Mikroe. Adaptado de [29].

### Placa CAN\_POTENTIOMETER BOARD

Essa placa foi concebida para ser a interface com o controlador do motor. Está conectada a placa MCB por intermédio de uma interface SPI isolada e é responsável por realizar a aquisição da tensão aplicada ao motor via barramento CAN e também é responsável por realizar o controlo da aceleração do motor através de um potenciômetro digital.

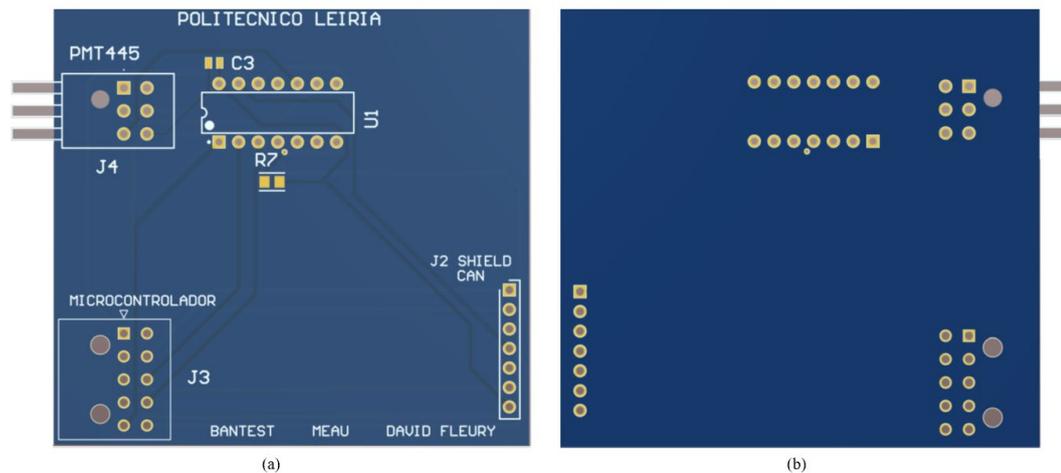


Figura 3.40 – Placa Can\_Potentiometer: (a) representa a vista 2D do plano superior e (b) representa a vista 2D do plano inferior.



Figura 3.41 – Placa interface CAN, adaptado de [30].

Na figura 3.42 é possível observar a placa auxiliar para a interface CAN. No lado esquerdo encontram-se os pinos de conexão ao barramento SPI enquanto no lado direito vê-se a interface ao barramento CAN. Por intermédio deste conversor o microcontrolador conecta-se ao controlador do motor a uma velocidade de 100 kbps para obter dados relativos a tensão aplicada ao motor. Com esse valor é possível estimar a velocidade do motor por intermédio da constante de velocidade (rpm/V) e também calcular a potência elétrica do motor, que é a principal grandeza que busca-se conhecer com o desenvolvimento deste projeto.

Por sua vez, o controlo da velocidade vai ser feito mediante a utilização de um potenciômetro digital. De acordo com a velocidade definida no programa de controlo, o microcontrolador ajustará o potenciômetro de maneira a obter a velocidade correspondente. O potenciômetro digital possui uma porta que é responsável por habilitar ou desabilitar seu funcionamento a qual, quando desabilitada, leva o potenciômetro a um ajuste que equivale a uma aceleração percentual igual a zero (0%). Portanto este recurso será utilizado com vistas a segurança operacional evitando que o motor seja acelerado quando o microcontrolador e/ou o sistema de controlo não estejam operacionais. O dispositivo utilizado como potenciômetro digital é o chip MCP4251, fabricação Microchip, que possui dois potenciômetros no mesmo encapsulamento, com resistência total de 5 kohm e uma rede de resistores de 8 bits, ou seja, o valor total da resistência é subdividido em 256 “degraus”, o que equivale a dizer que o ajuste do potenciômetro pode ser feito em passos de 19,60 ohm e se pensarmos em termos de tensão significa que o ajuste pode ser feito em intervalos de 19,60 mV. Ora, se considerarmos que a tensão de controlo do motor varia de 0 a 5 V para uma velocidade percentual de 0 a 100% e que o motor a ser utilizado para ensaios e testes de validação do banco de potência possui uma velocidade nominal de 2880 rpm, pode-se concluir que o ajuste de velocidade pode ser feito em incrementos de aproximadamente 11,30 rpm para cada passo do potenciômetro.

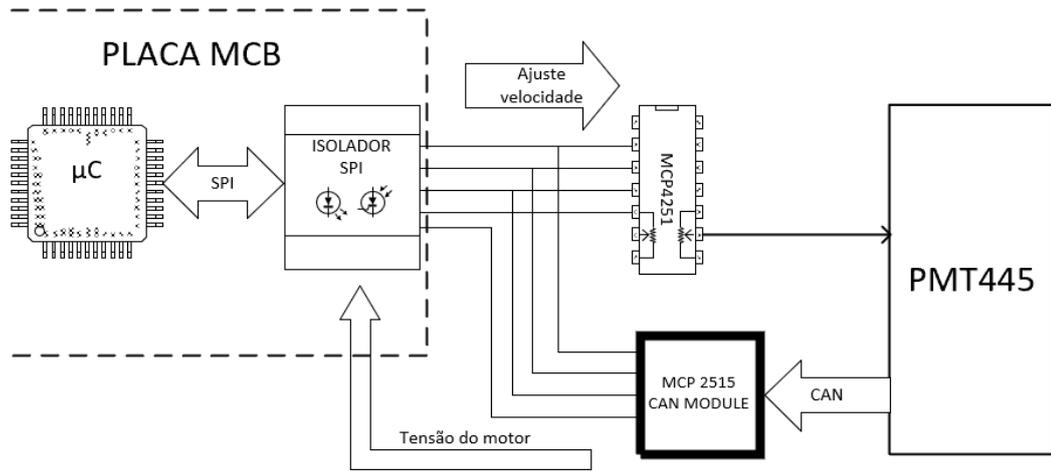


Figura 3.42 – Arquitetura da placa CAN\_POTENTIOMETER com referência à conexão com a placa MCB.

### Placa para medição da corrente elétrica do motor – Current Sensor PCB

Para o cálculo da potência consumida pelo motor e consequente determinação de seu rendimento faz necessária a medição da corrente de alimentação, ou em outras palavras, a corrente consumida pelo motor. Para tal foi projetada uma placa de circuito impresso que utiliza um sensor de corrente Hall MLX91217, de fabricação Melexis. Na figura 3.43 encontram-se representadas as vistas 2D superior e inferior da placa e na figura 3.44 é possível observar a disposição 3D dos componentes. Esta placa conecta-se diretamente a placa MCB e o sinal de saída do sensor de corrente é em tensão e essa informação é convertida no microprocessador em dados que serão repassados ao sistema de controlo do banco de ensaio de potência.

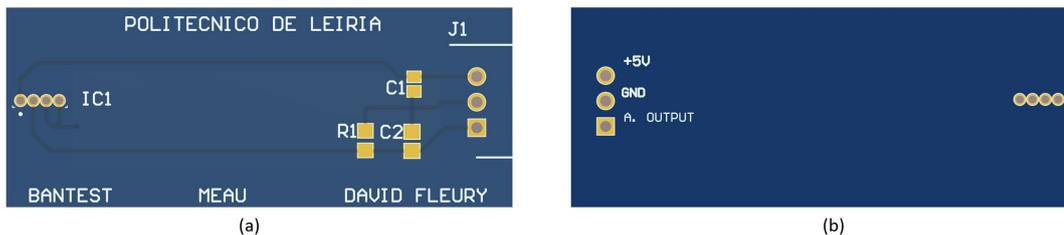


Figura 3.43 – Placa *Current\_Sensor*: (a) representa a vista 2D do plano superior e (b) representa a vista 2D do plano inferior.

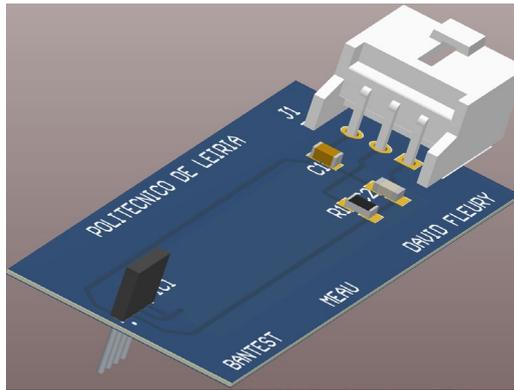


Figura 3.44 – Vista em perspectiva isométrica da placa.

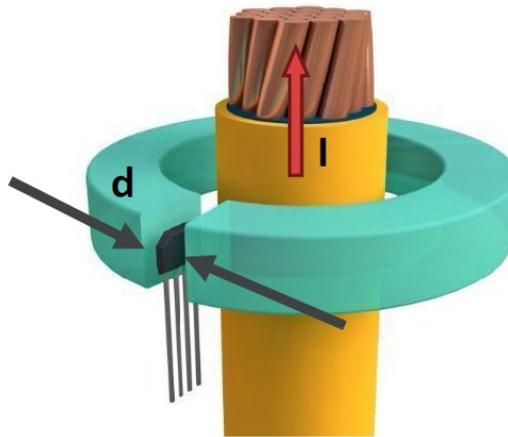


Figura 3.45 – Esquema de montagem do núcleo de ferrite e do sensor Hall, adaptado de [31].

Na figura 3.45 é possível observar o sensor de corrente montado na porção esquerda da PCB. Haverá a montagem de um núcleo circular de ferrite, montado em posição envolvente a um dos cabos de alimentação do motor, com um entreferro da ordem de 2 mm no qual será posicionado o sensor hall, na figura 3.46 há uma representação esquemática desta montagem. O sensor de corrente MLX91217 é um circuito integrado com princípio de operação baseado no efeito Hall, capaz de medir a densidade de fluxo magnético aplicada ortogonalmente a sua superfície. A sua saída é em tensão proporcional a densidade de fluxo magnético aplicado. O fabricante recomenda a utilização de um núcleo ferromagnético em forma de anel com o sensor posicionado em um pequeno entreferro (espaço) existente neste núcleo e envolvente ao cabo que conduz a corrente a ser mensurada. Este arranjo concentra e amplifica o fluxo a ser medido pelo sensor ao mesmo tempo que atenua eventuais interferências externas ao campo magnético. O sensor aplicado neste projeto possui uma sensibilidade de 13 mV/mT e para o arranjo proposto, no qual o sensor é montado no centro

do entreferro de um núcleo ferromagnético de comprimento  $d$  e para uma corrente de intensidade  $I$ , o campo magnético  $B$  pode ser aproximado pela equação (10), [31]:

$$B [mT] = 1.25 \times \frac{I [A]}{d [mm]} \quad (10)$$

Por intermédio da equação [9], da sensibilidade do sensor e a distância do entreferro adotada no projeto de 2 mm, calcula-se a maior corrente possível de ser mensurada mantendo-se a tensão de saída do sensor abaixo dos 5 V suportados pelo microcontrolador, uma vez que o sensor pode trabalhar com até 10 V em sua saída [32]. O valor calculado é de aproximadamente 615 A, que é um valor menor que os 400 A consumidos pelo motor em regime de pico de potência. Ao se calcular o campo magnético induzido pela corrente de pico obtém-se um valor menor que o máximo especificado para o sensor.

### 3.2.5. Distribuição de corrente contínua

Os diferentes elementos eletroeletrônicos deste projeto necessitam de alimentação elétrica para operar, entretanto alguns destes elementos operam a tensão de 48 V, outros operam a tensão de 24 V e também há elementos que operam com tensão máxima de alimentação de 5 V. Há ainda a necessidade de proceder com a separação da alimentação do motor elétrico e seu controlador dos demais elementos visto a produção de ruído elétrico produzido pela operação normal destes componentes. Portanto os equipamentos que são alimentados com tensão nominal de 48 V serão alimentados pela utilização de um banco de baterias ou de uma fonte de alimentação que forneça potência suficiente para o motor. Os dispositivos que operam em 24 V vão ser alimentados por uma fonte de alimentação Siemens, modelo SITOP Power 3.5 com entrada em corrente alternada de 230 V e saída de 24 V. E por fim, os elementos que operam com tensão de alimentação de 5 V, serão alimentados a partir da placa MCB na qual existe um conversor de tensão fabricação CUI INC., modelo VX7805-1000. Na figura 3.47 é possível observar uma distribuição esquemática da distribuição de tensão de alimentação para os diversos elementos do banco de ensaio de potência.

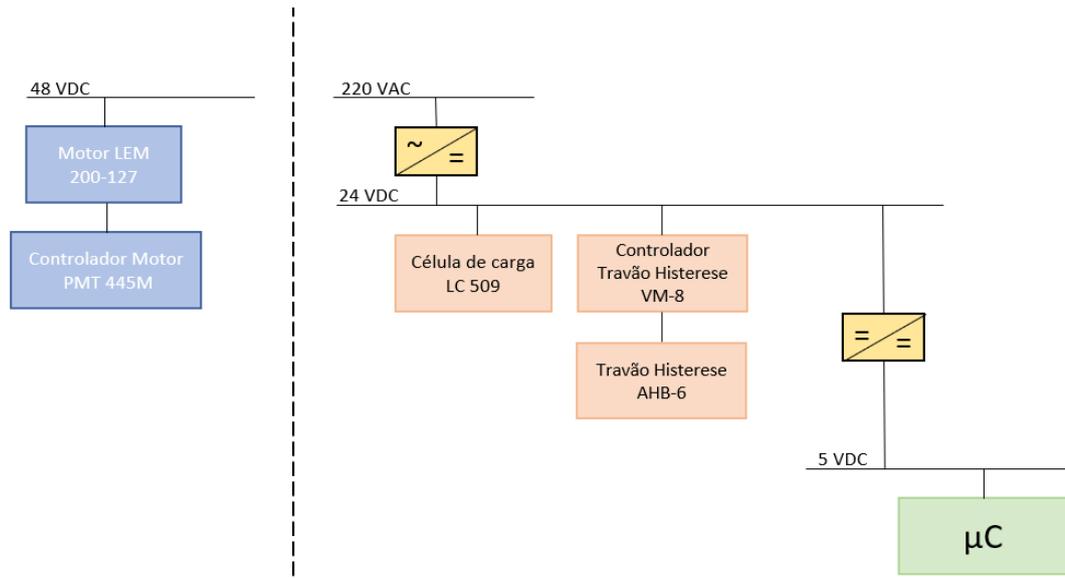


Figura 3.46 – Esquema de distribuição de tensão.

### 3.3. Protocolos de comunicação

Para o funcionamento normal do banco de ensaio de potência ocorre a troca de sinais de controlo e a troca de informações entre os diversos componentes, ou ainda poderá haver a variação de níveis de tensão em um determinado componente para indicar que algo se passa ali. Entretanto quando a troca de informação entre dispositivos envolve uma maior quantidade de dados ou quando se trata de uma informação crítica para o processo e faz necessário utilizar mecanismos que garantam a entrega desta informação, há a necessidade de se adotar um conjunto de regras e parâmetros para assegurar que os interlocutores consigam conversar entre si sem que haja algum tipo de comprometimento da mensagem trocada. Ao conjunto destas regras e parâmetros dá-se o nome de Protocolo de Comunicação e neste projeto far-se-á o uso de três protocolos diferentes, conforme a tabela 3.6 a seguir:

Tabela 3.6 – Protocolos de comunicação utilizados no projeto

Protocolo	Interligação	Função
CAN	Placa Interface CAN – Controlador do Motor	Informação
SPI	Placa Interface CAN - Microcontrolador	Informação
SPI	Microcontrolador – Potenciómetro Digital	Controlo
UART	Computador Pessoal - Microcontrolador	Controlo e Informação

### 3.3.1. Protocolo de comunicação UART

A comunicação entre dois dispositivos pode ser efetuada em paralelo ou em série. A comunicação paralela envolve a transferência de vários bits ao mesmo tempo durante cada pulso de relógio, há a necessidade de uma linha de transmissão para cada bit a ser transferido e uma linha para a transmissão do sinal de relógio (sincronismo). Consegue-se transmitir um número elevado de informação, entretanto utiliza-se um número elevado de linhas de entrada e saída do hardware. Por sua vez, na comunicação série é transmitido um bit de cada vez com conseqüente menor velocidade de transmissão quando comparada com a comunicação em paralelo. Entretanto há a economia de linhas de transmissão, em sua forma mais simples uma interface serial necessita de uma única linha de transmissão e, tipicamente, nunca necessita de mais do que 4 linhas de transmissão [33]. A comunicação série pode ser feita com a utilização de uma linha de relógio, neste caso dita comunicação serial síncrona, ou poderá ser realizada sem a utilização de uma linha de sincronismo, neste caso é denominada comunicação serial assíncrona.

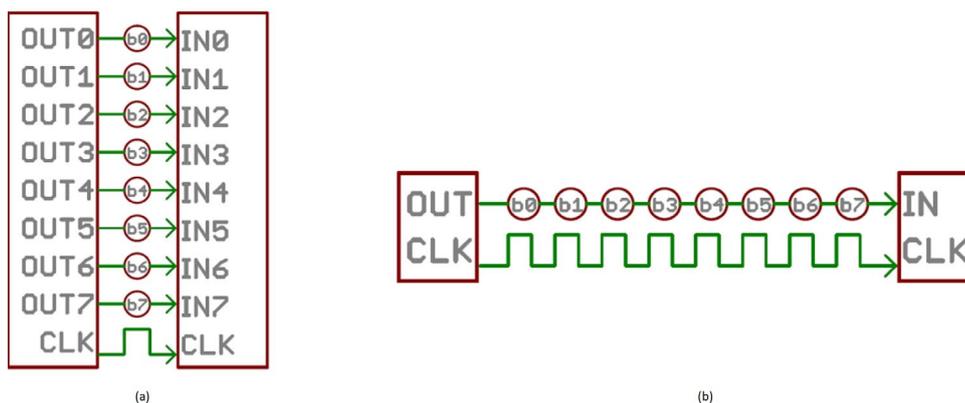


Figura 3.47 – Comparação entre comunicação paralela (a) e comunicação série (b), adaptado de [33].

Será dada ênfase ao detalhamento da comunicação série assíncrona, que é a qual utilizar-se-á para a comunicação entre o microprocessador e o computador pessoal no qual o software de controlo é executado. Esse método de comunicação, conhecido como *UART* – *Universal asynchronous receiver transmitter*, quando opera em modo *full-duplex* e é implementado de acordo com a norma EIA RS-232C é vulgarmente conhecido como protocolo de porta série. Sendo que não há linha de relógio, é importante que existam mecanismos que garantam o sincronismo entre o transmissor e o recetor, desta feita há de se definir de maneira idêntica para ambos os lados os seguintes parâmetros:

- ✓ Taxa de transmissão, também conhecido como *baud rate*;
- ✓ Utilização de bit de paridade, *parity bit*;
- ✓ Quantidade de bits de dados, *data bits size*;
- ✓ Quantidade de bits de parada, *stop bits size*;
- ✓ Controlo de fluxo.

A configuração mais vulgar que normalmente é encontrada é a configuração 8N1, que significa que o quadro de transmissão é composto por 8 bits de dado, não há bit de paridade e utiliza-se 1 bit de parada. Há transmissão é feita do bit menos significativo (LSB – *Least Significant Bit*) para o bit mais significativo (MSB – *Most Significant Bit*), quando não há transmissão de dados o sinal é mantido em nível alto, há uma transição de nível alto para nível baixo que assinala a transmissão do bit de início (*Start bit*) e de acordo com as configurações são enviados um ou dois bits de parada. Há de se observar que a placa Arduino faz uso de um chip para adequar a interface UART com a interface USB, através da qual é realizada a conexão com o computador pessoal, no caso da placa Arduino Nano o chip que é utilizado é o FT232RL.

### 3.3.2. Protocolo de comunicação SPI

O protocolo SPI, ou *Serial Peripheral Interface* é um protocolo de comunicação série, síncrono e que opera em modo *full-duplex*, é largamente utilizado na ligação entre microcontroladores e periféricos. É uma ligação ponto-a-ponto baseada no princípio Mestre-escravo, implementado em arquitetura mestre – multi escravo. Sob o ponto de vista físico pode ser implementado 3 ou 4 linhas, entretanto a implementação com 4 linhas é a mais usual. As linhas *MOSI* e *MISO* são as linhas de dados, *MOSI* – *Master (Main) Out, Slave (Subnode) in* – refere-se a linha onde o fluxo de dados é direcionado do controlador para o periférico, *MISO* – *Master (Main) in, Slave (Subnode) out*, refere-se a linha na qual o fluxo de dados é direcionado do periférico para o controlador. Há a linha de relógio (SPI CLK, SCLK) a qual tem origem no mestre e é utilizada para sincronização do fluxo de dados e por fim há a linha responsável por selecionar o dispositivo periférico com o qual a comunicação será estabelecida, a qual é denominada por *Chip Select (CS ou ainda SS – Slave (Subnode) Select)*. A linha CS é mantida em nível alto enquanto não há transmissão e é transacionada para nível baixo para conexão e habilitação do dispositivo periférico ao barramento SPI. Visto que o barramento SPI pode ser utilizado na configuração mestre – multi escravo e que se faz necessário que haja uma linha de *Chip Select* para cada um dos

dispositivos escravos conectados ao barramento, percebe-se que a quantidade de terminais utilizados no dispositivo mestre cresce proporcionalmente ao número de dispositivos conectados. Para otimização de terminais do dispositivo mestre é possível realizar a conexão usando-se a topologia *daisy chain*, neste tipo de conexão utiliza-se apenas um terminal *Chip Select* para múltiplos escravos que recebem simultaneamente o sinal de relógio e a informação é trafegada de um dispositivo a outro e apenas o último dispositivo escravo transmite a informação para o dispositivo mestre. A configuração do sinal de relógio originário no dispositivo mestre permite a operação da transmissão SPI em quatro modos diferentes, conforme tabela 3.7. Esses modos de operação são definidos de acordo com que se configura a polaridade (*Clock Polarity – CPOL*) e a fase (*Clock Phase – CPHA*) do sinal de relógio. Esses modos de operação dizem respeito em quais momentos os dados disponíveis nas linhas MISO e MOSI serão amostrados.

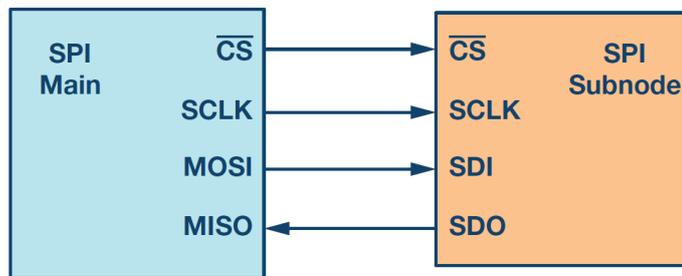


Figura 3.48 – Conexão SPI entre um dispositivo mestre e um dispositivo Escravo, adaptado de [34].

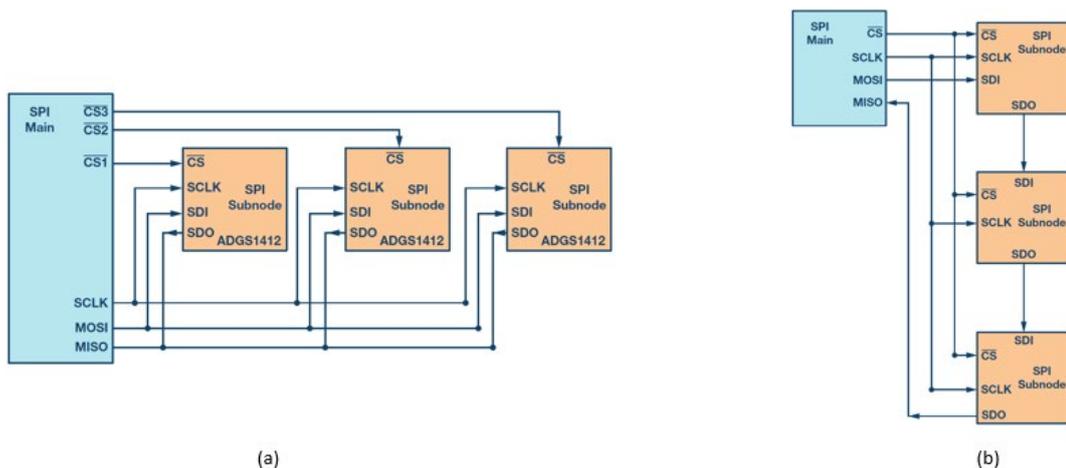


Figura 3.49 – Comparação entre a topologia “estrela” (a) e a topologia *daisy chain* (b), na qual observa-se a economia de terminais do controlador. Adaptado de [34].

Tabela 3.7 – Modos de operação SPI, adaptado de [34].

Modo de operação	CPOL	CPHA	Polaridade do relógio em <i>Idle</i>	Polaridade do relógio para amostragem e descarte da informação
0	0	0	Nível lógico baixo	Dado amostrado no bordo de subida e descartada no bordo de descida
1	0	1	Nível lógico baixo	Dado amostrado no bordo de descida e descartada no bordo de subida
2	1	0	Nível lógico alto	Dado amostrado no bordo de subida e descartada no bordo de descida
3	1	1	Nível lógico alto	Dado amostrado no bordo de descida e descartada no bordo de subida

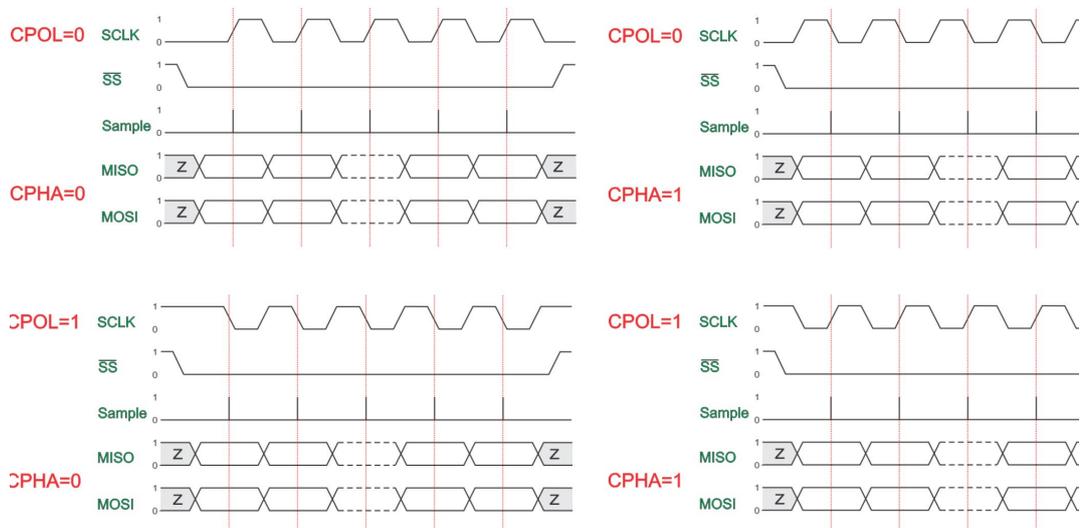


Figura 3.50 – Modos de transmissão SPI, adaptado de [35].

### 3.3.3. Protocolo de comunicação CAN

O desenvolvimento do protocolo de comunicação CAN teve início em 1983 e em fevereiro de 1986 foi apresentado no congresso da Sociedade de Engenheiros Automotivos pela Robert Bosch GmbH [36]. Inicialmente desenvolvido para aplicações em veículos, logo tornou-se largamente utilizado em automação industrial, embarcações, aviação, máquinas agrícolas e veículos pesados devido suas vantajosas características de robustez e facilidade de implementação. Antes da adoção do protocolo CAN a interligação dos diversos sistemas, sensores e módulos era feita com a utilização de feixes de cabos, o que acarretava um uso intensivo de fios e conectores, baixa flexibilidade de alteração da arquitetura elétrica, influência de interferências eletromagnéticas e ruídos de natureza elétrica. O barramento CAN é caracterizado pela utilização de dois fios, denominados CAN H e CAN L, trançados, com resistência típica de 120 ohm, apresenta alta robustez contra ruídos e interferências eletromagnéticas e flexibilidade na implementação de novos componentes ao barramento,

logo sua adoção consegue apresentar resposta para diversos problemas enfrentados anteriormente, além de contribuir para uma significativa redução na quantidade de cabos usados nos sistemas elétricos dos veículos, face essas vantagens o CAN é largamente utilizado para a interconexão de módulos, sensores, atuadores que compõe os veículos atuais. No que diz respeito a normatização, o protocolo CAN é definido na norma ISO-11898 *Controller Area Network* e SAE J1939 *Recommended Practice for a Serial Control and Communications Vehicle Network*. O barramento CAN opera em modo Half Duplex, com suporte a vários dispositivos Mestres que possuem permissões e funcionalidades equivalentes entre si. A transmissão é do tipo *Broadcast*, isto é, a mensagem está disponível para todos os nós conectados ao barramento, entretanto cada mensagem possui um identificador que distingue a sua origem. Com base neste identificador os eles decidem se processam a mensagem ou se a mensagem será descartada. O endereçamento das mensagens garante a priorização daquelas que são mais importantes, observar que há a adoção de mecanismos para proceder a detecção de colisões, conforme definido pelo protocolo CSMA/CD. O protocolo CAN também possui mecanismos para a detecção e isolamento de dispositivos defeituosos. A rede CAN é composta por no mínimo dois nós, por nó entende-se como um dispositivo conectado ao barramento, as velocidades podem alcançar débitos de até 1Mbps para distâncias de até 40 metros. Essencialmente um nó é composto por um dispositivo de processamento que efetua o tratamento das mensagens, um controlador CAN que efetua a gestão e controlo dos dados que serão transmitidos e recebidos e, finalmente, um *transceiver* que é responsável pela compatibilização dos níveis de sinal lógico com os níveis de sinal do barramento CAN, nas extremidades do barramento usam-se resistências de 120 ohm com o objetivo de evitar reflexão de sinais. A transmissão de dados no barramento CAN é feita por intermédio da transição de níveis de tensão no barramento, definidos de forma diferencial entre os níveis das linhas CAN H e CAN L. São definidos dois estados lógicos possíveis de se existir no barramento, o estado Recessivo (*Recessive Logic H*) e o estado dominante (*Dominant Logic L*). Quando a diferença entre as linhas CAN H e CAN L for inferior a 0,5 V disse que o barramento se encontra no estado recessivo (“1”), neste estado ambas as linhas possuem tensão aproximadamente igual a 2,5 V e, quando a diferença for maior que 1,5 V, o barramento encontra-se no estado dominante (“0”), estado no qual a linha CAN H apresenta uma tensão aproximadamente igual a 3,5 V e a linha CAN L apresenta uma tensão de aproximadamente 1,5 V, conforme é possível observar na figura 3.53.

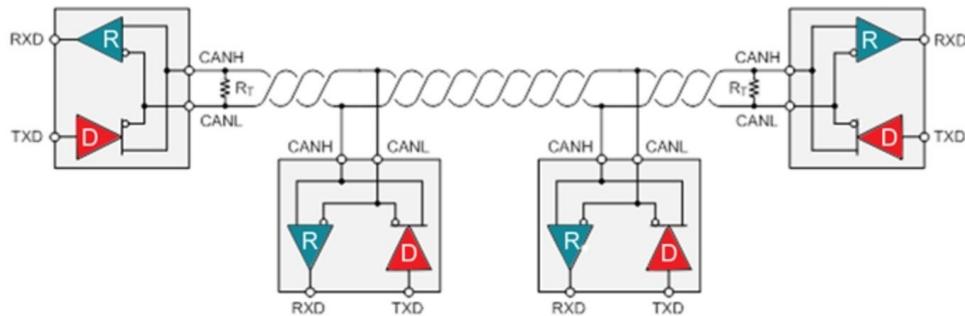


Figura 3.51 – Topologia típica de um barramento CAN, adaptado de [37].

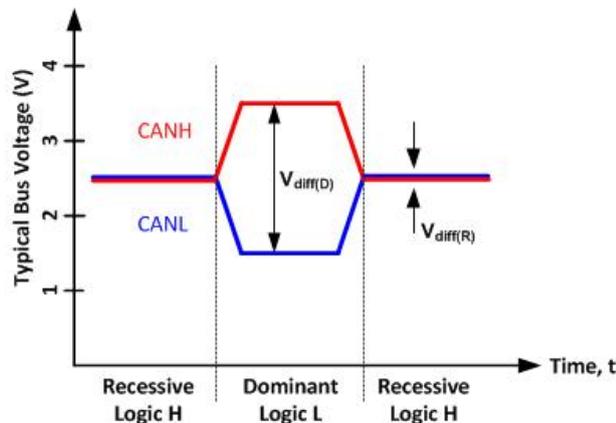


Figura 3.52 – Níveis de tensão no barramento CAN, adaptado de [38].

No barramento CAN não existe um sinal de relógio, portanto faz-se necessário que haja um método para sincronizar todos os dispositivos conectados e isso é feito pela transição de um estado recessivo para um estado dominante. Na hipótese de a mensagem ser composta por uma sequência muito longa de estados dominantes ou de estados recessivos, o protocolo prevê um método para garantir a sincronização e o surgimento de níveis DC no barramento. Esse procedimento recebe o nome de *bit stuffing*, no qual o transmissor adiciona a um bit com valor oposto adicional após cinco bits consecutivos com o mesmo valor. Esse procedimento é feito a nível de hardware no transmissor e no recetor da mensagem, portanto é transparente para o utilizador. O protocolo CAN suporta dois formatos de mensagens que inicialmente diferenciam-se pelo tamanho em bits de seu identificador, no formato *standard* o identificador é composto por 11 bits enquanto no formato *extended* o identificador possui um comprimento de 29 bits. As mensagens são compostas por quadros de dados ou *data frames* conforme é possível de se observar na figura 3.55:



Tabela 3.8 – Estrutura do quadro de mensagem CAN *standard*.

Campo	Nº de bits	Descrição
<i>Start of Frame (SOF)</i>	1	Indica o início da transmissão da mensagem e sincroniza todos os nós.
<i>Arbitration Field</i>	12	É composto pelo identificador da mensagem e um bit adicional de controlo.
<i>Remote Transmission request (RTR)</i>	1	Solicitação de transmissão por um nó.
<i>Identifier Extension (IDE)</i>	1	Define se a mensagem é <i>standard</i> ou <i>extended</i> .
<i>Reserved bit (RB0)</i>	1	Reservado
<i>Data Length Code (DLC)</i>	4	Indica o número de bytes de dados
<i>Data</i>	0-64	Informação a ser transmitida
<i>Cyclic Redundancy Check (CRC) + Delimiter</i>	16	Mecanismo de deteção de erros de transmissão e um bit delimitador
<i>Acknowledge (ACK) + Delimiter</i>	2	Mecanismo de confirmação de receção e delimitador
<i>End of frame (EOF)</i>	7	Define o fim do quadro.
<i>Interframe Space (IFS)</i>	7	Define o tempo necessário entre cada mensagem recebida.

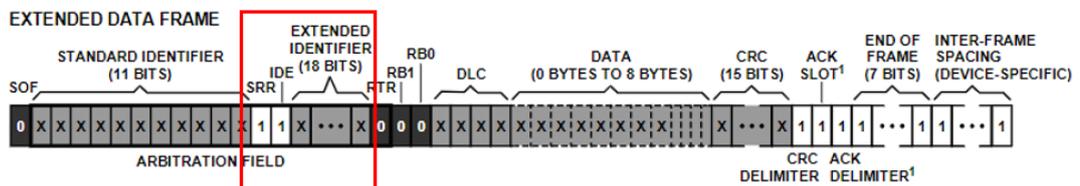


Figura 3.55 – Can extended frame, adaptado de [40].

Existem quatro tipos de quadros utilizados na comunicação CAN, são eles:

**Data frame:** Diz-se a mensagem padrão para troca de dados entre os diversos nós do barramento CAN;

**Remote frame:** Trata-se de uma requisição de mensagem por parte de um nó. Esta mensagem não contém dados;

**Overload frame:** Mensagem de sinalização enviada ao barramento quando um nó necessita de mais tempo para processar a informação. Assim, os demais nós do barramento sabem que será necessário esperar um pouco mais para realizar o envio da próxima mensagem.

**Error frame:** Tipo de mensagem trafegada no barramento CAN quando um dos nós conectado ao barramento deteta que existe uma mensagem com erro, a qual é destruída e ocorre a repetição da transmissão desta mensagem.

### *CAN Flexible Data Rate*

Com o avanço da tecnologia embarcada nos veículos modernos o correspondente aumento no fluxo de informação trafegada motivou a necessidade de desenvolver uma maneira de lidar com os novos requisitos de velocidade e quantidade de informação trocada entre os diversos módulos. Visto que o CAN consegue atingir débitos de até 1 Mbps em distâncias máximas de 40 m, a Bosch em associação com outros fabricantes de automóveis deu início ao desenvolvimento do protocolo CAN *Flexible Data Rate* ou CAN FD. A implementação do protocolo no automóvel deverá ser o mais simples possível e manter a interoperabilidade entre os protocolos CAN e CAN FD mediante utilização de controladores e *transceiver* distintos. Com a nova especificação do protocolo é expectável alcançar velocidades de até 15 Mbps conseguindo transmitir mensagens com até 64 bytes de dados, suprimindo assim as novas necessidades de velocidade e quantidade de dados a ser transmitidos.

No presente projeto será usado o protocolo CAN no formato *standard* para estabelecer a comunicação com o controlador do motor e obter a informação referente a tensão aplicada ao motor, a taxa de transmissão utilizada é de 100 kbps.

### 3.4. Software do microcontrolador

O microcontrolador para desempenhar as suas funções necessita que um código implementado que contenha o conjunto de instruções que serão executadas de modo a permitir a interação do microcontrolador com os demais dispositivos e a realização do processamento de algum dado que esteja ao seu encargo. O desenvolvimento do algoritmo do código implementado no microcontrolador dependerá basicamente de qual a arquitetura que será adotada e para o desenvolvimento de sistemas embarcados existem duas que são mais comuns: *Superloop* e *Background/Foreground*. A arquitetura *Superloop* é aplicável a sistemas de baixa complexidade, caracterizada pela execução contínua, sucessiva e sequencial de tarefas. Após a execução da última tarefa contida no código o processamento é redirecionado para a primeira instrução e um novo ciclo de execução se inicia. Como limitações desta arquitetura cita-se a dificuldade de se lidar com eventos externos, a complexidade crescente do código com a incorporação de novas funcionalidades e a impossibilidade de se prever o tempo decorrido na execução de cada tarefa.

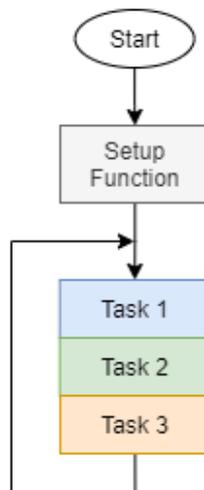


Figura 3.56 – Arquitetura tipo *Superloop*, adaptado de [41].

Outra arquitetura de código comum no desenvolvimento de algoritmos para sistemas embudados é conhecida como *Foreground/Background*, tal como descrito na arquitetura *Superloop* ocorre a execução de um laço contínuo de execução de tarefas de menor prioridade, conhecido por *Background*. Entretanto definem-se condições de interrupção que, na hipótese de ocorrerem, desviam o processamento do código para a execução de tarefas de maior prioridade, tais tarefas são denominadas *Foreground* e tão logo sua execução seja concluída o processamento retorna para o *Background*. Todas as tarefas que pertencem ao

*Background* possuem a mesma prioridade de execução e na ocorrência de atraso na execução de alguma destas tarefas todo o sistema sofrerá [42].

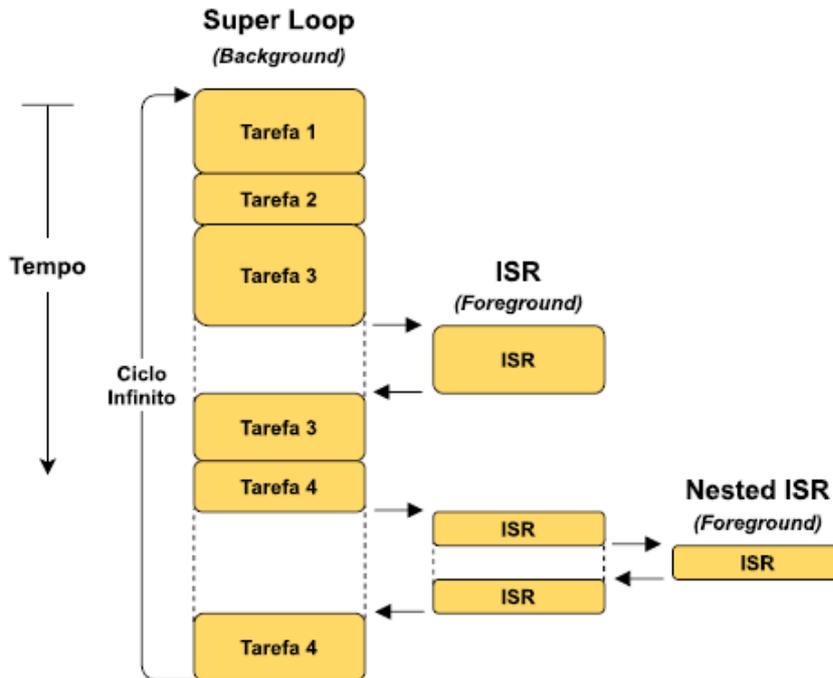


Figura 3.57 – Arquitetura *Background/Foreground*, adaptado de [42].

O código implementado no microprocessador faz uso da arquitetura *Foreground/Background* na qual a maioria das tarefas são executados em *Background* e definiu-se uma tarefa em *Foreground* iniciada por interrupção relacionada ao sensor de rotação. Utilizou-se a própria IDE de desenvolvimento do Arduino visto a relativa simplicidade do código desenvolvido. De seguida apresenta-se a estrutura do código do microcontrolador desenvolvido para o microcontrolador e o respetivo fluxograma.

### 3.4.1. Estrutura do código do microcontrolador

O código foi estruturado em três partes principais, a configuração inicial na qual são definidas variáveis e constantes, inicialização das interfaces de comunicação, por questões de segurança o posicionamento do potenciômetro digital a 0% de aceleração e a realização de um *Handshake* com o computador pessoal. Concluído com sucesso o *Handshake* o código entra na execução das instruções relacionadas a coleta de informações dos diversos sensores e se necessário realiza a atualização do estado dos atuadores, notadamente o controlo do travão de histerese e controlo da aceleração do motor, finalmente há uma tarefa para tratar da interrupção relacionada ao sensor de rotação para cálculo da velocidade de rotação do

travão de histerese que é realizada no corpo principal do código. Nas seções subsequentes será detalhado cada uma destas partes.

### Configuração Inicial – Setup

Na figura 3.59 encontra-se representado o fluxograma da etapa de configuração inicial do microcontrolador. Nesta etapa são carregadas as bibliotecas necessárias para a execução do código, definida as variáveis e constantes que serão utilizadas, a definição dos terminais de entrada e saída do microprocessador, por questões de segurança são ajustados velocidade do motor e carga do travão de histerese para valor zero e por fim é realizado o *Handshake* entre o microcontrolador e o programa de controlo do banco de ensaio. O processo de *Handshake* consiste na monitorização da porta série por parte do microcontrolador. Na existência de dados na interface procede-se com sua leitura e verificação se a informação corresponde a chave que o microcontrolador espera receber, caso positivo é enviada uma mensagem de confirmação para o software de controlo e fica-se estabelecida a comunicação entre as partes com o código do microcontrolador avançando a execução para o programa principal. Na hipótese de o valor recebido não corresponder a chave aguardada pelo microcontrolador, o programa não avança para o módulo principal e o processo de monitorização da porta série é retomado.

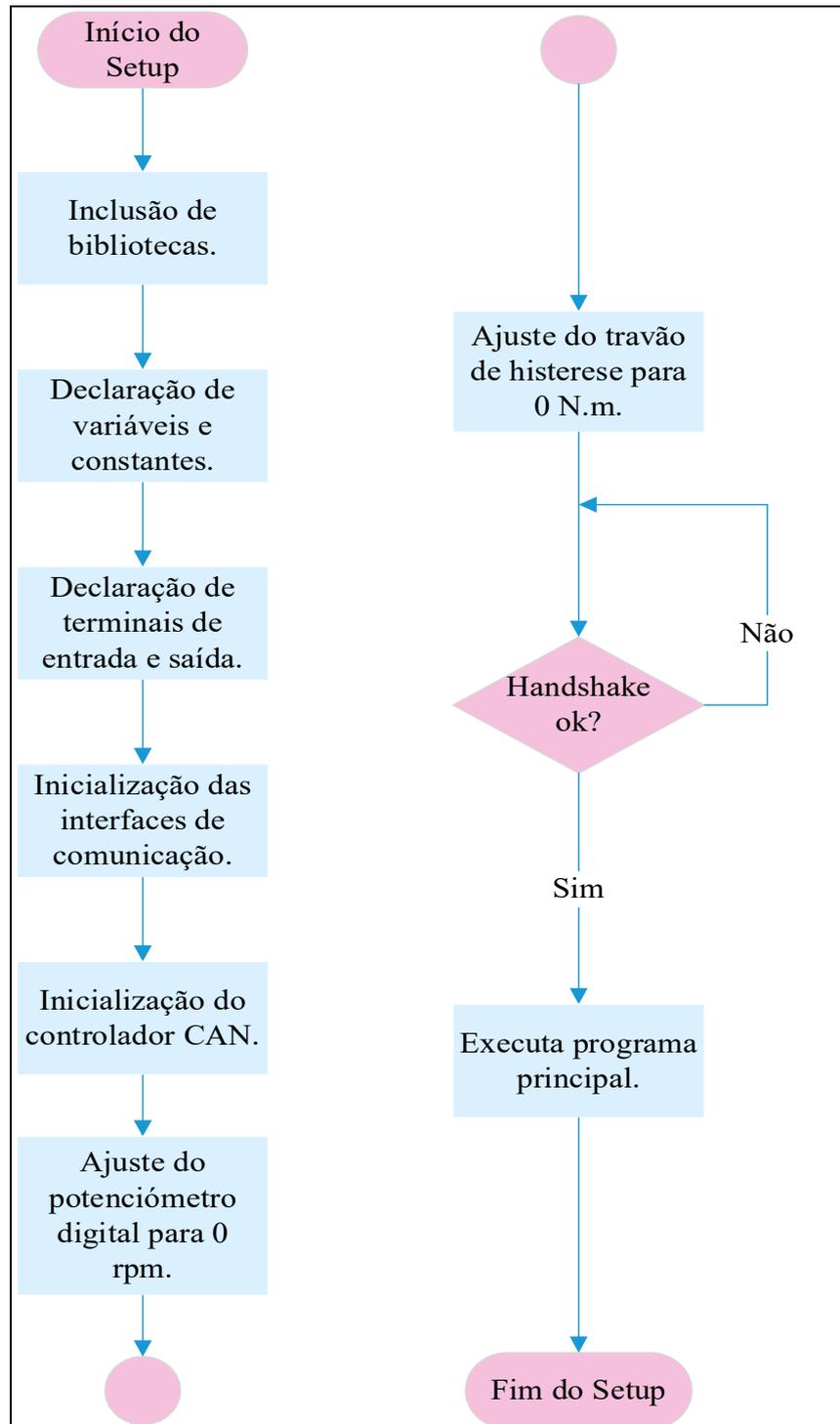


Figura 3.58 – Fluxograma da configuração inicial do microcontrolador.

### Módulo principal

O processo de *Handshake* concluído com sucesso dá início ao programa principal do código do microcontrolador, na figura 3.60 é possível observar o respetivo fluxograma desta etapa. Essencialmente existem dois processos contemplados nesta etapa, um deles diz respeito ao tratamento das interrupções ocasionadas pelo sensor de rotações do travão de histerese e a

monitorização da porta série que irá desencadear a execução de alguma determinada tarefa de acordo com o dado recebido. O sistema, tal qual foi idealizado, procederá com a aquisição de valores dos sensores e atuação dos controladores mediante requisição do software de controlo do banco de potência, levando-se em consideração que o banco de ensaio de potência foi concebido para a realização de ensaios discretos essa solução acaba por otimizar a utilização do microcontrolador e evitando-se a ocorrência de *overflow* de dados na porta série. Portanto durante a execução do programa principal poderá ocorrer uma das seguintes situações abaixo:

- **Atualização dos valores dos atuadores:** Nesta situação o microcontrolador procederá com a leitura do valor que deverá ser parametrizado o travão de histerese, o valor desejado da velocidade do motor ou a atualização de ambos os valores. Projetou-se uma condição de segurança para a possibilidade de ser configurada velocidade nula do motor com aplicação de carga no travão de histerese, situação que ocasiona o surgimento de um binário residual no travão. Caso seja verificada essa situação, automaticamente o microcontrolador vai reduzir a carga do travão para zero antes de reduzir a velocidade do motor;
- **Aquisição dos valores amostrados pelos sensores:** Nesta situação o microcontrolador procederá com a aquisição dos valores dos sensores e do valor de tensão do controlador do motor e repassará estes dados para o software de controlo do banco de ensaio de potência. A sequência de aquisição é: sensor hall, velocidade do travão de histerese, tensão aplicada ao motor e leitura da célula de carga;
- **Modo de verificação de dados:** Modo de operação para fins de verificação operacional do sistema, realizado sem recurso ao software de controlo mediante utilização de um terminal série. É possível efetuar a leitura dos sensores, tensão aplicada e ajuste do travão e da velocidade do motor.

O restante do processamento de dados e cálculo de variáveis, potência, binário, entre outras é efetuado no programa de controlo do banco de ensaio que é executado no computador pessoal e conseqüentemente possui uma maior robustez computacional.

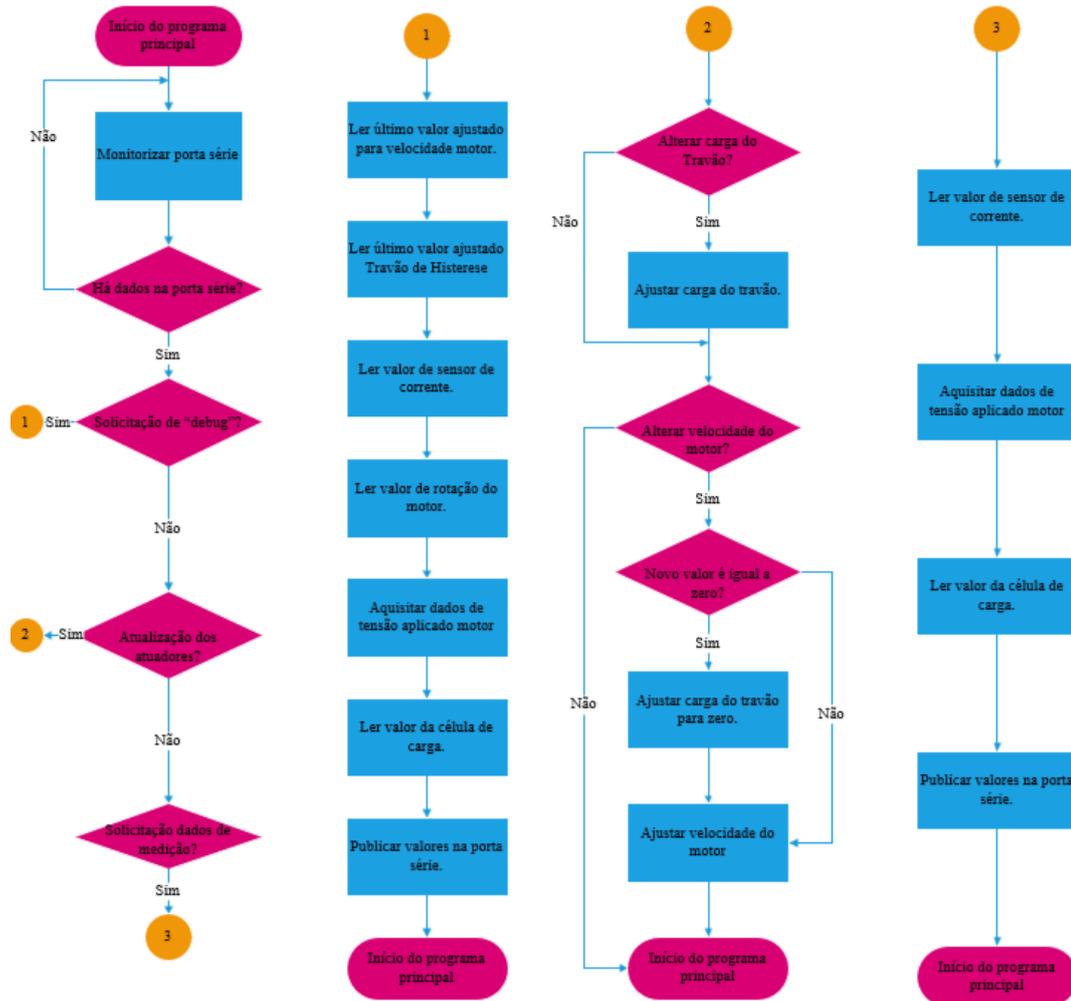


Figura 3.59 – Fluxograma referente ao programa principal do microcontrolador.

### 3.5. Sumário

No presente capítulo abordou-se questões relativas a seleção de componentes de natureza mecânica, elétrica e eletrônica aplicados ao desenvolvimento do projeto. Houve oportunidade também para apresentar o processo de recuperação do veio de travão de histerese e respetiva compatibilização de comprimento e diâmetro ao que fora projetado.

### 3.6. Conclusão

Neste processo de seleção de componentes para aplicação no projeto do banco de ensaio de potência deparou-se com alguns constrangimentos impostos pelos equipamentos que deveriam ser utilizados. Por exemplo, a elevada velocidade rotacional do travão de histerese condiciona a seleção de rolamentos e chumaceira que poderiam ser aplicadas ao projeto. A célula de carga também se mostra sobredimensionada para a aplicação como foi idealizada, será necessário a seleção de uma célula de carga compatível aos carregamentos envolvidos. Finalmente, o pico de potência do motor que será utilizado para a realização dos ensaios e testes de validação influenciou a seleção da correia utilizada no sistema de transmissão, levando a seleção de uma correia de considerável largura.

Em relação aos componentes eletrónicos, optou-se sempre que possível pela adoção de placas auxiliares que já possuem, além do circuito integrado escolhido para a aplicação no projeto, todos os demais componentes necessários para o seu funcionamento. Essa situação foi utilizada na seleção do microcontrolador, da interface de isolamento de tensões do barramento SPI e também do controlador de conexão ao barramento CAN.

Com a seleção dos dispositivos e elementos selecionados assim como a recuperação do veio do travão, pode-se considerar que os objetivos intermédios 1 e 2 foram concluídos, conforme tabela 3.9.

**Tabela 3.9 – Objetivos intermédios atingidos.**

OBJETIVO 1	Efetuar a recuperação funcional e adequar o travão de histerese ao projeto em causa.
OBJETIVO 2	Desenvolver de um sistema de aquisição de dados e interface de controlo com os elementos do banco de ensaio.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

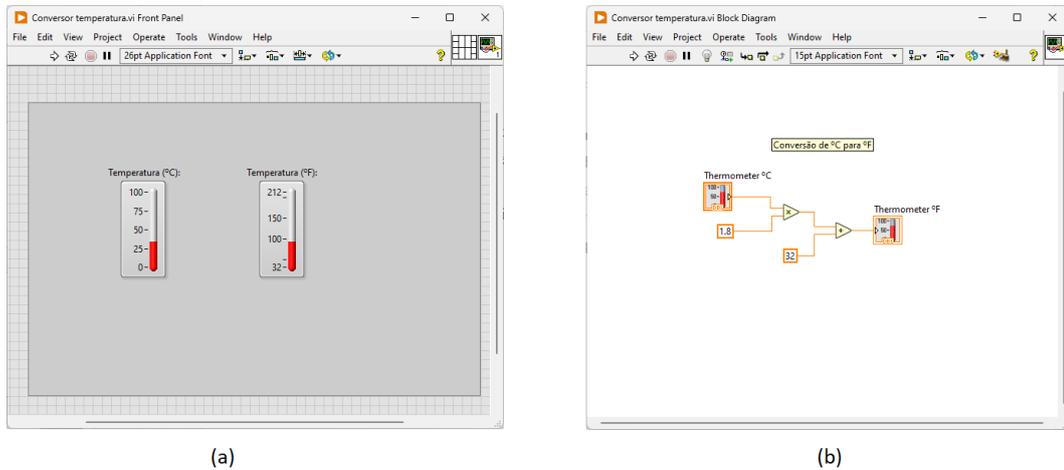
## 4. Software de Visualização e Controlo

O enfoque deste capítulo será em relação ao desenvolvimento do software de visualização e controlo do banco de ensaio de potência que será utilizado no computador pessoal. O capítulo tem início com a apresentação da plataforma utilizada para o desenvolvimento da aplicação e posteriormente são descritas as funcionalidades implementadas para possibilitar a utilização do software de controlo para realização dos testes e ensaios.

### 4.1. Plataforma de desenvolvimento

O software de controlo do banco de ensaio de potência foi desenvolvido com recurso a linguagem de programação denominada LabVIEW<sup>®</sup> desenvolvida pela National Instruments (NI). Ao contrário das linguagens de programação tradicionais, LabVIEW<sup>®</sup> é uma linguagem gráfica que se baseia na utilização de blocos ou ícones, que executam uma determinada tarefa e interligados entre si por linhas que conduzem o fluxo de dados, os quais controlam a execução do programa. Cada programa desenvolvido no LabVIEW<sup>®</sup> recebe o nome de VI – *Virtual Instrument* e possui uma vantagem intrínseca de poder ser reutilizados inúmeras vezes na mesma aplicação ou em aplicações diferentes, existem milhares de VI's disponíveis para utilização sejam elas desenvolvidas pelo próprio fabricante do software ou por uma extensa comunidade de desenvolvedores espalhados pelo mundo [43]. De facto, pelas suas poderosas ferramentas, o LabVIEW<sup>®</sup> é uma linguagem de programação largamente adotada por cientistas, engenheiros e estudantes para o desenvolvimento de aplicações relacionadas, e não somente limitada, a Monitorização e Registo de Dados, Processos de Aquisição de dados, Sistemas de Controlo, Automação Industrial, Sistemas SCADA, entre outras aplicações [44]. O desenvolvimento do programa é feito através de duas *interfaces*. O Painel Frontal (*Front Panel*) que é a interface do usuário desenvolvida através da inserção de dispositivos de entrada e saída compostos desde botões, *KNOBS*, controlos deslizantes, indicadores analógicos, indicadores digitais ou gráficos. A outra *interface* é o Diagrama de Blocos (*Block Diagram*) na qual ocorre o processamento dos dados e informações introduzidas pelo usuário mediante utilização das VI, funções e estruturas de programação convencionais como laços de repetição ou laços condicionais, o resultado deste processamento poderá ter diversos destinos: apresentar o resultado nos dispositivos de saída localizados no Painel Frontal, ser armazenado em um ficheiro ou ainda ser direcionado para o controlo de algum dispositivo físico conectado ao computador pessoal. Na figura 4.1 é

possível observar o aspeto das interfaces Painel Frontal e Diagrama de Blocos do LabVIEW<sup>®</sup>, na qual é possível perceber claramente a correlação entre as partes.



**Figura 4.1 – Programa LabVIEW<sup>®</sup>: O Painel Frontal é apresentado em (a) e o Diagrama de blocos é apresentado em (b).**

O conceito por de trás do LabVIEW<sup>®</sup> é o conceito de Instrumentação Virtual, inclusive o seu nome é o acrónimo para *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench* ou Bancada de Engenharia de Instrumentos Virtuais de Laboratório. Um instrumento virtual é composto por um computador equipado com placas plug-in e drivers que juntos vão desempenhar as funções de instrumentos tradicionais, por exemplo osciloscópios, geradores de sinais ou voltímetros. Acontece que como a instrumentação é baseada em software, o usuário poderá utilizar e customizar aquilo que ele realmente necessita, evitando-se algumas vezes de proceder com a aquisição de onerosos equipamentos que podem não ser utilizados em sua plenitude. Desta maneira o LabVIEW<sup>®</sup> é uma excelente opção pois permite:

- Operar o programa de instrumentação;
- Controlar o hardware selecionado;
- Analisar os dados adquiridos. E,
- Exibir resultados.

Em resumo, o LabVIEW<sup>®</sup> é uma poderosa ferramenta para engenheiros e projetistas desenvolverem soluções customizada de maneira económica [45].

## 4.2. Solução desenvolvida em LabVIEW®

A aplicação desenvolvida em LabVIEW® é responsável por efetuar a leitura e o processamento dos dados amostrados por intermédio do microcontrolador e apresentar essa informação ao usuário do banco de ensaio de potência, possui também a função de ajuste da carga desejada do travão de histerese e velocidade do motor e também possibilitar a gravação de resultados em um ficheiro Excel. No painel frontal utiliza-se uma estrutura de três separadores com funções específicas, o primeiro deles é denominado por “Início” e contém um conjunto de tarefas destinadas ao arranque da execução dos testes. O segundo separador denominado “Ensaio Manuais”, como o próprio nome diz, é destinado a realização de ensaios manuais e respetivo registo de resultados. O último separador destina-se ao controlo da realização de ensaios automáticos e é denominado “Ensaio Automáticos”. Cada um destes separadores realizam um conjunto específico de tarefas, às vezes com recurso a ferramentas existentes na IDE do LabVIEW® e outras vezes mediante recurso a VI's desenvolvidas especificamente para uma tarefa requerida.

### 4.2.1. Separador “Início”

Neste separador o operador deverá inserir algumas informações básicas a respeito do motor sob ensaio, notadamente tensão nominal, velocidade máxima e por uma questão de adequação ao motor utilizado para os testes e ensaios do projeto desenvolvido existem dois campos específicos, “Constante de Velocidade” e “Constante de Binário” cujo valores permitem estimar a velocidade do motor em relação a tensão aplicada e o binário desenvolvido mediante corrente elétrica. Neste separador também é possível selecionar a execução de ensaios nos modos automático ou manual, selecionar o local de gravação do ficheiro de resultados e por fim há uma área dedicada a seleção da porta série a ser utilizada na comunicação com o microcontrolador e proceder com a realização do *Handshake* para início de troca de dados entre o software de controlo e o microcontrolador. Na figura 4.2 é possível observar o aspeto deste separador.

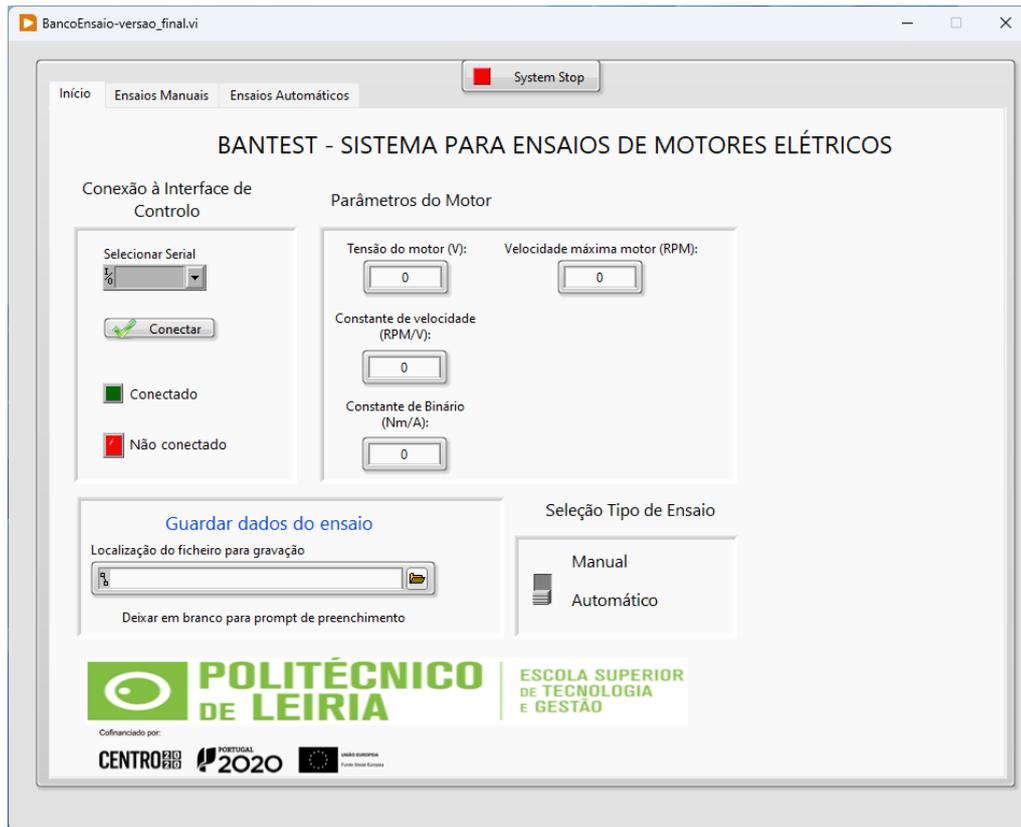


Figura 4.2 – Separador “Início” do painel frontal da aplicação.

Em seguida apresentam-se alguns aspetos do Diagrama de Blocos do separador “Início”, observa-se que no arranque da aplicação os valores das variáveis são reiniciados e o controlo do travão e controlo são ajustados para valor zero, depois os parâmetros inseridos pelo operador são atribuídos as variáveis globais utilizadas no programa e consoante as seleções de ensaio manual ou automático o programa habilitará ou não os respetivos botões de controlo nos separadores correspondentes, por fim há a VI desenvolvida para a execução do *Handshake* que encontra-se representada na figura 4.4. O processo de *Handshake* é rudimentar porém funcional, o programa envia uma chave para o microcontrolador e havendo sucesso no estabelecimento do link o microcontrolador enviará a resposta, e se a mensagem recebida for aquela aguardada pelo programa o processo é concluído e há uma sinalização no separador informando o usuário.

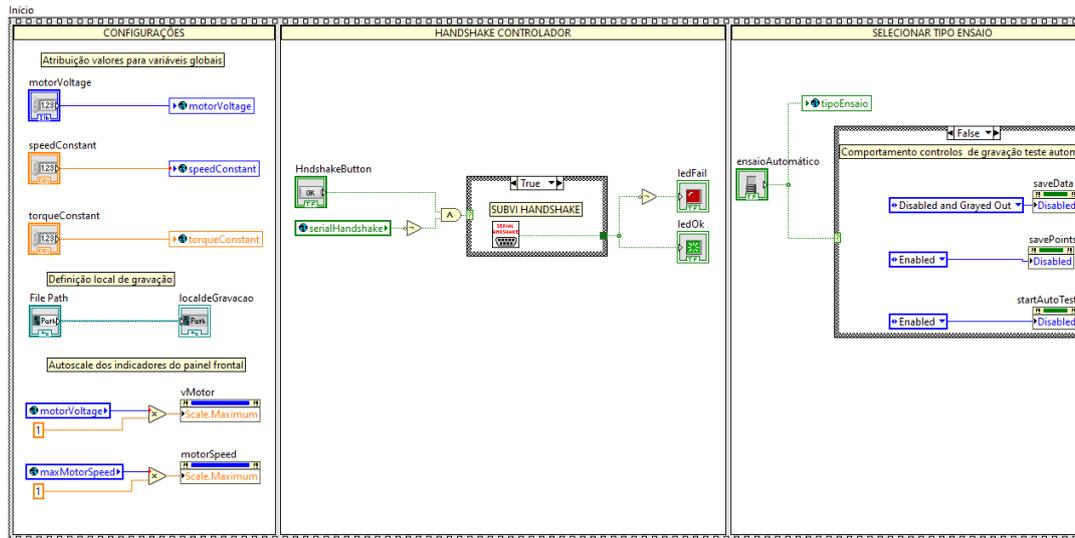


Figura 4.3 - Representação parcial diagrama de blocos do separador “Início”.

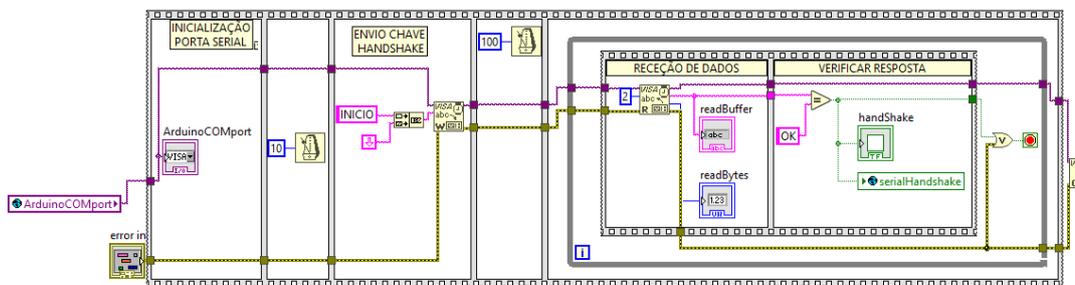


Figura 4.4 - Função *Handshake*.

#### 4.2.2. Separador “Ensaio Manuais”

Neste separador é possível realizar os ensaios manuais do motor. A interface é dividida em quatro áreas funcionais, na primeira é possível controlar a velocidade do motor com os indicadores de grandezas relativas ao motor, tensão aplicada, corrente circulante, potência absorvida da rede elétrica e alguns parâmetros estimados pelas constantes características do motor, notadamente binário e velocidade estimada. Outra área diz respeito ao controle do travão de histerese, na qual é possível determinar o nível de travagem desejado, verificar sua velocidade rotacional e o binário efetivamente consumido. A terceira área é dedicada a célula de carga, há um display para indicar a força aplicada e um botão para efetuar a aferição da célula de carga, ao carregar no botão de calibrar o valor amostrado pela célula de carga será subtraído por ocasião do cálculo da força aplica a célula de carga, observar que o valor repassado pelo microprocessador diz respeito a força percebida pela célula de carga, ou seja,

a conversão de tensão de saída em magnitude de força é realizada no microprocessador. A última área envolve dois botões, um deles é responsável por iniciar o processo de aquisição de dados do microcontrolador e o outro botão procede com a gravação do ponto de ensaio no ficheiro de saída. No ficheiro são registados os seguintes dados:

- Ajuste de velocidade do motor;
- Ajuste de carga do travão;
- Força aplicada a célula de carga (valor calibrado);
- Velocidade rotacional do travão de histerese;
- Tensão aplicada ao motor;
- Corrente consumida pelo motor;
- Potência elétrica absorvida pelo motor;
- Velocidade estimada do motor;
- Valor estimado do binário produzido pelo motor;

Na figura 4.5 é possível observar o aspeto do separado “Ensaio Manuais” com as respetivas áreas descritas anteriormente. Na janela de diagrama de blocos é possível constatar a utilização de diferentes estruturas para conseguir realizar as operações idealizadas, notadamente a criação de VI's para ler e escrever dados na porta série, calcular valores e calcular os valores a serem repassados para ajuste de carga do travão e velocidade do motor. No que diz respeito ao ajuste do travão e velocidade do motor, a escrita destes valores no microprocessador só é realizada caso ocorra alguma alteração do valor ajustado pelo operador, essa foi uma solução pensada para otimizar a troca de informações entre LabVIEW® e microprocessador. Apresenta-se as funções que foram desenvolvidas e utilizadas neste separador:

**Calc\_sMotor\_e\_cTravao.vi:** Essa função realiza o cálculo do valor a ser repassado para o microprocessador realizar o ajuste de carga do travão e velocidade do motor. Os controlos implementados no painel frontal permitem o ajuste de 0 a 100 %, a função realiza a leitura deste ajuste e multiplica por um fator relacionado a resolução do conversor DAC para ajuste do travão e em relação a velocidade do motor o fator de multiplicação tem em consideração a resolução do potenciômetro digital, coincidentemente ambos possuem uma resolução de 8 bits, logo o fator de multiplicação é igual para as duas variáveis. O resultado é concatenado com um carácter que habilitará a atualização dos valores dos atuadores pelo microcontrolador e é salvo em uma *string* para transmissão pela porta série. Ver figura 4.6.

**sendDatatoSerial.vi:** Essa função é responsável pela transmissão da string para o microcontrolador pela interface série. Ver figura 4.7.

**readDatafromSerial.vi:** Essa função é responsável por proceder a aquisição de dados amostrados pelo microcontrolador e escrever os valores obtidos nas respectivas variáveis globais que serão utilizadas para cálculos e indicações pelo programa. A função tem início com a configuração da porta série e a seguir envia um caracter responsável por estimular a transmissão de dados pelo microcontrolador, ao receber os dados a função efetua a leitura e atualiza os valores das variáveis relacionadas a célula de carga, corrente do motor, tensão aplicada ao motor e velocidade rotacional do travão de histerese. Ver figura 4.8.

**calculaVariaveis.vi:** Essa função é responsável por efetuar a atualização das variáveis que necessitam de algum cálculo para ser atualizada e posteriormente utilizada no programa. Ver figura 4.9.

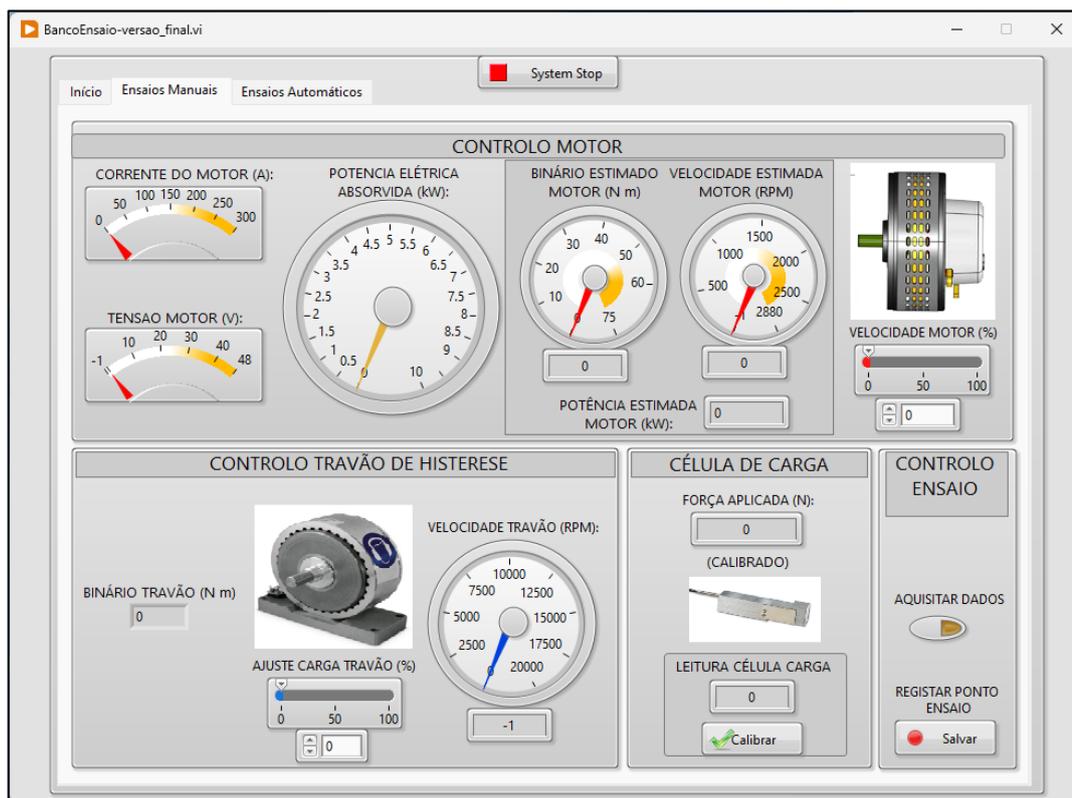


Figura 4.5 - Separador “Ensaio Manuais”.

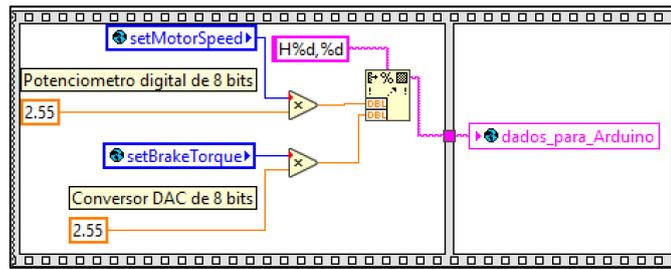


Figura 4.6 - Função para atualização dos valores dos atuadores.

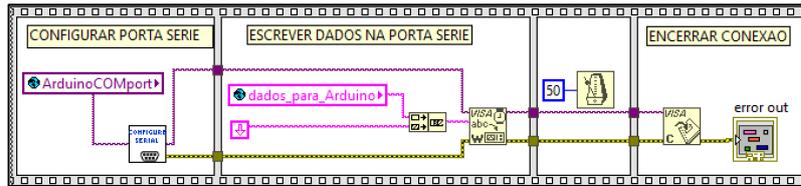


Figura 4.7 - Função para envio de dados para o microcontrolador.

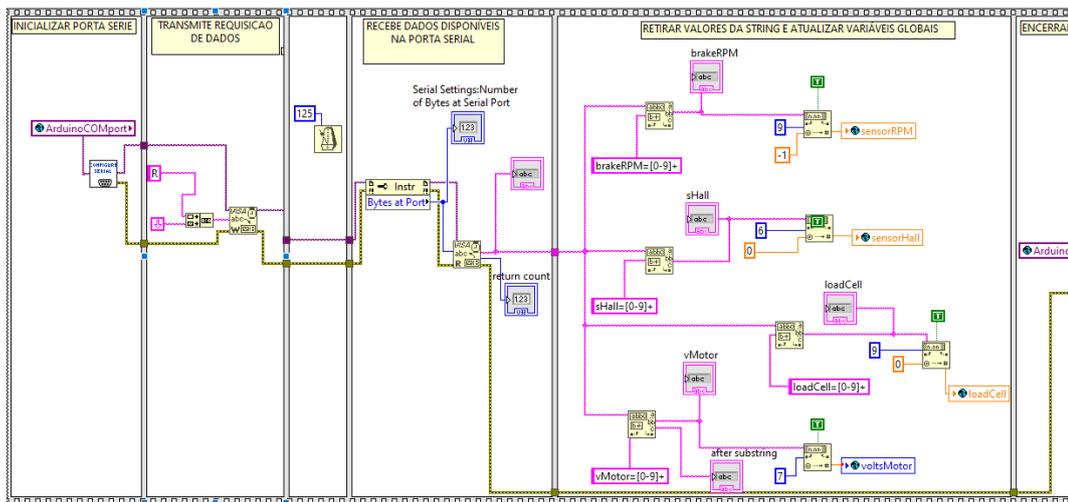


Figura 4.8 - Função que efetua a leitura dos dados amostrados pelo microprocessador.

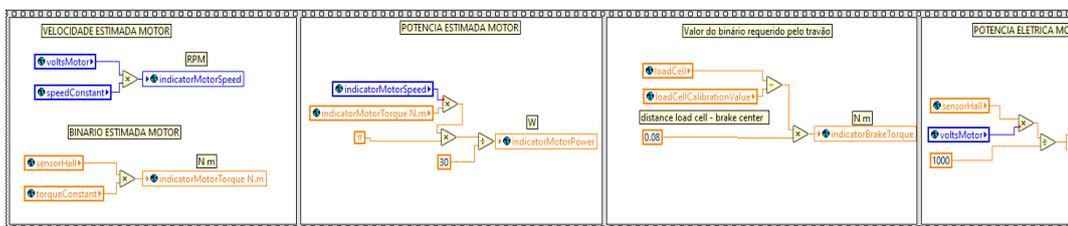


Figura 4.9 - Função para cálculo de variáveis.

### 4.2.3. Separador “Ensaio Automáticos”

O terceiro e último separador diz respeito ao ambiente para a realização de ensaios automático e plotagem das curvas de potência e binário. O usuário deverá informar quantos pontos de teste serão realizados, indicando a velocidade desejada do motor, qual a carga a ser aplicada e por quanto tempo deverá manter as condições informadas. Após preenchimento da grelha com essas informações, deverá carregar em um botão para gerar um vetor com os pontos de ensaio. De seguida o usuário carrega em um botão para iniciar o ensaio e ao terminá-lo o software sinaliza através de um indicador de “teste concluído”, executa a plotagem de um gráfico com as curvas de potência e binário, além da gravação de um ficheiro com informações iguais àquelas descritas para a realização de ensaios manuais. Na figura 4.10 é possível observar o aspeto do separador “Ensaio Automáticos”.

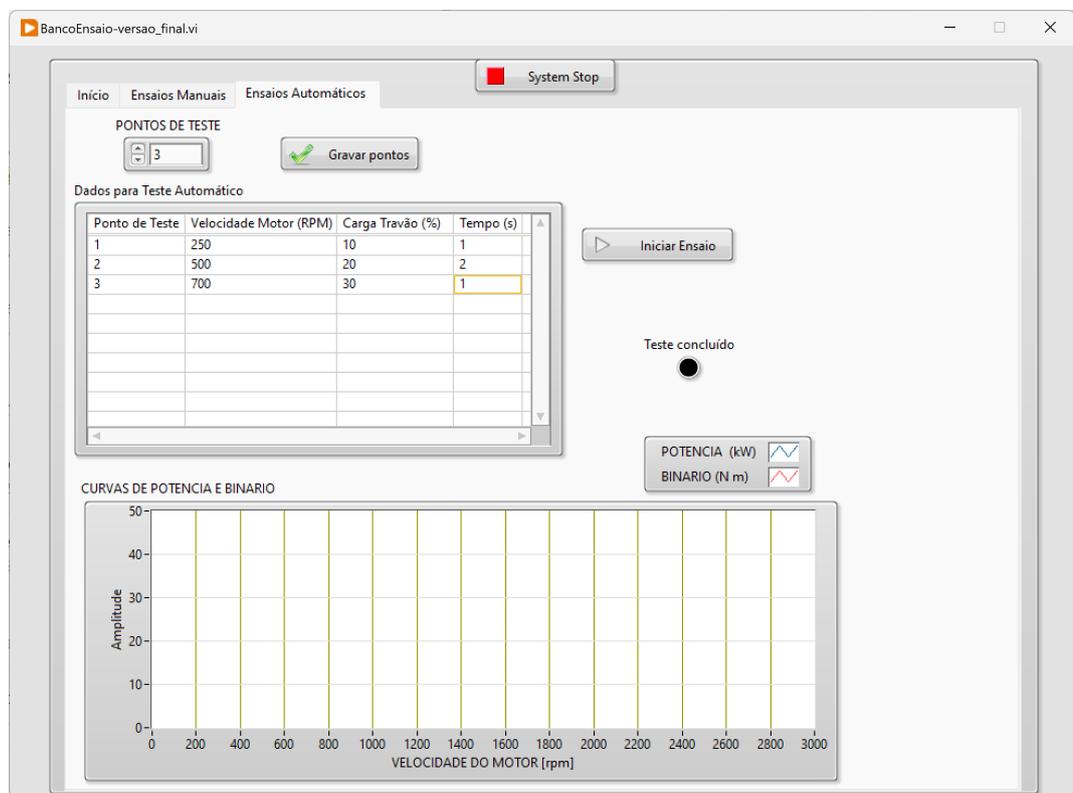


Figura 4.10 – Separador para a realização de ensaios automáticos.

O desenvolvimento do diagrama de blocos para a realização de ensaios automáticos demandou um pouco mais de esforço, ainda que foram reaproveitados os VI’s de leitura e escrita de dados na porta série. Parte do desenvolvimento focou-se na conversão da grelha de dados em um vetor para ser transmitido para o microcontrolador com recurso de estrutura voltada ao gerenciamento de eventos, notadamente o evento de carregar em um botão,

consultar figura 4.11. Após a conversão dos dados a próxima etapa consiste no envio dos pontos de teste e leitura dos dados amostrados pelo microcontrolador. Novamente, a estrutura de gerenciamento de eventos mostrou-se adequada para a tarefa e conclui-se as funcionalidades deste separador com as etapas de gravação dos dados em um ficheiro e o traçado dos gráficos após os cálculos necessários.

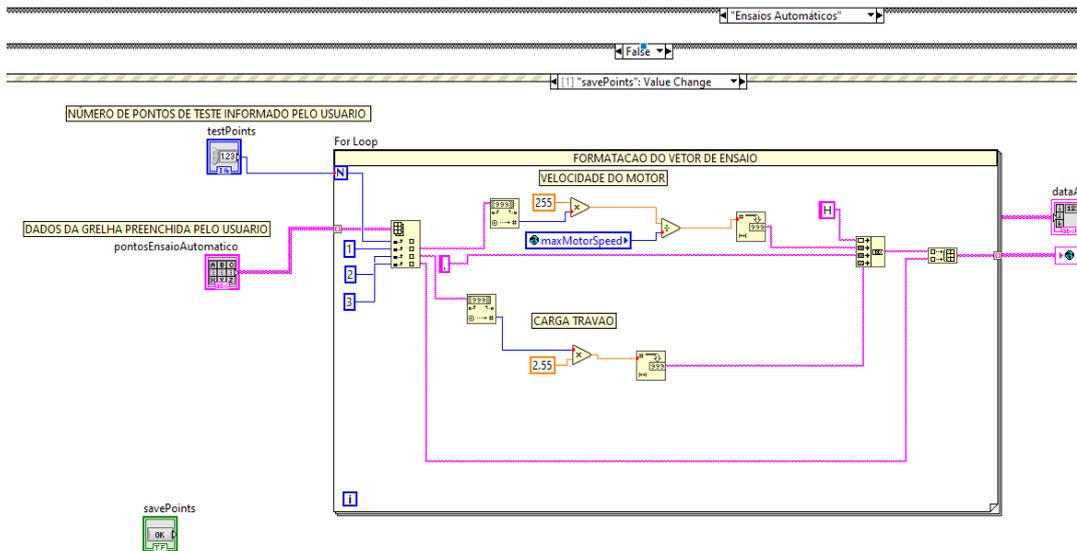


Figura 4.11 - Rotina para criação dos pontos de teste automático.

### 4.3. Sumário

O presente capítulo buscou descrever a ferramenta utilizada para o desenvolvimento da aplicação de controlo do banco de ensaio de potência, notadamente o software de programação gráfica LabVIEW<sup>®</sup>, desenvolvido pela National Instruments. O software desenvolvido possui três separadores em sua interface com o usuário, a saber:

- **Separador Início:** destinada a inserção de dados referentes ao motor sob ensaio e também os controlos necessários para o estabelecimento da comunicação com o microcontrolador;
- **Ensaio manual:** Interface destinada a realização de ensaios de maneira manual, o usuário define a velocidade e a carga desejada e o sistema realiza a leitura dos dados amostrados pelo microcontrolador. É facultado ao operador o registo dos pontos de teste;

- **Ensaio automático:** Nesta tela o usuário deverá informar quantos pontos de ensaio são pretendidos de se ensaiar e de seguida inserir informações relativas a velocidade, carga e tempo de teste para o ponto definido. O sistema realiza a gravação dos dados de ensaio e também realiza o traçado dos gráficos de potência e binário para os pontos de teste.

#### 4.4. Conclusão

Neste capítulo foi possível constatar quão versátil e poderosa é a programação em LabVIEW, abordou-se a criação de um software para a realização dos ensaios de motores elétricos de maneira manual e automática, além da gravação de ficheiros e traçado de gráficos. Há de se concluir que com o desenvolvimento desta aplicação atende-se o objetivo intermédio 3, relativo ao desenvolvimento de um sistema de controlo para o banco de ensaio de potência.

**Tabela 4.1 – Objetivo intermédio concluído.**

OBJETIVO 3	Desenvolver de um sistema de automatização e controlo baseado em LabVIEW®.
------------	--

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 5. Implementação prática e testes para validação

Destina-se o presente capítulo a descrever o conjunto de ações adotadas para efetuar a montagem do banco de ensaio de potência, a realização de ensaios e testes para afinação do sistema e posterior discussão dos resultados obtidos. Procedeu-se com a montagem física dos elementos constituintes do banco, efetuar a interconexão elétrica e realizar testes de funcionamento dos diversos dispositivos. Ensaiar os dispositivos que atuam no controlo do travão de histerese e no controlo do motor e, por fim, verificar a funcionalidade do software de controlo no que diz respeito ao controle e aquisição de dados do microcontrolador.

### 5.1. Montagem mecânica do banco de ensaio

A montagem do banco de potência foi realizada utilizando-se uma estrutura de perfis de alumínio que suportam o motor sob ensaio, o travão de histerese montado sobre uma base metálica conjuntamente com a célula de carga e demais componentes tais como sensor de rotações, controladores do motor e travão e fonte de tensão. A solução permite a montagem do travão sob o motor ao se utilizar uma polia motora de menores dimensões, tornando a estrutura como um todo mais compacta e ao se utilizar uma polia de maior dimensão há a flexibilidade de montar o travão de histerese lateralmente ao motor sob ensaio. Essa estrutura mostrou-se compacta e suficientemente rija para o fim a qual se destina. Nas figuras 5.1 e 5.2 é possível observar as diferentes formas de posicionar o travão de histerese conforme descrito. E na figura 5.3 apresenta-se o posicionamento de alguns elementos do banco de ensaios pela estrutura.



Figura 5.1 – Posicionamento do travão lateralmente ao motor.

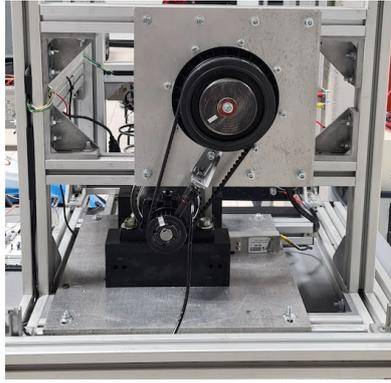


Figura 5.2 – Posicionamento do travão sob o motor.

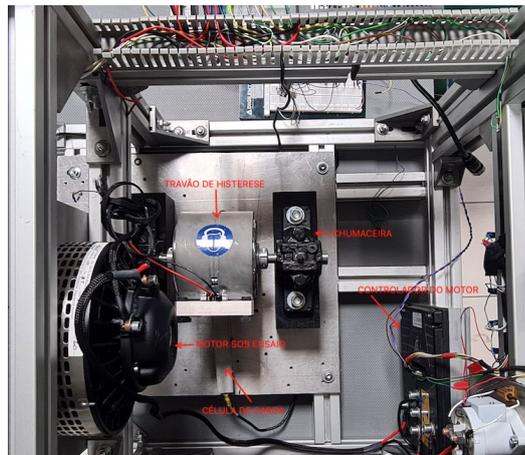


Figura 5.3 – Posicionamento de alguns componentes na estrutura.

## 5.2. Ensaios propostos

Para verificação do correto funcionamento do banco de ensaio propõe-se a realização de diversos ensaios, dentre eles:

- Teste de comunicação CAN entre o microcontrolador e o controlador do motor;
- Leitura de valores obtidos pelo protocolo CAN através do software de controlo, certificando-se da comunicação PC – microcontrolador – controlador do motor;
- Aquisição de dados do sensor de rotações pelo microcontrolador;
- Leitura de valores obtidos pelo sensor de rotações pelo software de controlo;
- Medição da variação de tensão de controlo do travão de histerese, ajustada pelo microcontrolador;
- Medição da variação de tensão de controlo do travão de histerese, ajustada pelo software de controlo;
- Variação do ajuste do potenciómetro digital utilizando o microcontrolador;

- Variação do ajuste do potenciômetro digital utilizando o software de controlo;
- Verificar a variação de tensão de saída da célula de carga com um voltímetro;
- Verificar a variação de tensão de saída da célula de carga amostrada pelo microcontrolador;
- Verificar a variação de tensão de saída da célula de carga obtida pelo software de controlo;
- Amostrar os valores obtidos pelo sensor Hall e ajustar calibração no software de controlo;
- Verificar funcionalidades de gravação de pontos de ensaio manual pelo software de controlo;
- Verificar a realização de ensaios automáticos pelo software de controlo.

A realização destes ensaios permitirá certificar que os diversos componentes do banco de ensaio trocam informações corretamente entre si e que os dispositivos de controlo realizam corretamente aquilo que se espera. Nas seções seguintes apresenta-se algumas informações acerca de a realização destes ensaios.

### **5.3. Ensaio de comunicação**

A realização do ensaio de comunicação focou no estabelecimento da troca de informações entre o programa de controlo, microcontrolador e controlador do motor. Parte-se da hipótese de que no estabelecimento satisfatório da comunicação e consequente aquisição de dados disponibilizados pelo controlador do motor ao microcontrolador a comunicação sobre os protocolos CAN e SPI estão ativas. Ao se executar o software de controlo e realizar o processo de *handshake* com sucesso, assume-se que a comunicação PC – microcontrolador através do protocolo UART é realizada satisfatoriamente. O mesmo pode ser dito a respeito da variação do ajuste de velocidade do motor, ajuste de carga do travão e leitura dos valores da célula de carga, sensor Hall e sensor de rotações, assume-se que todas as interfaces trocam informações entre si. De facto, foi possível comunicar-se satisfatoriamente utilizando a interface UART, efetuou-se os testes com *baud rate* de 19 200 Kbps com a correta troca de informações entre o software de controlo e o microcontrolador, mediante utilização de um programa para monitoramento da interface UART e foi possível constatar a correta troca de informações entre os dispositivos.

Em relação a comunicação SPI a comunicação com o potenciômetro digital transcorreu normalmente, de maneira a permitir o correto ajustamento de diferentes valores, entretanto a comunicação com o *transceiver* CAN MCP2515 apresentou um comportamento intermitente a qual foi normalizada após substituição da unidade, com isso foi possível aquistar as informações transmitidas pelo controlador do motor.

A comunicação pela interface CAN é estabelecida a uma velocidade de 100 kbps entre o microcontrolador e o controlador do motor e há um procedimento implementado para o seu início. O controlador do motor utiliza o protocolo CAN para transmitir os dados relacionados ao funcionamento do sistema elétrico em um visor próprio as informações que representam estes dados encontram descritas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Campo de dados da mensagem CAN do controlador do motor, adaptado de [46].

<b>Nome do campo</b>	<b>Descrição</b>
<i>Field value</i>	Campo de dados
<i>Signed/Unsigned</i>	Sinalização do campo de dados
<i>Decimal point</i>	Posição do ponto decimal
<i>Field unit</i>	Unidade que acompanha campo de dados
<i>Bar graph</i>	Exibição campo de dados através de gráfico de barras
<i>BDI graph</i>	O valor de descarga da bateria

O controlador encontra-se programado para que o campo de dados represente a velocidade do motor utilizando a grandeza V%, o valor em percentual da tensão nominal que é aplicada ao motor. Decodificando-se a mensagem CAN é possível extrair essa informação de modo a obter este valor. Nas figuras, 5.4, 5.5 e 5.6 é possível observar o ensaio para obtenção deste valor, a comparação do valor obtido pelo microcontrolador e aquele medido por intermédio de um multímetro e finalmente a representação deste valor na tela do software de controlo. Na figura 5.7 é possível observar a medição da velocidade rotacional do motor com um taquímetro, observa-se boa aproximação com o valor estimado da velocidade rotacional do motor representado pelo mostrador analógico da figura 5.6 e a utilizar a constante de velocidade informada pelo fabricante do motor a qual possui um valor de 60 rpm/V.

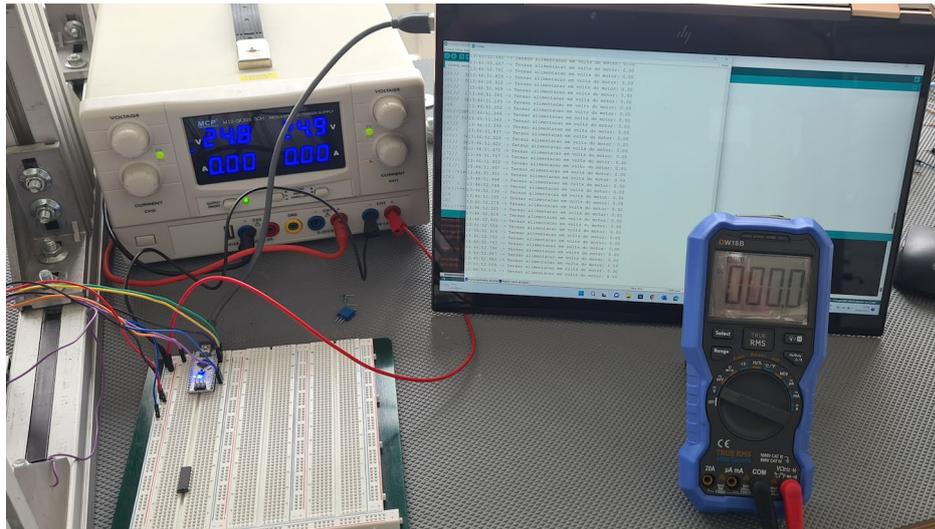


Figura 5.4 – Arranjo para verificação da tensão obtida por protocolo CAN.

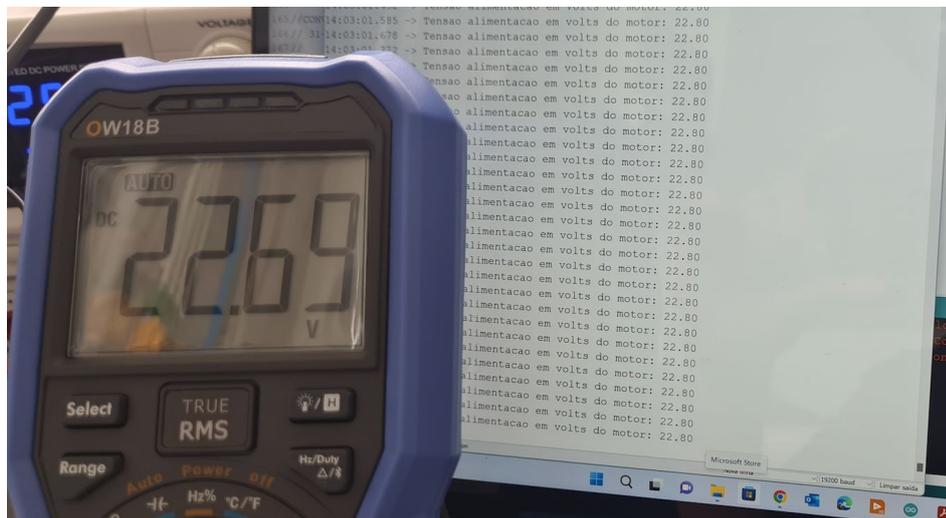


Figura 5.5 – Comparação entre valor medido com multímetro e valor informado por protocolo CAN.

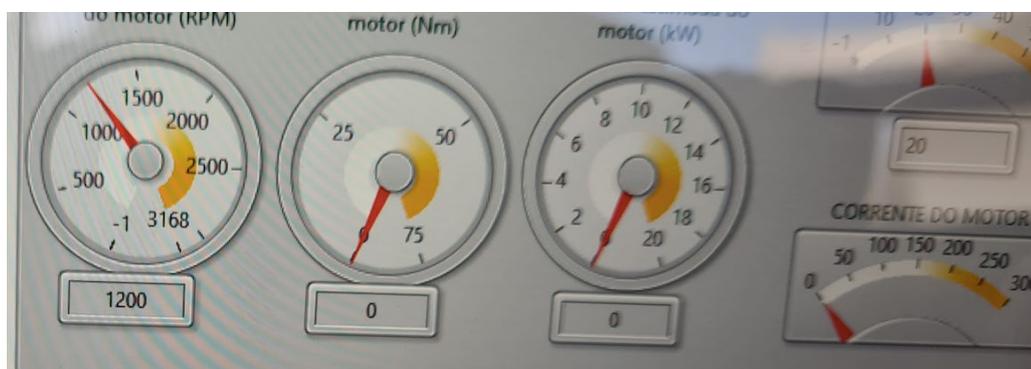


Figura 5.6 – No canto superior esquerdo há o valor da tensão obtido pelo software de controlo e o mostrador analógico a esquerda representa a velocidade estimada do motor obtida mediante multiplicação da tensão pelo valor da constante de velocidade.



Figura 5.7 – Medição da velocidade rotacional do motor.

## 5.4. Implementação dos demais componentes do Banco de Ensaio

Visto que o potenciômetro digital foi verificado por ocasião dos ensaios de comunicação, procede-se com a implementação dos demais componentes.

### 5.4.1. Controlador do travão de histerese VM-8

A intensidade de travagem exercida pelo travão de histerese é proporcional a uma tensão de 0 V (0% de travagem) a 10 V (100% de travagem) aplicada ao seu controlador, entretanto o microcontrolador fornece em seus portos de saída uma tensão de no máximo 5 V, valor que seria insuficiente para atingir um nível de travagem de 100%. Essa limitação foi contornada ao utilizar-se o amplificador interno que existe no controlador do travão cujo diagrama é apresentado na figura 5.8. Portanto o controlo do nível de travagem desejado é ajustado pela variação de uma saída PWM do microcontrolador de acordo com o nível de travagem desejado. Um aumento do nível de travagem corresponde a um maior o ciclo de trabalho da saída PWM, com conseqüente aumento da tensão média na saída PWM do microcontrolador. Novamente, observar que essa tensão é o sinal aplicado a entrada do amplificador do controlador do travão de histerese e após amplificação será utilizada como sinal de controlo do travão, conforme figura 5.8. Nas figuras 5.9 a 5.12 representa-se a variação do ciclo de trabalho da saída PWM, a representar o ajuste de carga do travão em 0%, 50%, 75% e 99%. Facilmente constata-se o aumento do período no qual a tensão de saída é mantida em nível alto.

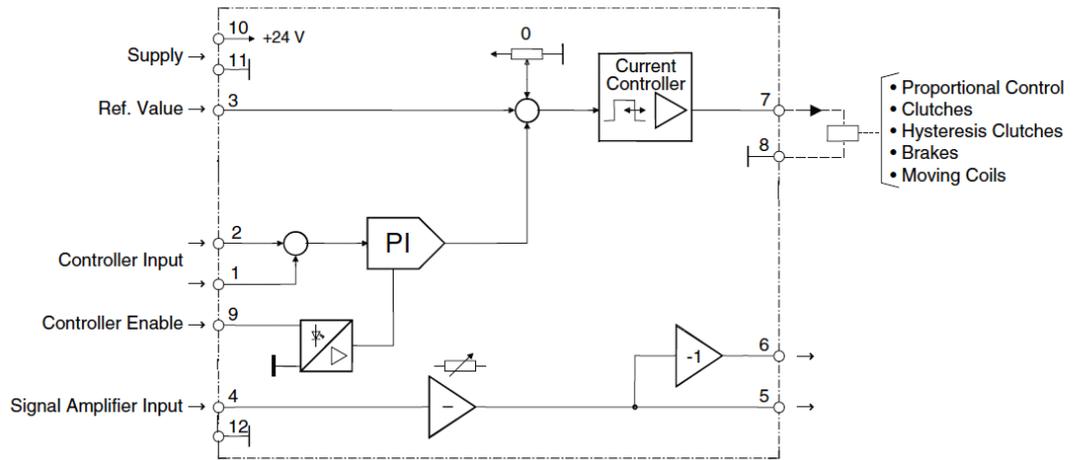


Figura 5.8 – Esquema funcional do controlador do travão de histerese, adaptado de [25].

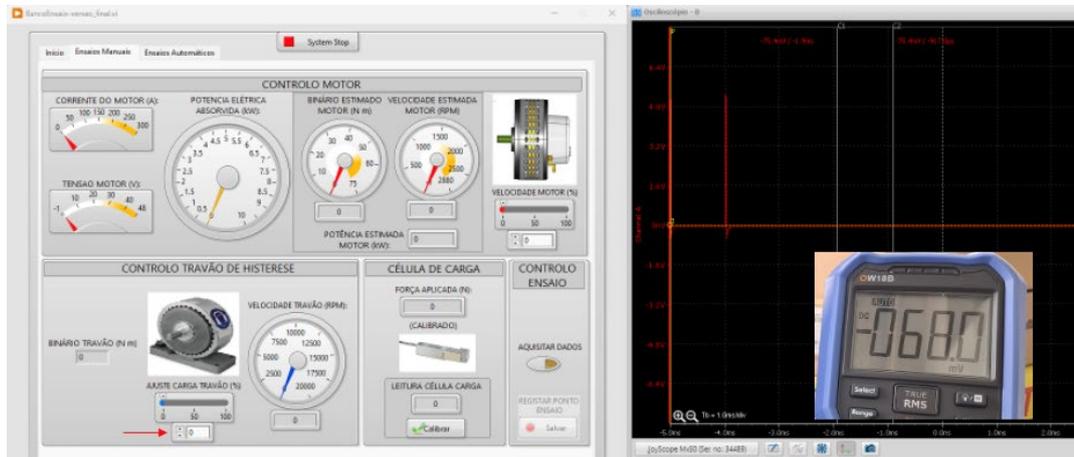


Figura 5.9 – Ajuste de carga do travão de histerese a 0%.

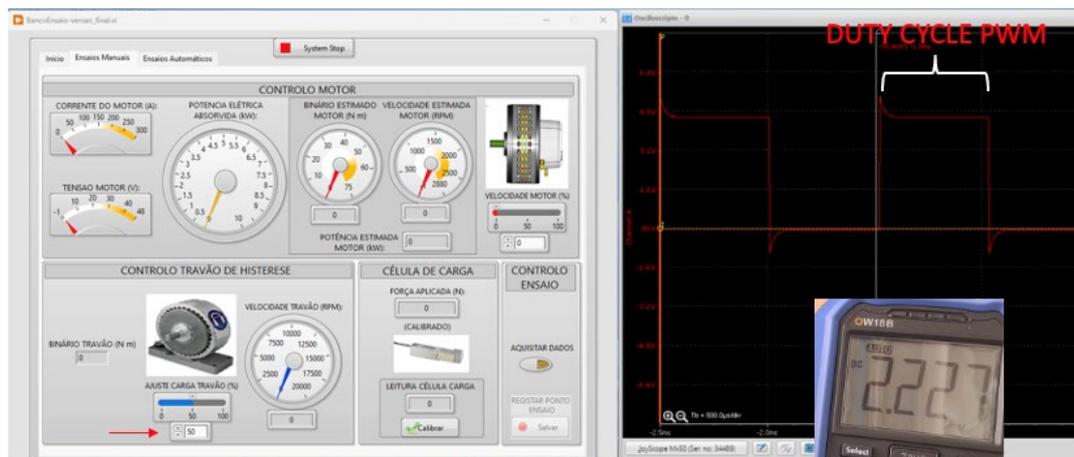


Figura 5.10 – Ajuste de carga do travão de histerese a 50%.

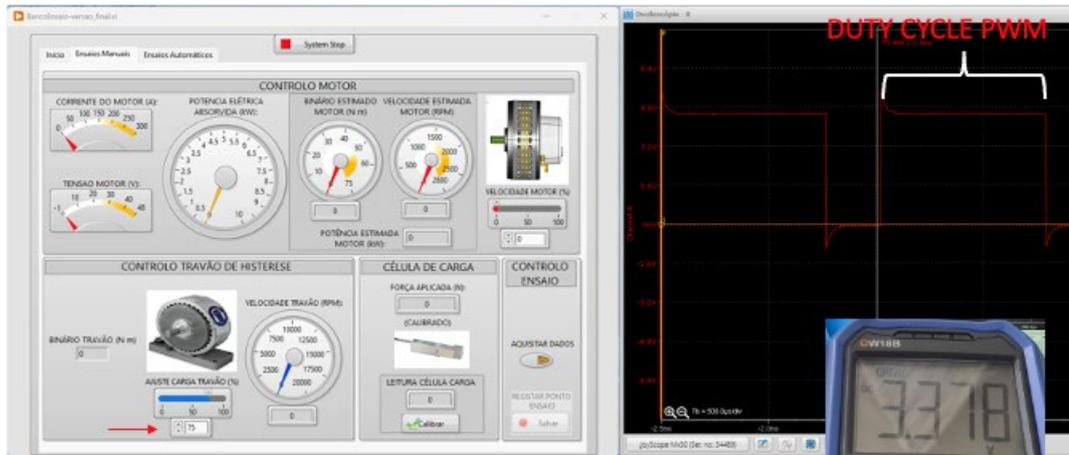


Figura 5.11 – Ajuste de carga do travão de histerese a 75%.

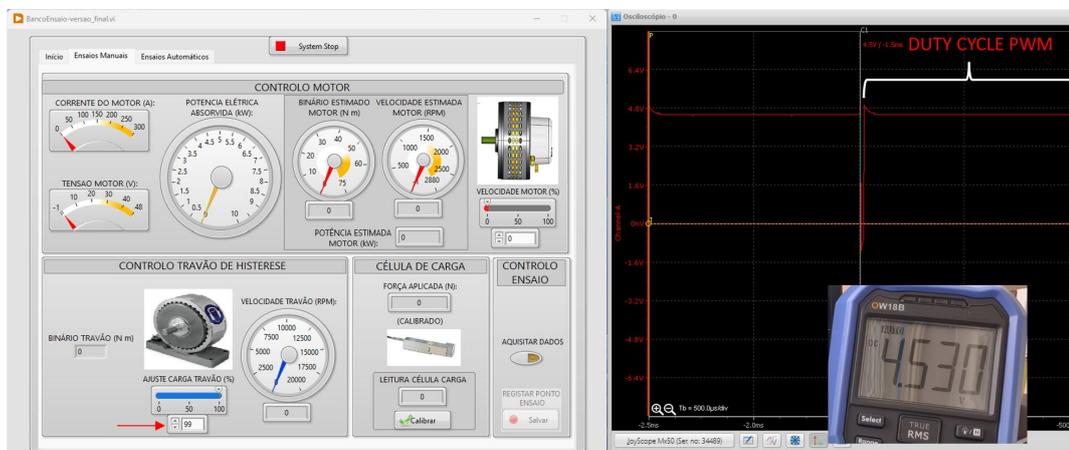


Figura 5.12 – Ajuste de carga do travão de histerese a 99%.

### 5.4.2. Célula de carga

A célula de carga LC509 é alimentada por uma tensão de 24 V e possui uma saída amplificada de 0,5 a 9,5 V, proporcional a carga aplicada de 0 a 45 kgf (0 a 441,30 N). Para proceder a leitura de sua saída utilizou-se uma porta analógica do microcontrolador e, para compatibilizar o nível de tensões, foi prevista a utilização de um divisor de tensão. Entretanto essa solução não se mostrou satisfatória e foi necessário implementar um circuito subtrator com recurso a um amplificador operacional. Nesta solução alternativa a saída do circuito subtrator foi ligada ao divisor de tensão e então ao microcontrolador. O amplificador utilizado foi o AD820 de fabricação Analog Devices, funciona com alimentação *single supply* em níveis compatíveis a alimentação da célula de carga. De seguida foi necessário calibrar a saída da célula de carga com os valores amostrados pelo microcontrolador, para tal fez-se uso de uma balança para determinar a massa de diferentes corpos a serem aplicados sobre a célula de carga e posterior verificação dos valores amostrados. Na tabela 5.2 apresenta-se o resultado destas medições e na figura 5.13 há a representação destes

resultados e respetiva função de transferência para utilização no microcontrolador de tal forma a converter o valor amostrado de tensão fornecida pela célula de carga em força. A determinação das massas utilizadas para aferição da célula de carga foi feita mediante utilização de uma balança e devido limitações da balança e de como aplicar a carga na célula de carga, utilizou-se uma carga máxima de 51,50 N, inferior a capacidade de medição da célula de carga. Assume-se que o comportamento da célula de carga seja linear e, portanto, os resultados obtidos com valores de pequena magnitude podem ser extrapolados para os valores que se aproximam da capacidade máxima de leitura da célula de carga. Na figura 5.14 representa-se a balança a determinação da massa de um corpo de prova.

Tabela 5.2 – Aferição célula de carga.

Massa (kg)	Peso (N)	Tensão Divisor de Tensão (mV)	Amostragem microcontrolador
Somente travão	---	---	133,300
0,795	7,802	0,653	140,400
1,028	10,080	0,685	140,530
2,244	22,010	0,750	153,730
3,002	29,450	0,784	160,650
5,249	51,496	0,945	192,900

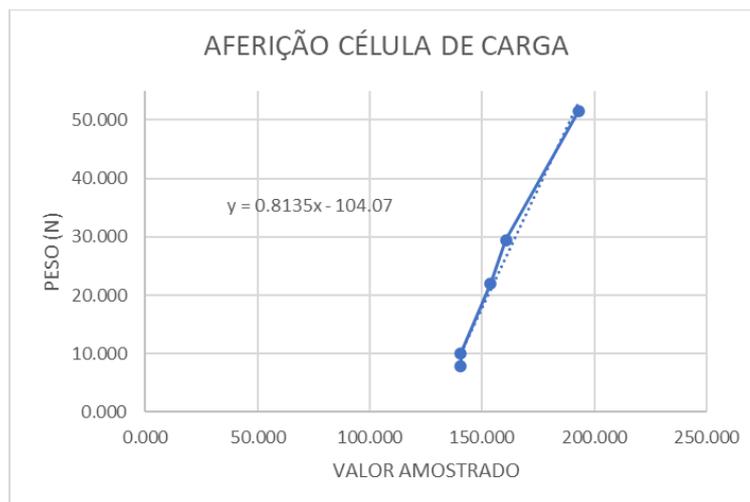


Figura 5.13 – Função transferência célula de carga.



Figura 5.14 – Determinação da massa de um corpo de prova.

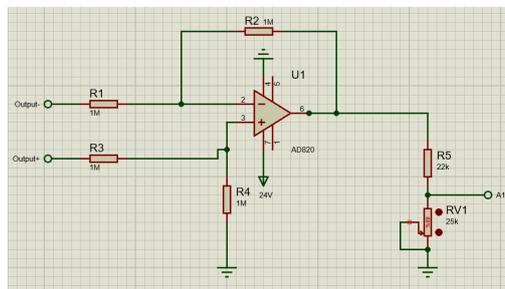


Figura 5.15 – Circuito implementado para amostragem do sinal da célula de carga.

### 5.4.3. Sensor de rotações

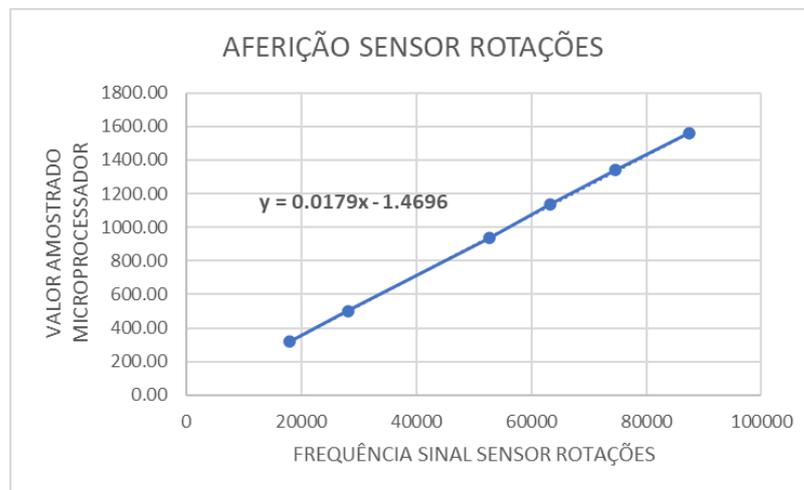
O sensor de rotações que é do tipo Hall, foi implementado próximo a polia montada ao travão de histerese, desse modo os “dentes” da polia servem para provocar a alteração do estado do sensor, ocasionando a medição de 30 pulsos – valor igual ao número de “dentes” da polia - para cada rotação completa da polia. Em uma primeira abordagem, as transições de estado do sensor foram detetadas por intermédio do recurso de interrupções no microcontrolador. Para um determinado intervalo de tempo conta-se os números de interrupções que houve e define-se a frequência do sinal. Essa solução quando testada sozinha mostrou-se eficaz, entretanto ao executá-la com outras tarefas, notadamente as tarefas que imprimem na porta série e utilizam o protocolo SPI, a leitura do sinal de rotação deixou de trabalhar. Ora, em função das tarefas de comunicação e impressão na porta série também fazerem uso de interrupções levou a uma situação de competição de recursos do processador que comprometeu a execução do código. A solução adotada foi a monitorização do tempo de transição do estado da porta a qual o sensor de rotações estava conectado com recurso a função `pulseIn()` o que também leva a temporização dos pulsos do sensor. De seguida adotou-se procedimento semelhante a aferição da célula de carga. Foram efetuadas medições com

recurso a um osciloscópio, verificando as informações amostradas pelo microprocessador e definindo uma função de transferência que aproximava os valores amostrados às rotações efetivamente medidas pelo osciloscópio de forma a possibilitar que o microprocessador repasse para o programa de controle a velocidade rotacional do travão de histerese. Na tabela 5.3 e nas figuras 5.16 a 5.19 é possível observar o explanado.

**Tabela 5.3 – Aferição do sensor de rotações.**

Velocidade mensurada da polia (rpm)	Velocidade amostrada da polia (rpm)	Frequência do sinal do sensor (Hz)	Valor amostrado microprocessador
323,93	318,60	159,30	17 900
507,41	503,20	251,60	28 150
946,85	936,80	468,40	52 700
1 136,59	1 136,40	568,20	63 300
1 338,86	1 339,40	669,70	74 600
1 569,77	1 560,60	780,30	87 500

Obs.: Velocidade da polia mensurada por tacómetro.



**Figura 5.16 – Função transferência sensor de rotações**

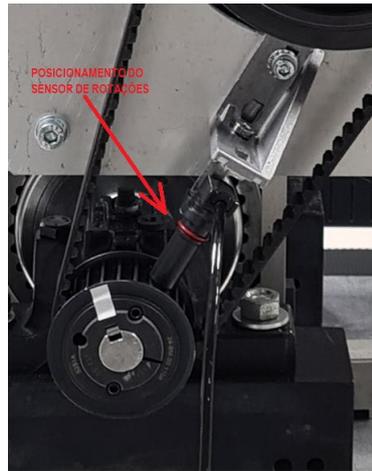


Figura 5.17 – Posição de montagem do sensor de rotações.

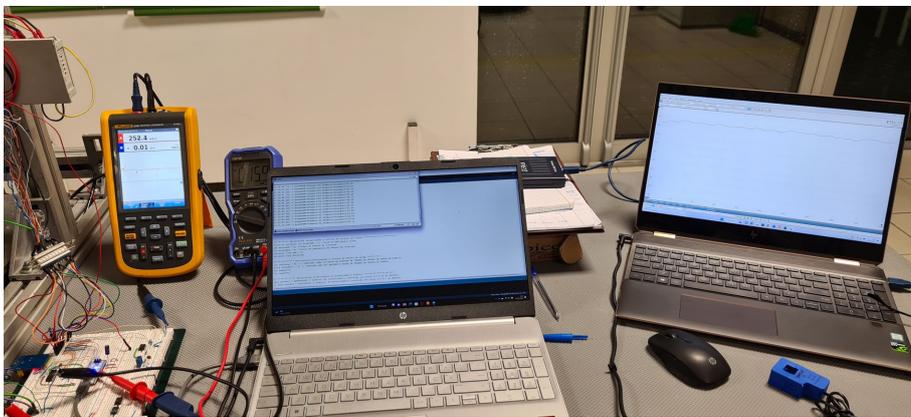


Figura 5.18 - Arranjo para ensaios no banco de potência.

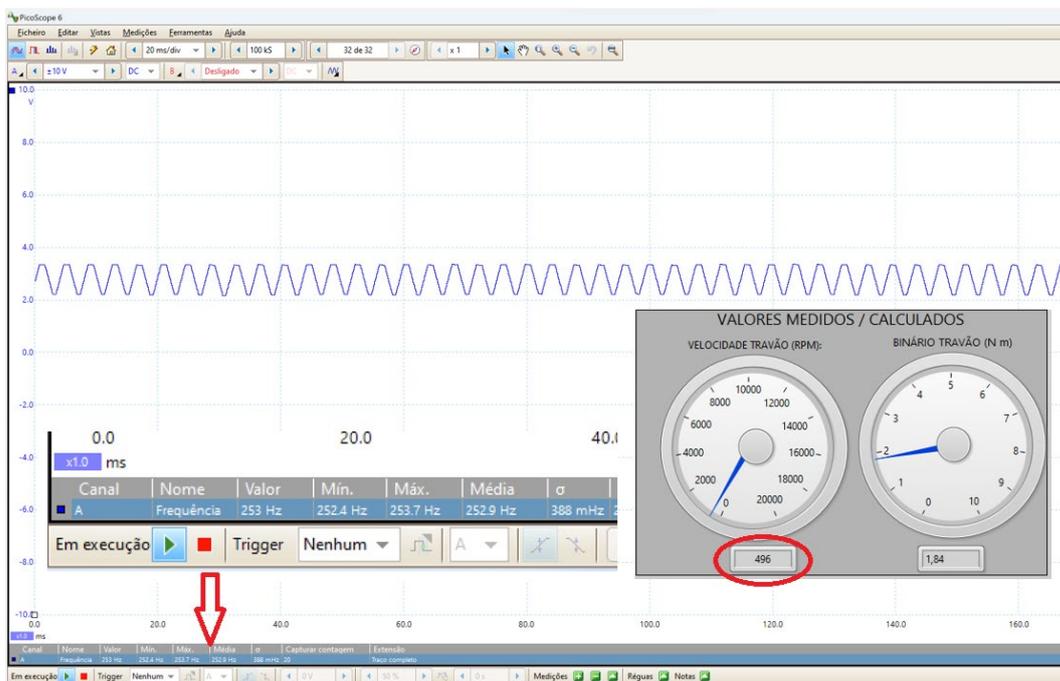


Figura 5.19 – Captura de tela do osciloscópio e valor de rotação reportado pelo programa de controle.

#### 5.4.4. Medição de corrente elétrica consumida pelo motor

Para a medição da corrente que circula pelo motor foi projetada a utilização de um sensor hall de fabricação Melexis, entretanto por ocasião da montagem do banco de ensaios e da respectiva PCB constatou-se que o seu funcionamento não era como o esperado, o aspecto da montagem desta PCB pode ser observado nas figuras 5.20. Face esse constrangimento, a opção adotada para solucionar a questão foi a utilização de uma resistência de pequeno valor, que é conhecida por shunt de corrente, associada com a utilização de um amplificador de instrumentação. A passagem da corrente de carga consumida pelo motor ocasiona uma queda de tensão na resistência shunt a qual é mensurada por intermédio de um amplificador de instrumentação que tem a função de compatibilizar a impedância de entrada e, como dito pelo próprio nome, amplificar essa pequena tensão diferencial para níveis que sejam compatíveis com o microcontrolador. A resistência shunt possui um valor ôhmico de  $0,75 \text{ m}\Omega$ , o que significa que para uma corrente de  $100 \text{ A}$  o valor da queda de tensão em seus terminais será de  $75 \text{ mV}$ . O amplificador de instrumentação utilizados foi o INA126, de fabricação Texas Instruments e com o circuito de amostragem do sinal conforme recomendado pelo fabricante, o qual é possível de ser observado na figura 5.22. O processo de amostragem dos valores de corrente pelo microprocessador seguiu o mesmo princípio dos demais sensores, efetuou-se a variação da corrente aplicada ao motor e procedeu-se com a leitura dos valores amostrados pelo microprocessador. Com os dados tabulados obtém-se a função de transferência relativa a leitura da corrente e implementa-se no microcontrolador para que seja repassado ao software de controle o valor correspondente a corrente que circula pelo circuito.

Este processo envolveu duas questões que merecem ser destacadas. Uma delas diz respeito a pinça amperimétrica utilizada para mensurar a corrente do motor, a mesma saturava para correntes acima de  $22 \text{ A}$ , inviabilizando a leitura de correntes de maior intensidade. Para contornar essa questão mediu-se com recurso a um miliohmímetro o valor exato da resistência shunt e conhecendo-se o valor da queda de tensão em seus terminais é possível calcular a corrente que circula com recurso a equação da Lei de Ohm. Outra questão diz respeito ao comportamento do amplificador de instrumentação para baixos valores de corrente. Para correntes de zero até aproximadamente  $20 \text{ A}$  o comportamento da saída do amplificador de instrumentação é contrária ao que se esperava. Observa-se que a sua saída se encontrava em valores próximos a tensão de alimentação e a medida que a queda de tensão na resistência shunt aumentava o mesmo vinha a diminuir. Conforme citado, acima de  $20 \text{ A}$

o comportamento torna-se condizente ao que se esperava, ou seja, a tensão de saída já é da ordem de milivolts e passa a aumentar consonante ao aumento da queda de tensão na resistência shunt. Face essa situação os valores utilizados para determinar a função de transferência do sensoriamento de corrente são aqueles correspondentes a uma corrente acima de 20 A, os valores medidos e amostrados encontram-se na tabela 5.4.



Figura 5.20 – Placa *Current Sensor* com detalhe a fixação do núcleo de ferrite.

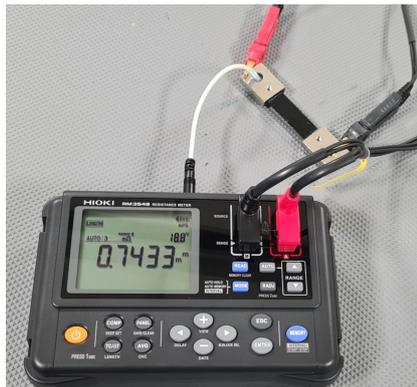


Figura 5.21 – Aferição do valor da resistência shunt.

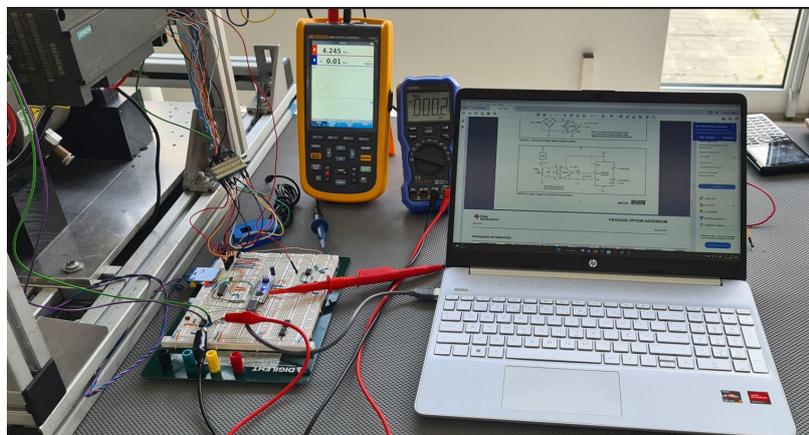


Figura 5.22 – Arranjo para aferição do valor de corrente.

Tabela 5.4 – Aferição shunt de corrente

Tensão shunt (mV)	Corrente Motor (A)	Tensão na saída do A.I. (V)	Valor amostrado microprocessador
7,70	10,36	3,783	795
10,30	13,86	3,764	791
11,70	15,74	2,900	610
14,10	18,97	0,301	63
15,60	20,99	0,252	53
17,40	23,41	0,287	60
21,00	28,25	0,398	84
27,10	36,46	0,578	122
27,90	37,54	0,617	130

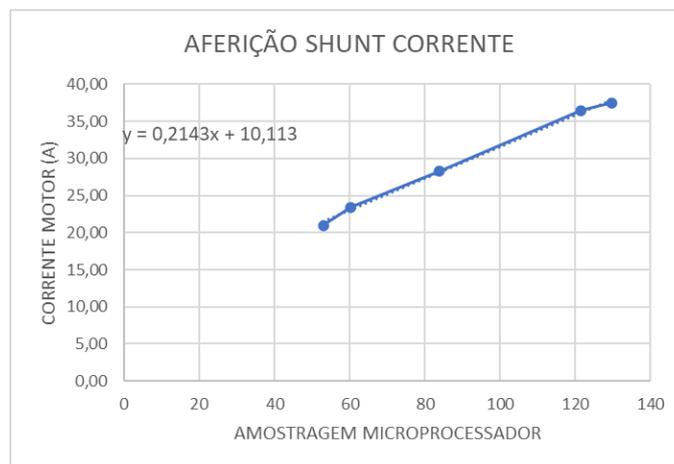


Figura 5.23- Função transferência shunt de corrente.

### 5.5. Análise dos resultados

É possível efetuar o controle da velocidade do motor e carga do travão pela interface software de controle – microcontrolador. O mesmo pode ser dito da aquisição dos valores pelo microcontrolador e repasse de dados para processamento no software de controle. Entretanto como não foi possível utilizar o sensor hall para medição da corrente consumida pelo motor e fez-se necessária a utilização de uma resistência shunt houve uma degradação

da qualidade do sinal amostrado pelo microcontrolador devido a presença de ruído proveniente do circuito de controlo do motor. Foi possível observar a variação dos sinais amostrados pelo microcontrolador e também com a utilização de osciloscópio pode-se confirmar tal situação o que contribuiu para trazer uma instabilidade ao funcionamento do sistema. Ainda assim o arranjo mostrou-se funcional possibilitando a execução de testes para verificar o comportamento do sistema. Para tal efetuou-se um teste com um nível de aceleração de aproximadamente 31,5% e variou-se a carga do travão de 19,6% até 60% e os resultados são apresentados na tabela 5.5 e figuras subsequentes. A ideia era assegurar a funcionalidade do sistema, utilizou-se uma fonte capaz de fornecer no máximo 240 W de potência ao operar em 48 V, condicionando a execução dos testes a baixos valores de potência. Ressalta-se ainda que o teste executado foi discreto, a medição ocorria em alguns pontos definidos e não mediante uma variação contínua de velocidade e carga. De posse destes dados procedeu-se com o cálculo das grandezas de interesse tais como potência fornecida pela fonte, potência consumida pelo motor, binário e potência dissipados pelo travão.

Tabela 5.5 – Dados ensaio sistema.

Aceleração: 31,5%	VALORES MEDIDOS				AMOSTRAGEM MICROPROCESSADOR		
	Tensão Fonte (V)	Corrente da Fonte (A)	Tensão aplicada ao motor (V)	Corrente Motor (A)	CORRENTE (A)	Velocidade Travão (rpm)	Célula de carga (N)
0	47,71	1,91	5,50	10,36	181	524	22,66
20	47,69	2,35	5,47	13,86	180	502	29,1
27	47,63	2,58	5,44	15,74	141	481	34,37
35	47,6	2,97	5,42	18,97	24	457	40,39
40	47,59	3,23	5,40	20,99	21	445	46,52
43	47,57	3,57	5,38	23,41	23	426	50,3
49	47,53	4,09	5,35	28,25	28	399	60,84
58	47,46	5,04	5,29	36,46	36	353	95,64
60	47,36	5,28	5,26	37,54	38	340	94,99

Ao se observar os dados da tabela 5.6 pode-se constatar a necessidade de implementação de um controlo em malha fechada da velocidade de rotação do motor, é notório o decréscimo de velocidade quando se exige maior potência. Nota-se também divergências entre os valores do binário estimado, calculado multiplicando-se a “Constante de Torque” e corrente fornecida, com o valor calculado. Aqui convém ressaltar que a fonte de divergência provavelmente origina-se no processo de obtenção da tensão aplicada ao motor, a qual neste ensaio foi obtida medindo-se a saída do controlador com um multímetro. Conclusão que se obtém ao comparar os valores relativos ao travão de histerese apresentados na tabela 5.7, é possível observar a aproximação dos valores estimados de binário com os valores consumidos pelo travão de histerese. Na tabela 5.8 é possível observar o rendimento estimado do conjunto controlador do motor, motor e transmissão. Esse valor foi obtido correlacionando a potência fornecida pela fonte de alimentação e aquela dissipada pelo travão de histerese.

Tabela 5.6 – Cálculos de grandezas relativas ao motor

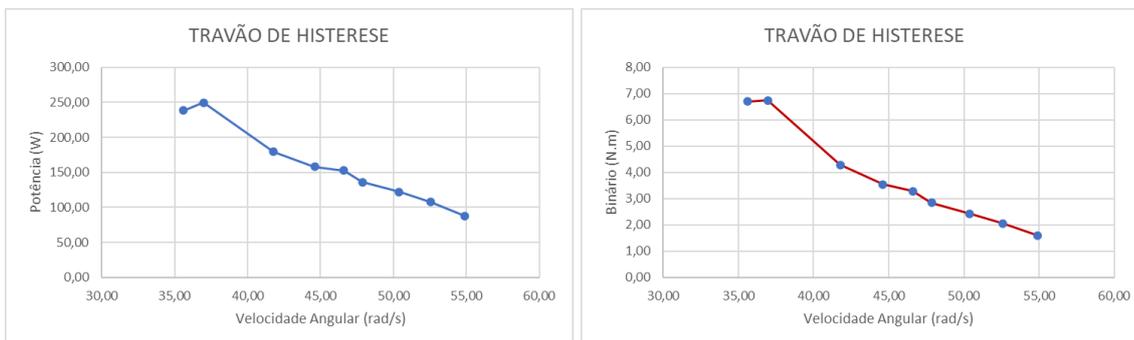
<b>Velocidade motor (rpm)</b>	<b>Vel. angular motor (rad/s)</b>	<b>Potência motor (W)</b>	<b>Binário estimado (Nm)</b>	<b>Binário calculado (Nm)</b>	<b>Erro (%)</b>
280,71	29,40	56,98	1,55	1,94	125%
268,93	28,16	75,80	2,08	2,69	129%
257,68	26,98	85,63	2,36	3,17	134%
244,82	25,64	102,81	2,85	4,01	141%
238,39	24,96	113,33	3,15	4,54	144%
228,21	23,90	125,94	3,51	5,27	150%
213,75	22,38	151,15	4,24	6,75	159%
189,11	19,80	192,87	5,47	9,74	178%
182,14	19,07	197,44	5,63	10,35	184%

**Tabela 5.7 – Dados referentes ao travão de histerese**

Sensor Hall (N)	Binário Travão (Nm)	Vel. angular travão (rad/s)	Potência travão (W)
22,66	1,60	54,87	87,66
29,10	2,05	52,57	107,85
34,37	2,42	50,37	122,05
40,39	2,85	47,86	136,27
46,52	3,28	46,60	152,83
50,3	3,55	44,61	158,19
60,84	4,29	41,78	179,22
95,64	6,74	36,97	249,25
94,99	6,70	35,60	238,44

**Tabela 5.8 – Rendimento conjunto Controlador + Motor + Travão**

Potência travão (W)	Potência fonte (W)	Rendimento (Controlador + Motor + Transmissão)
87,66	91,13	96%
107,85	112,07	96%
122,05	122,89	99%
136,27	141,37	96%
152,83	153,72	99%
158,19	169,82	93%
179,22	194,40	92%
249,25	239,20	104%
238,44	250,06	95%



**Figura 5.24 – Curvas de Potência e Binário do travão de histerese.**

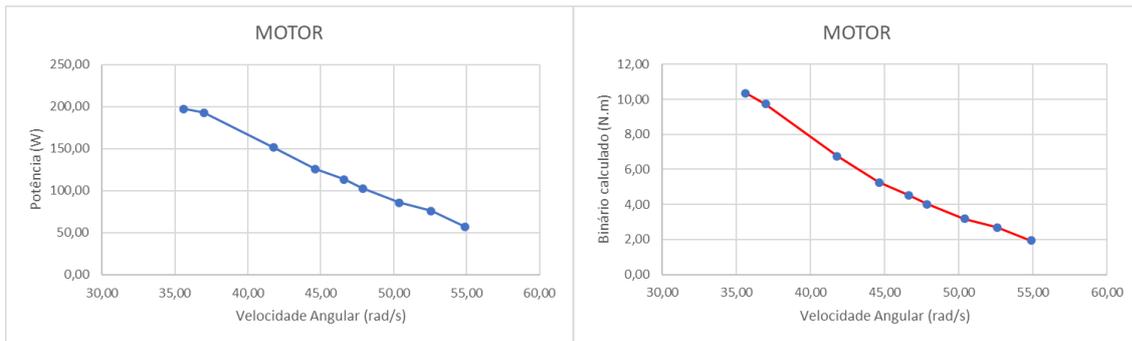


Figura 5.25 – Curvas de potência e binário do motor

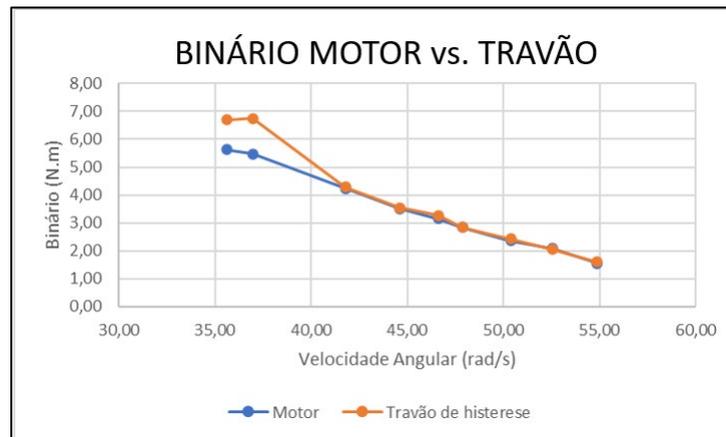


Figura 5.26 – Comparação estimativa do binário produzido pelo motor e binário consumido pelo travão.

Ao observar os gráficos apresentados nas figuras apresentadas 5.24 e 5.25 constata-se a necessidade de se implementar o controlo em malha fechada de velocidade do motor, foi assumido que o controlador do motor realizaria o ajuste da velocidade em função do nível de aceleração informado, entretanto não é o que ocorre.

Observa-se também a necessidade de melhorar a parte de instrumentação do banco de potências para minimizar a influência do ruído proveniente do controlador do motor. Entretanto em linha gerais o sistema mostrou ser capaz de adquirir informações e realizar o controlo manual de velocidade do motor e nível de travagem pretendido.

## 5.6. Sumário

O presente capítulo serviu para descrever os ensaios idealizados e implementados para a validação do projeto. Definiram-se uma série de atividades para testar e certifica-se do correto funcionamento de:

- Protocolos de comunicação;
- Controlador do motor;
- Travão de histerese;
- Célula de carga;
- Sensor Hall;
- Sensor de corrente;
- Software de controlo.

Verificou-se também algumas divergências com os valores calculados e os que eram esperados, mostrando a necessidade de se proceder com um maior refinamento no processo de aquisição de dados.

### **5.7. Conclusão**

Os ensaios realizados demonstram a viabilidade do projeto e a adequação da seleção de componentes mecânicos e eletroeletrônicos adotados para o desenvolvimento do banco de ensaio de potência, ainda que sejam necessários alguns ajustamentos no controlo de velocidade do motor e adicionar robustez ao sistema de aquisição de dados perante a questão do ingresso de ruído pelo controlador do motor. Verificou-se que individualmente existem pequenos desvios nos valores amostrado pelo sistema e há de se ter atenção e analisar corretamente como as grandezas relacionam-se para que o resultado obtido seja o mais fidedigno possível.

## 6. Conclusão

Este projeto teve por objetivo o desenvolvimento de um banco de ensaio de potência para motores elétricos. Com esse objetivo definido efetuou-se uma revisão bibliográfica buscando compreender o funcionamento dos bancos de ensaios de potência, quais os dispositivos utilizados para a simulação do carregamento imposto aos motores e quais as formas de se conectar o motor ao banco de ensaio e tipos de ensaios que são possíveis de ser realizados.

Decidido pelo desenvolvimento de um dinamómetro de motor, o próximo passo foi a seleção de componentes utilizados para a construção do banco, referindo-se aos principais pode-se citar o travão de histerese, a célula de carga, sensor de rotação, conjunto de chumaceiras e o sistema de acoplamento ao motor sob ensaio. Há de se registar que foi preciso efetuar a adequação do veio do travão de histerese que possuía algum dano superficial e seu comprimento não era adequado para a solução idealizada, a respetiva adequação foi realizada nos laboratórios próprios do Instituto Politécnico de Leiria.

Foi projetado o circuito elétrico para responder as necessidades de interconexão dos equipamentos, aquisição de sinais dos sensores utilizados e implantação de comandos para controlo do travão de histerese e do motor sob ensaio. Complementarmente desenvolveu-se o software de controlo do banco de ensaio de potência utilizado a linguagem LabVIEW® que, entre outras aplicações, é largamente utilizada para o desenvolvimento de sistemas de controlo e aquisição de dados com características de fiabilidade, robustez e flexibilidade de desenvolvimento.

Os ensaios conduzidos demonstraram a viabilidade do projeto e sua aplicabilidade no ensaio de motores elétricos, permitindo a caracterização dos motores no que diz respeito a potência, binário e rendimento, servindo o presente projeto como ponto de partida para futuros trabalhos de melhorias e diversificação de aplicabilidade do banco.

A divisão do objetivo principal em objetivos intermédios mostrou-se acertada pois desta maneira foi possível desenvolver o trabalho faseadamente, culminando no resultado de se haver um protótipo funcional.

Apresenta-se alguns pontos de melhoria para o trabalho proposto:

- Melhoria do processo de aquisição de dados do microcontrolador, aumentando a taxa de amostragem da informação coletada pelo sistema;
- Incorporação de mecanismos para detecção e prevenção do aumento repentino de velocidade do motor sob ensaio;
- Possibilidade de importação de pontos de teste automático a partir da leitura de ficheiros externos;
- Desenvolvimento de aplicação para análise de dados coletados e guardados em ficheiro EXCEL<sup>®</sup> ou em texto no formato valor separado por vírgula.
- Implementação de um sistema de controlo em malha fechada para ajuste da velocidade do motor;
- Estudo de alternativas para aquisição dos valores de corrente e tensão aplicados ao motor sob ensaio;
- Estudo e implementação de recursos para mitigar a propagação de ruído na malha de aquisição e controlo de dados.

## Referências Bibliográficas

- [1] Power Test Inc, «What is a Dynamometer?» <https://powertestdyno.com/what-is-a-dyno/#what-does-a-dyno-do> (acedido Jul. 06, 2022).
- [2] P. G. D. Baptista, «Freio Dinamométrico para Ensaio de Pequenos Veículos de Tracção Eléctrica», 2010.
- [3] C. da Peça, «Entenda o que é (e pra que serve) um dinamômetro». <https://www.canaldapeca.com.br/blog/entenda-pra-que-serve-um-dinamometro/> (acedido Jul. 06, 2022).
- [4] AVL, «AVL ROADSIM Chassis Dynamometers - Testing Solutions for Commercial On Road Vehicle.» [https://www.avl.com/testing-solutions-for-commercial-on-road/-/asset\\_publisher/gYjUpY19vEA8/content/avl-roadsim-chassis-dynamometers](https://www.avl.com/testing-solutions-for-commercial-on-road/-/asset_publisher/gYjUpY19vEA8/content/avl-roadsim-chassis-dynamometers) (acedido Jul. 20, 2022).
- [5] M. E. GmbH, «Chassis dynamometer system | Testing Systems |». [https://www.meidensha.com/meg/products/dynamometers/prod\\_01\\_01/prod\\_01\\_01\\_03/index.html](https://www.meidensha.com/meg/products/dynamometers/prod_01_01/prod_01_01_03/index.html) (acedido Jul. 20, 2022).
- [6] «Engine Dynos - Mustang Advanced Engineering Dynamometers». <https://www.mustangae.com/products/dynamometers-and-test-stands/engine-dynamometers/> (acedido Jul. 20, 2022).
- [7] «Transmission Dynos - Mustang Advanced Engineering Dynamometers». <https://www.mustangae.com/products/dynamometers-and-test-stands/transmission-dynamometers/> (acedido Jul. 20, 2022).
- [8] Martins Jorge, *Motores de combustão interna Jorge Martins*. 2006. [Em linha]. Available: <https://catalogo.ipleiria.pt/capas/2016/b135175.JPG>
- [9] S. Paulo e F. Marques, «Desenvolvimento de Bancadas para Testes de Motores e Veículos», Universidade do Minho - Escola de Engenharia, 2014.
- [10] Plint Michael e Martyr Anthony, *Engine testing theory and practice Michael Plint and Anthony Martyr*. 1999. [Em linha]. Available:

<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat08305a&AN=pdl.000076180&site=eds-live>

- [11] «Rope brake dynamometer: Definition, Principle, Diagram, Parts, Working [with pdf]». <https://mechcontent.com/rope-brake-dynamometer/> (acedido Jul. 21, 2022).
- [12] «Search media - Wikimedia Commons». <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=prony+brake&title=Special:MediaSearch&go=Go&type=image> (acedido Jul. 21, 2022).
- [13] J. C. O. VIANA, «Plataforma de testes de desempenho veicular para dinamômetros inerciais em linguagem LabVIEW©», 2011.
- [14] «Difference Between AC and DC Motors». <https://www.electricaltechnology.org/2020/06/difference-between-ac-dc-motor.html> (acedido Jul. 22, 2022).
- [15] MAGTROL Inc., «HB/HC User's Manual».
- [16] MAGTROL Inc., «Compressed-air-cooled Hysteresis Brakes - AHB Series | Magtrol». 2018. [Em linha]. Available: <https://www.magtrol.com/product/ahb-series-compressed-air-cooled-hysteresis-brakes/>
- [17] SKF Inc., «Caixas de mancal e unidades de rolamento SKF», 2019.
- [18] «Requisito de carga mínima | SKF | SKF». <https://www.skf.com/pt/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/bearing-size/requisite-minimum-load> (acedido Set. 05, 2022).
- [19] SKF Inc., «SNL 505 + 1205 K + H 205», 2022. [Em linha]. Available: [www.skf.com](http://www.skf.com)
- [20] «1205 EKTN9 - Rolamentos autocompensadores de esferas | SKF». <https://www.skf.com/pt/products/rolling-bearings/ball-bearings/self-aligning-ball-bearings/productid-1205%20EKTN9> (acedido Set. 05, 2022).

- [21] Lynch Motor Company Ltd, «Motors LEM-200». Acedido: Ago. 05, 2022. [Em linha]. Available: [www.lynchmotors.co.uk](http://www.lynchmotors.co.uk)
- [22] S. MELCONIAN, *Elementos de máquinas*. 2005. [Em linha]. Available: <https://catalogo.ipleiria.pt/capas/bjs/nr24245e24246.jpg>
- [23] Rolisa, «Catálogo de rolamentos, peças e acessórios para a indústria, lda.».
- [24] «ISO Tolerances (DIN ISO 286-1) – Apps no Google Play». [https://play.google.com/store/apps/details/?id=de.dzapps.iso\\_system\\_din286\\_1&hl=pt&gl=US](https://play.google.com/store/apps/details/?id=de.dzapps.iso_system_din286_1&hl=pt&gl=US) (acedido Set. 28, 2022).
- [25] Magtrol, «VM Series Proportional Amplifier/Controller». [Em linha]. Available: [www.magtrol.com](http://www.magtrol.com)
- [26] «What Is A Load Cell Sensor And How Does It Work? – Omega Engineering». <https://www.omega.com/en-us/resources/load-cells> (acedido Set. 14, 2022).
- [27] «Strain Gauges, How does it work?» <https://www.omega.com/en-us/resources/strain-gages> (acedido Set. 14, 2022).
- [28] H. International Inc, «Sensing and Internet of Things Datasheet Quadrature Speed and Direction Sensors SNG-Q Series SNG-QPLA-000 SNG-QPRA-000 SNG-QPCA-001 SNG-QPDB-000 SNG-QPDB-002 SNG-QPMB-000».
- [29] «SPI Isolator 3 Click - Mikroe | Mouser». <https://pt.mouser.com/new/mikroe/mikroe-spi-isolator-3-click/> (acedido Set. 15, 2022).
- [30] «JOY-IT Módulo controlador CAN/ SPI (MCP2515/MCP2562)». [https://mauser.pt/catalog/product\\_info.php?cPath=1667\\_2604\\_2607&products\\_id=096-7617](https://mauser.pt/catalog/product_info.php?cPath=1667_2604_2607&products_id=096-7617) (acedido Set. 15, 2022).
- [31] Melexis, «Current Sensors», *E*, 2020, [Em linha]. Available: [www.engineersgarage.com](http://www.engineersgarage.com)
- [32] H. Speed e C. Sensor, «High Speed Current Sensor IC», pp. 1–17, 2021.

- [33] «Serial Communication - learn.sparkfun.com». <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-communication/serial-intro> (acedido Set. 19, 2022).
- [34] «Introduction to SPI Interface | Analog Devices». <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/introduction-to-spi-interface.html> (acedido Set. 19, 2022).
- [35] «SPI Transfer Modes | USB-I2C/SPI/GPIO Interface Adapters». <https://dlnware.com/theory/SPI-Transfer-Modes> (acedido Set. 20, 2022).
- [36] «CAN in Automation (CiA): History of the CAN technology». [https://www.can--cia-org.translate.google.com/can-knowledge/can/can-history/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=pt&\\_x\\_tr\\_hl=pt-PT&\\_x\\_tr\\_pto=op,sc](https://www.can--cia-org.translate.google.com/can-knowledge/can/can-history/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt-PT&_x_tr_pto=op,sc) (acedido Set. 20, 2022).
- [37] «CAN we start at the very beginning? - Industrial - Technical articles - TI E2E support forums». [https://e2e.ti.com/blogs\\_/b/industrial\\_strength/posts/can-we-start-at-the-very-beginning](https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/posts/can-we-start-at-the-very-beginning) (acedido Set. 20, 2022).
- [38] «What do CAN bus signals look like? - Industrial - Technical articles - TI E2E support forums». [https://e2e.ti.com/blogs\\_/b/industrial\\_strength/posts/what-do-can-bus-signals-look-like](https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/posts/what-do-can-bus-signals-look-like) (acedido Set. 20, 2022).
- [39] «Controller Area Network (CAN) - In Detail - Embien Technologies Blog». <http://www.embien.com/blog/controller-area-network-can-in-detail/> (acedido Set. 20, 2022).
- [40] by Conal Watterson, «Controller Area Network (CAN) Implementation Guide». [Em linha]. Available: [www.analog.com](http://www.analog.com)
- [41] «Real-Time Multitasking on Maker Pi Pico Using pyRTOS – Tutorials of Cytron Technologies». <https://tutorial.cytron.io/2021/10/18/real-time-multitasking-on-maker-pi-pico-using-pyrtos/> (acedido Set. 21, 2022).
- [42] A. F. B. Francisco, «Projeto e desenvolvimento de uma unidade de controlo eletrónico para aplicação em veículos elétricos.», Instituto Politécnico de Leiria, 2020.

- [43] «What is LabVIEW? Graphical Programming for Test & Measurement - NI». <https://www.ni.com/pt-pt/shop/labview.html> (acedido Set. 22, 2022).
- [44] «LabVIEW». <https://www.halvorsen.blog/documents/programming/labview/labview.php> (acedido Set. 22, 2022).
- [45] «Instrumentação Virtual - NI». <https://www.ni.com/pt-pt/innovations/white-papers/06/virtual-instrumentation.html> (acedido Set. 22, 2022).
- [46] P. G. Drives, «SIGMA-CAN», pp. 1–12, 2007.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco.*

# Anexos

## ANEXO A – Dimensionamento da transmissão utilizando a ferramenta “Design Power”

 <b>Desenho de Correia Industrial - Relatório Detalhado</b> da Transmissão Design Flex® Pro by the Gates Corporation			
Projetado para: ESTG MEAU  Aplicação: Banco de Potencia	Fornecedor: David Fleury Instituto Politécnico de Leiria  910825926		
<b>ENTRADA</b>			
<b>Informação da Transmissão</b> Relação de velocidade: 4.86 Acima Potência do Motor: 16.08 kW, Eficiência: 92 % Fator de Serviço: 1.6 / 2.0 Apqs. Potência do Projeto: 25.73 kW Distância entre Centros: 400.00 mm +25%/12% Motor Standard: Motor Elétrico		RPM Velocidade Periférica Máxima:	Motora 2880 33.02 m/s  Movida 13997 +/-4% 33.02 m/s
<b>Transmissão Selecionada:</b> Tipo da Correia: PowerGrip GT3 - 5MGT Relação de Velocidade: 4.86 Acima dN RPM: 13929 Carga Avaliada: 24.93 kW Tensão na Correia: 628.23 N Distância entre Centros: 421.20 mm Instala./Tensões: 405.20 mm para 422.22 mm		Código: 1270-5MGT3-25 Produto Código: 9400-5530E Diâmetro Primário: -- RPM: 1542 Velocidade periférica da Correia: 32.64 m/s Largura Superior: -- Bucha Código: -- Furo: -- Peso: 130.17 g	Motora 136 Dentes Item fora de padrão de estoque 216.45 mm 2880 32.47 m/s 50.00 mm MPB --
<b>Tensão</b>	Correia Nova 386.37 para 425.00 N 756.48 para 832.12 N \$ 25 mm 3.95 para 4.27 kgf 386.00 para 425.00 N 74 para 78 Hz	Correia Usada 270.46 para 309.09 N 529.53 para 605.18 N \$ 25 mm 3.01 para 3.32 kgf 270.00 para 309.00 N 62 para 67 Hz	Ao planejar a re-instalar correias usadas mede e registre a tensão antes de remover e reinstalar a tensão gravada.  Sonic Modelo 507C/508C Parâmetros: Massa 4.10 g/m, Largura 25 mm #R, Vão 412 mm
<b>NOTAS</b> - A capacidade de transmissão de potência é menor do que a potência do projeto solicitado. Rever requisitos do projeto. - Utilizar duas polias flangeadas podem ser necessárias para o correto alinhamento da correia. - O alinhamento é crítico para longa distância Centro. - A polia motora é um item especial. O Furo e a bucha são desconhecidos. - A polia movida deve ser furada para o tamanho solicitado. Verificar o Lead Time. - O eixo e o furo da polia movida deve montar com ajuste Classe LC2. O eixo deve penetrar 100%. Este relatório: (1) só se aplica aos produtos de Gates, (2) contém informações confidenciais, (3) só podem ser divulgadas para apoiar a venda ou manutenção de nossos produtos, e (4) não é um a garantia de desempenho. Produtos Gates não são projetados, fabricados, ou testado para uso em aplicações de aeronaves, incluindo aviões de hélice ou sistemas de acionamento do rotor, e todas as aplicações no ar tripulados ou não tripulados de qualquer tipo. Sistemas de elevação e de frenagem têm considerações especiais. O comprador tem a responsabilidade exclusiva pela seleção e controle dos produtos para qualquer finalidade. Este Relatório e qualquer produto referido neste relatório estão sujeitos aos Termos Padrão e condições de venda, incluindo todas as renúncias, exclusões e limitações de garantias, explícitas e implícitas. Estes termos podem ser encontradas em <a href="http://www2.gates.com/termsale">www2.gates.com/termsale</a> .			
Page 0 of 0			

ANEXO B - Pinout das placas de circuito impresso

<b>Placa Master Control Board – Conector J5</b>		Função: Distribuição 24 V
Pino	Descrição	Observação
1	GND Fonte de Alimentação	
2	GND para Célula de Carga	
3	GND Controlador Travão	
4	24 V Fonte de Alimentação	
5	24 V Célula de Carga	Alimentação para Célula de Carga
6	24 V Controlador Travão	Alimentação para Controlador do Travão.
Referência MOLEX: 44764-0601		

<b>Placa Master Control Board – Conector J6</b>		Função: Conexão Sensores
Pino	Descrição	Observação
1	Resistor pull-up RPM Canal D	
2	Resistor pull-up RPM Canal Q	
3	Pin OUT sensor Hall	
4	Célula Carga Output -	
5	Célula Carga Output +	
6	+5 V RPM	Alimentação sensor rotações
7	+5 V Sensor Hall	Alimentação sensor hall
8	GND RPM	
9	GND Hall	
10	GND	Reserva GND
Referência MOLEX: 44764-1001		

<b>Placa <i>Master Control Board</i> – Conector J7</b>		Função: Jumper interno SPI
Pino	Descrição	Observação
1	GND	Conecta-se a J8:10
2	+5 V	Conecta-se a J8:9
3	AUX	Conecta-se a J8:8
4	MISO	Conecta-se a J8:7
5	MOSI	Conecta-se a J8:2
6	SCK	Conecta-se a J8:6
7	CS	Conecta-se a J8:1
Referência MOLEX: 1985014		

<b>Placa <i>Master Control Board</i> – Conector J8</b>		Função: Conexão PMT445-M
Pino	Descrição	Observação
1	CS	CS MCP4251
2	MOSI	
3	N/C	Não conectado
4	Coletor Isolador Digital	Controlo SHDN Potenciómetro Digital
5	Emissor Isolador Digital	Controlo SHDN Potenciómetro Digital
6	SCK	
7	MISO	
8	AUX	CS MCP2515
9	+5 V	Alimentação 5 V via PMT445-M
10	GND	Terra via PMT445-M
Referência MOLEX: 44764-1001		

<b>Placa <i>Current Sensor</i> – Conector J1</b>		Função: Conexão MCB
Pino	Descrição	Observação
1	OUT	Sinal saída analógico
2	GND	
3	+5 V	
Referência MOLEX: 90136-2103		

<b>Placa Can_Potentiometer – Conector J4</b>		Função: Conexão PCB – PMT
Pino	Descrição	Observação
1	CAN H	Conecta-se a B:6
2	CAN L	Conecta-se a B:5
3	Potenciômetro out	Conecta-se a A:8
4	Potenciômetro in	Conecta-se a B-
5	+5 V	Conecta-se a A:16
6	GND	Conecta-se a B-
Referência MOLEX: 44764-0601		

<b>Placa Can_Potentiometer – Conector J3</b>		Função: Conexão MCB
Pino	Descrição	Observação
1	Coletor isolador digital	
2	Emissor isolador digital	
3	GND	
4	AUX	CS MCP2515
5	CS MCP4251	
6	N/C	Não conectado
7	INT MCP2515	
8	SCK	
9	MOSI	
10	MISO	
Referência MOLEX: 44764-1001		