

FACULDADE DE TECNOLOGIA SÃO PAULO – FATEC

DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELETRÔNICOS

ELETRÔNICA INDUSTRIAL

ESTAÇÃO DE ENSAIO PARA MOTORES DC DE IMÃ

PERMANENTE

MARCIO BARBARA DE ALMEIDA

RENATO JUREMEIRA

SÃO PAULO - SP

2020



MARCIO BARBARA DE ALMEIDA
RENATO JUREMEIRA

**ESTAÇÃO DE ENSAIO PARA MOTORES DC DE IMÃ
PERMANENTE**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia São Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Tecnólogo em Eletrônica Industrial.

Orientador: Prof. Mauricio Deffert

São Paulo - SP

2020

Ficha Catalográfica

Almeida, Marcio Bárbara

Estação de Ensaio para motores de Imã Permanente / Marcio Bárbara de Almeida, Renato Juremeira. - São Paulo: Fatec-SP, 2020.
98 f.: il.

Orientador: Prof. Me. Mauricio Antonio Deffert
Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Eletrônica Industrial) –
Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2020.

1. Ensaio. 2. Microcontrolador, 3. Motor I. Deffert, Mauricio Antonio II.
2. Juremeira, Renato. III. Faculdade de Tecnologia de São Paulo. IV. Título.

TERMO DE APROVAÇÃO

MARCIO BARBARA DE ALMEIDA

RENATO JUREMEIRA

**ESTAÇÃO DE ENSAIO PARA MOTORES DC DE IMÃ
PERMANENTE**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia São Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Tecnólogo em Eletrônica Industrial.

BANCA EXAMINADORA

Local:

Horário: 19h

Data: 17/12/2020

(DEDICATÓRIA)

Nós dedicamos esse trabalho a nossos familiares, professores, a instituição FATEC-SP e a todas as demais pessoas que nos apoiaram e ajudaram durante nosso curso e contribuíram para nossa formação pessoal e profissional.
Que sejam abençoados.

Agradecimentos

Agradecemos aos nossos professores pelas aulas ministradas e todo conhecimento transmitido, foram fundamentais para nosso desenvolvimento intelectual e formação profissional.

Agradecemos a nossos familiares e amigos por todo apoio e compreensão durante a nossa trajetória acadêmica.

Agradecemos também a instituição FATEC-SP pelo ensino de qualidade disponibilizado.

A persistência é o caminho do êxito.

(Charles Chaplin)

RESUMO

Motores elétricos estão presentes direta ou indiretamente na vida das pessoas, escondidos dentro de aparelhos eletrodomésticos e brinquedos, eles são os responsáveis por darem vida a muitos dos equipamentos utilizados no dia a dia. Estão presentes na indústria, aumentando e otimizando a produção, e nos modais de transporte, oferecendo um meio sustentável para o deslocamento de cargas e pessoas em grandes distâncias. Para alcançar todas essas aplicações, muitos estudos, ensaios e testes foram realizados, e para tal, analisar todos os princípios físicos para compreender seu funcionamento foi o ponto de partida. Compreender como todas as grandezas eletromecânicas mensuráveis e as que se obtém a partir delas se relacionavam durante o funcionamento do motor foi a motivação principal para a realização desse trabalho, além de implementar um método para mensurar o torque, que é uma das grandezas mais importantes do motor e uma das mais difíceis de se obter experimentalmente. Este trabalho de conclusão de curso apresenta um protótipo de uma estação de ensaio para motores de corrente contínua com ímãs permanentes e que consumam no máximo até 200W. Esta estação é composta por um sistema de sensores que capturam as grandezas relevantes para o funcionamento do motor, como rotação por minuto (rpm), corrente elétrica, temperatura e torque, e são processadas por um microcontrolador de acordo com a programação estabelecida. Estas grandezas são apresentadas em um display de LCD em tempo real. A estação é composta por um motor “ativo” (energizado) acoplado mecanicamente a outro motor semelhante que irá operar de maneira “passiva” (gerador). Quando o gerador estiver produzindo tensão entre seus terminais, um potenciômetro irá drenar corrente elétrica atuando como uma carga. Este conjunto (gerador – potenciômetro) atua como um freio magnético para o motor a ser ensaiado, podendo assim, atuar como uma carga variável para dimensionamento do torque. Através dos ensaios do protótipo, foi possível estabelecer a relação entre as grandezas relevantes para o funcionamento do motor, e expressá-las através de gráficos.

Palavras-chave: Ensaio. Motor. Sensores. Microcontrolador. Gerador.

ABSTRACT

Electric motors are present directly or indirectly in people's lives, hidden inside appliances and toys, they are responsible for giving life to many on the equipment used in daily life. They are present in the industry, increasing and optimizing production, and in transport modes, offering a sustainable means for the displacement of loads and people over long distances. To achieve all of these applications, many studies, trials and tests have been carried out, and for that, analyzing all the physical principles to understand their functioning was the starting point. Understanding how all the measurable electromechanical quantities and those obtained from them were related during the operation of the engine was the main motivation for carrying out this thesis, in addition to implementing a method to measure the torque, which is one of the most important quantities of the engine and one of the most difficult to obtain experimentally. This work is presented a prototype of a rehearsal station for DC motors with permanent magnets that consumes less than 200W. This station is composed by a sensor system that captures the relevant quantities for the engine operation, like revolutions per minute (RPM), current, temperature and torque, which are processed by a microcontroller according to the set program. These quantities are presented in an LCD display in real time. The station contains an "active" motor (energized) mechanically connected to a similar motor that operates in a passive way (generator). When the generator produces voltage in its terminals, a potentiometer drains current acting as a charge. This set (generator-potentiometer) acts as a magnetic brake for the motor to be tested and works with variable charge for torque dimensioning. Through the prototype experiments it was possible to provide the relation between the relevant quantities for the engine operation and express them in charts.

Keywords: Test. Motor. Sensors. Microcontroller. Generator.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes estruturais utilizados	30
Tabela 2 – Lista dos componentes elétricos e eletrônicos utilizados.....	36
Tabela 3 – Especificação do motor RS775.....	44
Tabela 4 – Especificações Técnicas.....	46
Tabela 5 – Descrição das teclas do teclado matricial	56
Tabela 6 – Funções das telas do display.....	60
Tabela 7 – Pinos utilizados	61
Tabela 8 – Bibliotecas auxiliares	61
Tabela 9 – Grandezas eletromecânicas coletadas	72
Tabela 10 – Grandezas eletromecânicas calculadas	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação geral de motores elétricos	18
Figura 2 – Representação dos princípios físicos de um motor cc	20
Figura 3 – Representação do modelo elétrico de um motor cc	21
Figura 4 – Sistema de controle de velocidade Ward-Leonard.....	24
Figura 5 – Circuito simplificado	26
Figura 6 – Modulação por PWM.....	26
Figura 7 – Modo de operação de um MOSFET.....	28
Figura 8 – Etapas de desenvolvimento do projeto	30
Figura 9 – Pés de borracha antivibração.....	31
Figura 10 – Suporte eixo guia linear SK16.....	32
Figura 11 – Rolamento F625zz com flange.....	32
Figura 12 – Suporte Machifit 775	33
Figura 13 – Acoplamento Flexível 5x5 mm	33
Figura 14 – Conjunto de componentes para o sensor de velocidade.....	34
Figura 15 – Régua de alumínio	34
Figura 16 – Conjunto dos componentes estruturais	35
Figura 17 – Arduino Mega 2560	37
Figura 18 – Sensor de corrente modelo ACS712 20A	38
Figura 19 – Gráfico da tensão de saída versus corrente detectada	39
Figura 20 – Sensor de temperatura LM35.....	39
Figura 21 – Sensor de velocidade.....	40
Figura 22 – Célula de carga tipo barra	41
Figura 23 – Módulo HX711	42
Figura 24 – Processo de Conversão	43
Figura 25 – Motor RS775 com eixo prolongado.....	44
Figura 26 – Circuito Esquemático da ponte H 43A-BTS7960 IBT_2.....	45
Figura 27 – Ponte H BTS7960	46
Figura 28 – Teclado matricial de membrana 5x4	47
Figura 29 – Módulo Relé	48
Figura 30 – Reostato 20 Ω /150W	49
Figura 31 – Motor HANPOSE 775.....	50

Figura 32 – Display LCD 4x20.....	51
Figura 33 – Localização dos Componentes no Protótipo	52
Figura 34 – Programa Arduino IDE 18.13	54
Figura 35 – Proteus 8 Professional	54
Figura 36 – Microsoft Excel	54
Figura 37 – Diagrama de estação de ensaio.....	55
Figura 38 – Tela 1: Menu inicial	57
Figura 39 – Tela 2: Leitura das variáveis 1	57
Figura 40 – Tela 3: Leitura das variáveis 2	58
Figura 41 – Tela 4: Seleção de velocidade	59
Figura 42 – Tela 5: Leitura da temperatura e velocidades	59
Figura 43 – Comparação entre o sensor de corrente e um amperímetro comercial.....	62
Figura 44 – Sensor de temperatura posicionado abaixo do motor.....	64
Figura 45 – Célula de carga calibrada.....	65
Figura 46 – Modelo de ensaio do torque.....	66
Figura 47 – Sistema de medição do torque.....	68
Figura 48 – Sistema de frenagem	69
Figura 49 – Protótipo da estação de ensaio.....	70
Figura 50 – RPM em função da corrente	74
Figura 51 – RPM em função do torque	74
Figura 52 – Corrente em função do torque	75
Figura 53 – Potência consumida e função do torque	75
Figura 54 – Potência mecânica em função do torque	76
Figura 55 – Rendimento do motor em função do torque	77
Figura 56 – Rendimento do motor em função da temperatura.....	77
Figura 57 – Temperatura em função da corrente	78
Figura 58 – Tipos de desalinhamento	79

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADC	Analog to Digital Converter
BJT	Bipolar Junction Transistor
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCIP	Corrente Contínua e Imã Permanente
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	Comando Numérico Computadorizado
ENT	Enter
ESC	Escape
GND	Ground
ICSP	In Circuit Serial Programming
IGBT	insulated Gate Bipolar Transistor
LCD	Liquid Cristal Display
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
OUT	Output
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation
RISC	Reduced Instruction Set Computer
RPM	Rotação por Minuto
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo Geral.....	15
1.2	Objetivo Específico.....	15
1.3	Organização do Trabalho.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO	17
2.1	Motores elétricos.....	17
2.1.1	Motores de corrente contínua de ímãs permanentes.....	19
2.1.2	Torque.....	23
2.2	Controle de velocidade de motores.....	24
2.2.1	Modulação por largura de pulso - PWM.....	25
2.2.2	Circuito de potência.....	27
3	METODOLOGIA E MATERIAIS UTILIZADOS	29
3.1	Metodologia.....	29
3.2	Componentes estruturais.....	31
3.2.1	Sistema de suporte do motor e do gerador.....	31
3.2.2	Acoplamento mecânico dos eixos.....	33
3.2.3	Mecanismo de acionamento da célula de carga.....	34
3.3	Componentes elétricos e eletrônicos.....	36
3.3.1	Microcontrolador arduino mega 2560.....	37
3.3.2	Sensor de Corrente ACS712 20A.....	38
3.3.3	Sensor de temperatura LM35.....	39
3.3.4	Sensor de Velocidade.....	40
3.3.5	Célula de carga.....	41
3.3.6	Módulo HX711.....	42
3.3.7	Motor RS775.....	43
3.3.8	Ponte H.....	44
3.3.9	Teclado Matricial.....	46
3.3.10	Módulo relé.....	47
3.3.11	Reostato.....	48
3.3.12	Gerador.....	49
3.3.13	Display LCD.....	50
3.4	Softwares.....	53
3.4.1	Arduino IDE 1.8.13.....	53
3.4.2	Proteus.....	54
3.4.3	Excel.....	54
4	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	55
4.1	Diagrama do projeto.....	55
4.2	Funcionamento da Estação.....	56
4.3	Interface gráfica.....	60
4.4	Bibliotecas de programação.....	61
4.5	Medição de Corrente.....	61
4.6	Tensão aplicada no motor.....	62
4.7	Medição da temperatura.....	63
4.8	Medição da velocidade.....	64
4.9	Medição do torque.....	65
4.10	Sistema de frenagem.....	68

5	PROTÓTIPO E RESULTADOS	69
5.1	Protótipo da estação de ensaio.....	69
5.2	Métricas utilizadas	70
5.3	Testes e coleta de dados	71
5.4	Análise dos dados.....	73
5.5	Limitações encontradas	78
6	CONCLUSÃO	80
7	APLICAÇÕES FUTURAS	81
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	82
ANEXO A: Código Fonte		84
ANEXO B: Circuitos Elétricos		92

1 INTRODUÇÃO

Motor elétrico é um atuador capaz de transformar energia elétrica em energia mecânica. Existem diversos tipos de motores elétricos, desde os de pequeno porte, presentes dentro das residências em eletrodomésticos, equipamentos eletrônicos e brinquedos, até aqueles de grande porte, presentes na indústria manufatureira, automobilística, metroferroviária, no agronegócio entre outras.

Estes motores, podem ser separados em três grandes grupos, que são os motores de corrente contínua, motores de corrente alternada e os motores universais. Para cada um desses tipos citados, existem ainda outras separações, cada uma com suas particularidades. Importante salientar que, de maneira geral, todos os motores elétricos, independentemente do grupo do qual fazem parte, apresentam um conjunto comum de grandezas responsáveis pelo seu funcionamento, tais como corrente elétrica e tensão elétrica e outras que surgem durante a operação, como o torque dinâmico, rotação por minuto, potência mecânica e temperatura.

Os aspectos construtivos dos motores elétricos mudaram pouco com o passar dos anos, mas inúmeras técnicas de controle foram concebidas e grande parte desta mudança se deve ao avanço tecnológico da indústria de semicondutores. Ela permitiu que os sistemas motrizes fossem projetados para obter o maior rendimento possível sem comprometer o motor ou o sistema, e possibilitou que os motores adquirissem um comportamento de sensor além de atuador. Esse avanço dos sistemas embarcados auxilia as equipes de manutenção com diagnósticos de operação e histórico de falhas, contribuindo para o desenvolvimento de rotinas de manutenção preditiva. Diversos sistemas de controle foram desenvolvidos para motores de corrente contínua e são usados para desenvolvimento de robôs, máquinas operatrizes ou veículos autônomos. Nas mais diversas aplicações, as grandezas citadas acima devem ser mensuradas, registradas e controladas, de modo que o resultado da atividade para a qual o motor ou sistema motriz foi projetado ofereça a melhor

qualidade possível.

Parâmetros como tensão e corrente de trabalho, rotação por minuto “rpm”, temperatura e torque são exemplos de variáveis que interferem diretamente na qualidade do resultado desejado, por isso, são prioritariamente inseridas em sistemas de controle.

Pode-se citar como exemplo um veículo que percorra um aclave, declive ou terreno acidentado, que para manter a velocidade constante, é necessário corrigir o torque fornecendo mais ou menos energia ao motor.

Desenvolveu-se neste trabalho uma estação que consegue avaliar estas grandezas em condições variáveis de esforço. Temperatura, RPM, torque e corrente são medidas, neste trabalho, com o auxílio de sensores e a tensão é calculada estabelecendo-se uma relação com o *duty-cycle* do circuito de PWM.

A estação permite ensaios em motores para verificar suas especificações e testes em diferentes regimes de trabalho.

Para a realização deste trabalho, foram utilizados motores de corrente contínua de ímãs permanentes, por envolverem as grandezas importantes e necessárias para o estudo, tamanho reduzido, o que facilita a construção de um protótipo e um custo mais baixo.

A metodologia adotada permite que corrente elétrica, tensão elétrica, rotação por minuto (rpm), temperatura e torque sejam monitorados através de sensores, dimensionados e controlados por um microcontrolador e visualizados por um *display* de LCD. Todo o acionamento do sistema foi feito através de um teclado matricial 5x4. O sistema possui dois modos de operação: manual, que permite variar carga e velocidade de acordo com os comandos do operador e o segundo modo possibilita o controle da velocidade de maneira automática de acordo com um *set point* de velocidade previamente estabelecido. Os procedimentos para obter estas medidas, bem como a forma como elas se relacionam em condições de operação são descritos nos próximos tópicos deste trabalho.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste projeto é o desenvolvimento de uma estação para ensaio de motores de corrente contínua de ímãs permanentes, de modo que se possa controlar um motor de maneira manual e automática e a visualização das grandezas responsáveis e resultantes do seu funcionamento e como se relacionam. Todo o controle e processamento das informações juntamente com os cálculos para o dimensionamento das grandezas será realizado por um microcontrolador Atmega2560.

1.2 Objetivo Específico

Os seguintes objetivos específicos foram determinados:

- Determinar quais as grandezas serão sensorizadas e instrumentalizar o motor elétrico;
- Desenvolver um método de medição das grandezas selecionadas;
- Criar metodologia de cálculo e visualização destas grandezas de maneira que se possam representá-las graficamente para um melhor entendimento;
- Construir um sistema mecânico de suporte dos motores que permita a realização dos ensaios;
- Implementar uma rotina de programação em linguagem C para atender à necessidade de gerenciamento da estação, das medições e dos cálculos;
- Desenvolver e montar o circuito eletrônico que atenda o projeto proposto;
- Realizar simulações da operação do circuito proposto em vazio e com carga, e;
- Criar uma estação o mais didática possível para os ensaios dos motores;

O gerenciamento da estação será feito por uma plataforma arduino Mega2560 R3, que utiliza o chip Atmega2560 programado em linguagem C. As

grandezas corrente elétrica, torque, rotação por minuto (rpm) e temperatura serão mensuradas por sensores, enquanto que a tensão elétrica será mensurada por método de cálculo. Todas as grandezas serão visualizadas em tempo real através de um *display* de LCD.

1.3 Organização do Trabalho

Segue os assuntos abordados em cada capítulo da monografia:

- Capítulo 1: Introdução

Esse capítulo introduz alguns conceitos sobre motores elétricos e algumas características do projeto.

- Capítulo 2: Fundamentação

Esse capítulo aborda os conceitos teóricos referentes a motores elétricos.

- Capítulo 3: Metodologia e Materiais Utilizados

Esse capítulo apresenta os componentes e a forma como foram utilizados.

- Capítulo 4: Desenvolvimento do Projeto

Esse capítulo explica os métodos para o desenvolvimento do projeto.

- Capítulo 5: Protótipo e Resultados

Esse capítulo apresenta os resultados obtidos.

- Capítulo 6: Conclusão

Esse capítulo apresenta a conclusão a partir dos resultados.

- Capítulo 7: Aplicações Futuras

Esse capítulo opina sobre as possíveis melhorias e aplicações futuras do projeto.

- Capítulo 8: Referências

Esse capítulo enuncia todas as referências utilizadas no projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO

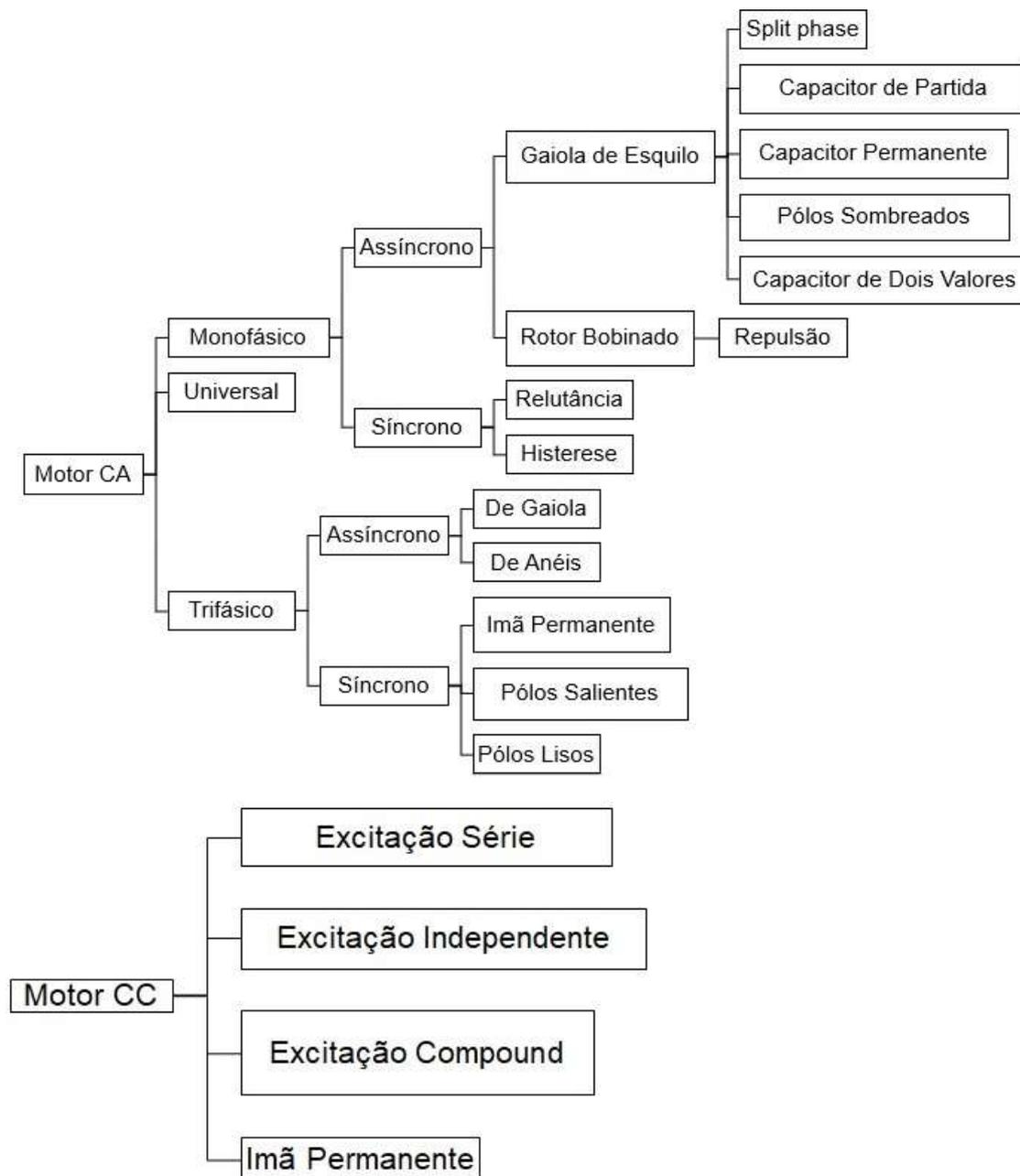
Para o desenvolvimento deste trabalho, é necessário demonstrar alguns conceitos teóricos necessários para a compreensão do funcionamento desta estação de ensaio, mais especificamente, dos motores elétricos de corrente contínua, com o objetivo de monitorar e compreender a relação entre as suas grandezas durante os ensaios.

2.1 Motores elétricos

Motor elétrico é o dispositivo responsável por transformar a energia elétrica em energia mecânica [1]. Existem diferentes tipos de motores, com diferentes tipos de características construtivas, mas todos são baseados nos mesmos princípios físicos de magnetismo, corrente elétrica e tensão elétrica. Na Figura 1 é ilustrada a classificação geral dos motores.

O que caracteriza os motores elétricos é a forma de como são alimentados, que pode ser por corrente alternada (C.A.) ou corrente contínua (C.C.), e a técnica de como o campo será gerado, se por indução ou ímãs permanentes.

Figura 1 – Classificação geral de motores elétricos



Fonte: Autor-adaptado de WEG-Motores Elétricos Guia de Especificação

Como citado anteriormente, o tipo de motor escolhido para este trabalho é o de corrente contínua com escovas e de imã permanente, pois é facilmente encontrado no mercado em diversos modelos, oferece uma faixa ampla de velocidade, tensão de alimentação, potência elétrica, dimensões de fácil manuseio e baixo custo. Motores de outros tipos como trifásicos e/ou com campo variável poderiam ser utilizados, mas seria necessário procurar instalações

apropriadas, com redes trifásicas por exemplo, implementar sistema de controle de campo magnético, com custos que estariam fora do orçamento.

2.1.1 Motores de corrente contínua de ímãs permanentes

“Um motor de ímã permanente (CCIP) é um motor CC cujos polos são feitos de ímãs permanentes” [2]. O movimento rotativo do eixo é gerado através da interação das forças de atração e repulsão sofridas por uma espira de fio de material condutor que é percorrido por uma corrente elétrica em relação ao campo magnético criado pelos ímãs no estator.

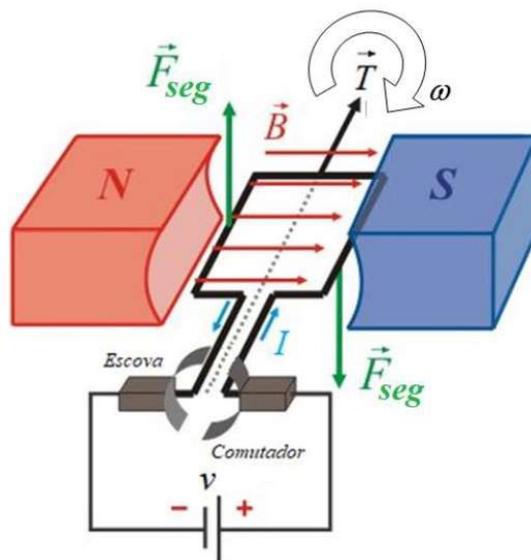
Estes motores também possuem desvantagens, como a densidade de fluxo do ímã não ser tão elevada como em um campo em derivação de alimentação externa, desse modo, os motores de ímãs permanentes apresentam um torque por ampère de corrente na armadura menor do que nos motores de corrente contínua em derivação com as mesmas proporções de tamanho e construção. Outra desvantagem é a possível desmagnetização dos ímãs. Caso a corrente de armadura ser muito elevada, a força magnetomotriz da armadura desmagnetiza os ímãs nos polos. Também, altas temperaturas devido a períodos prolongados de sobrecarga podem causar a desmagnetização dos polos [2].

A Figura 2 caracteriza o modelo básico de um motor de corrente contínua . Os polos magnéticos situados no estator **N** e **S**, geram um campo magnético **B**, a espira do rotor constituída por um fio condutor com um comprimento determinado **L** está imersa dentro do campo magnético e é percorrida por uma corrente elétrica **I** proveniente da fonte de alimentação **v** através das escovas e do comutador.

Esta espira está sob influência de forças magnéticas **F_{seg}** em cada segmento que estiver perpendicular as linhas de campo, formando um binário de forças que estão em sentidos opostos. Esta dualidade de forças condiciona a espira a girar em seu próprio eixo. Quando o plano da espira está em posição perpendicular as linhas de campo, a força resultante se anula, porém, por inércia, a espira continua no movimento de rotação **ω** além da posição perpendicular, resultando na troca dos contatos elétricos pelo comutador e as escovas, assim

a direção da corrente se inverte e uma nova dupla de forças opostas surge dando continuidade ao movimento de rotação de forma contínua. O torque T desenvolvido no eixo de rotação é determinado pelo produto da força resultante multiplicada por dois, por serem duas forças opostas, e a distância do segmento linear da espira em relação ao eixo de rotação.

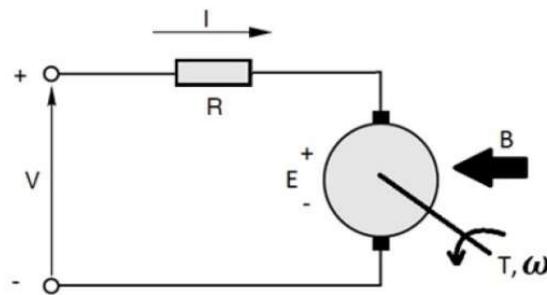
Figura 2 – Representação dos princípios físicos de um motor cc



Fonte: <http://tede.bibliotecadigital.puc-campinas.edu.br:8080/jspui/bitstream/tede/1252/2/LUCAS%20BARALDI%20MAUSBACH.pdf>
<Acessado em 05/10/2020 às 14:00 h>

Motores de corrente contínua incluindo os de ímã permanente podem ser representados pelo modelo elétrico da Figura 3. Esse modelo permite o equacionamento das variáveis que relacionam o motor.

Figura 3 – Representação do modelo elétrico de um motor cc



Fonte: <http://tede.bibliotecadigital.puc-campinas.edu.br:8080/jspui/bitstream/tede/1252/2/LUCAS%20BARALDI%20MAUSBACH.pdf>
<Acessado em 05/10/2020 às 14:30 h>

Nesse modelo, o campo magnético criado pelos ímãs permanentes está representado por B , a corrente que percorre as espiras do motor é I , a força contra eletromotriz E é dada pela lei de Faraday e é gerada pelo motor devido a velocidade angular de rotação ω . A tensão aplicada nos terminais do motor é representada por V , e R é a resistência equivalente do motor que engloba todas as suas resistências elétricas internas. A ação de todas essas grandezas conjuntas, gera o torque T .

Toda a dinâmica de um motor de corrente contínua pode ser obtida a partir das equações de Kirchhoff ao circuito da armadura, e existe uma relação entre elas e a parte mecânica do sistema do motor.

No circuito da Figura 3, as equações seguintes descrevem um motor de corrente contínua com escovas e ímã permanente [3]. Onde:

$$V = R \cdot I + E \quad \text{Equação 1}$$

E temos que E é igual a:

$$E = K_e \cdot \omega \quad \text{Equação 2}$$

Onde K_e é a constante de força contra eletromotriz.

Para o torque temos que:

$$T = Kt.I$$

Equação 3

Onde Kt é a constante de torque do motor.

E para I temos que:

$$I = \frac{V-E}{R}$$

Equação 4

Logo, expandindo a equação para I temos que:

$$I = \frac{V-(Ke.\omega)}{R}$$

Equação 5

Substituindo na equação do torque temos:

$$T = Kt. \frac{(V-Ke.\omega)}{R}$$

Equação 6

Logo:

$$T = \frac{(Kt.V)}{R} - \omega \frac{(Kt.Ke)}{R}$$

Equação 7

Se considerarmos a velocidade angular (ω) igual a zero, obtemos o torque de bloqueio:

$$T = \frac{Kt.V}{R}$$

Equação 8

Portanto, pela equação 7 podemos concluir uma dependência linear decrescente do torque do motor em relação a sua velocidade angular.

Importante salientar que as constantes de força contra eletromotriz Ke , e de torque Kt , são características que variam com o tipo de motor a ser utilizado, e estão relacionadas diretamente com a intensidade do campo magnético e as características contrutivas do motor.

Para potência elétrica consumida temos que:

$$P_{\text{entrada}} = V \cdot I \quad \text{Equação 9}$$

Para potência mecânica de saída desenvolvida no eixo do motor temos que:

$$P_{\text{saída}} = T \cdot \omega \quad \text{Equação 10}$$

E por fim, a eficiência do motor, ou eficiência energética, que se expressa pelo rendimento, é dada pela razão entre a potência mecânica de saída, e a potência consumida pelo motor:

$$\eta = \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} \quad \text{Equação 11}$$

2.1.2 Torque

O torque é uma grandeza física associada ao movimento de rotação de um corpo em razão de uma força [4]. Nas espiras do rotor do motor que são percorridas por uma corrente elétrica e estão na presença de um fluxo de campo perpendicular, uma força é exercida. O valor dessa força é proporcional ao valor da corrente no condutor, seu comprimento e intensidade do campo magnético. Importante ressaltar que cada um dos condutores no campo magnético contribui com um componente da força total, e esse valor multiplicado pelo raio do rotor, produz o torque eletromagnético desenvolvido pelo motor. Admitindo o fluxo de campo constante para motores constituídos de imã permanente, o torque é proporcional a corrente de armadura, como está exemplificado na equação 3.

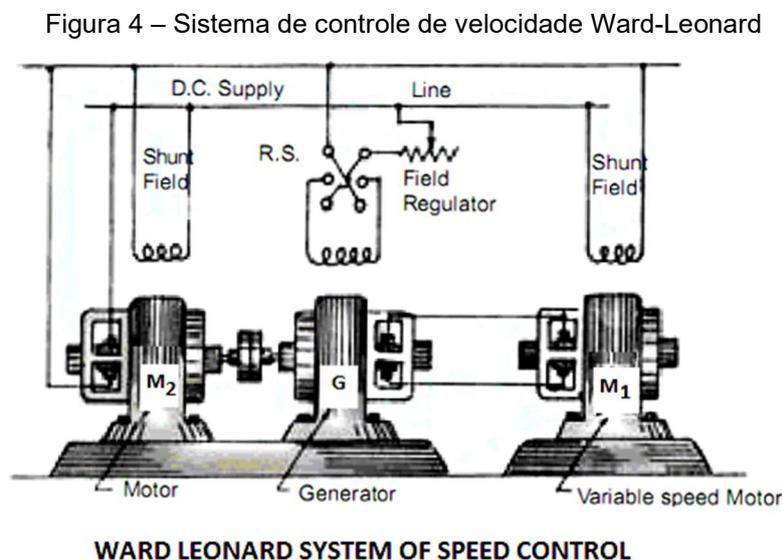
De modo a prevenir falhas que podem ocorrer em uma máquina devido ao torque excessivo, medir e controlar o torque é de alta importância. Existem atualmente métodos para medição de torque no eixo em rotação, baseados em

anéis coletores, telemetria, extensômetros entre outros. Por aspectos de montagem e custo, optamos por utilizar extensômetros [5].

2.2 Controle de velocidade de motores

Controle de velocidade de motores são muito comuns nos mais variados tipos de processos em que a velocidade precisa ser alterada. A velocidade pode ser alterada de várias maneiras, como controle mecânico com troca de correias e polias. Este método não é muito indicado devido ao fato que para troca dos componentes mecânicos, a máquina deve estar desligada, prejudicando o processo no qual ela se encontra. Outro método, com princípio elétrico de controle que possibilitava velocidade variável, foi implementado em meados de 1890, foi o sistema Ward-Leonard que para a época, foi um salto evolutivo nos sistemas de acionamento.

A Figura 4 apresenta o sistema.



Fonte: <https://www.electronicafacil.top/control-velocidad-motor-dc/metodo-de-control-de-velocidad-ward-leonard/> <Acessado em 01/11/2020 às 15:30 h>

O sistema utilizava unidades independentes de motor e gerador, e possibilitava o controle da velocidade de motores de corrente contínua. Através de um motor **M2** que gira com velocidade constante, impulsiona o gerador **G** no

qual está acoplado mecanicamente. O gerador cria os níveis de tensão para a armadura do motor de interesse **M1**. Para criar estes níveis de tensão e por consequência mudar a velocidade do motor, altera-se o valor do **regulador de campo** com auxílio de um reostato, o sentido de rotação também pode ser invertido mudando a posição da chave **RS**.

Esse sistema apesar de revolucionário, era muito custoso, porque necessitava de mais máquinas auxiliares (motor e gerador), a eficiência geral do sistema não era satisfatória, necessitava de um espaço grande para instalação devido ao tamanho e peso dos componentes, manutenção frequente e apresentava muito ruído.

Para evitar estes problemas, sistemas elétricos e eletrônicos de controle foram concebidos, decorrente da evolução tecnológica principalmente da indústria de semicondutores, ela proporcionou a criação de alternativas mais eficientes, aperfeiçoamento e otimização dos processos. Os sistemas mais comuns de controle criados e presentes até os dias de hoje são os que utilizam controladores lógicos programáveis (CLP) e microcontroladores. Este último, utilizam da modulação por largura de pulso para atingir valores intermediários de tensão para alimentação das cargas.

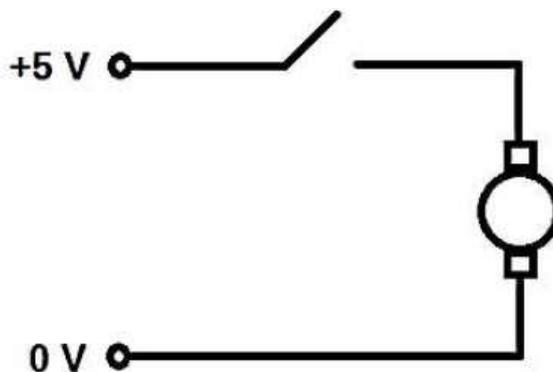
2.2.1 Modulação por largura de pulso - PWM

Os microcontroladores possibilitaram um grande avanço nos sistemas de controle, devido a baixo custo de projeto, construção e consumo de energia, por ser um componente programável por linguagem de programação, oferecer sistemas compactos, praticidade de reposição entre outras vantagens.

Internamente, encontram-se circuitos periféricos que possibilitam controlar cargas com potência mais elevada através de circuitos de transferência de potência. A técnica por PWM – do inglês, *pulse width modulation* (modulação por largura de pulso) consiste em ligar e desligar uma carga, no caso um motor, com uma frequência fixa, através de uma chave eletrônica como um transistor, podendo ser bipolar, MOSFET, do inglês (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*), Transistor de Efeito de Campo de Óxido de Metal Semicondutor, ou

de outro tipo. Esse chaveamento permite balancear os intervalos de tempo em que o motor recebe potência total e potência nula de modo que se possa atingir na média um valor intermediário de tensão desejado [6]. Na Figura 5 está representada a chave e o motor como carga.

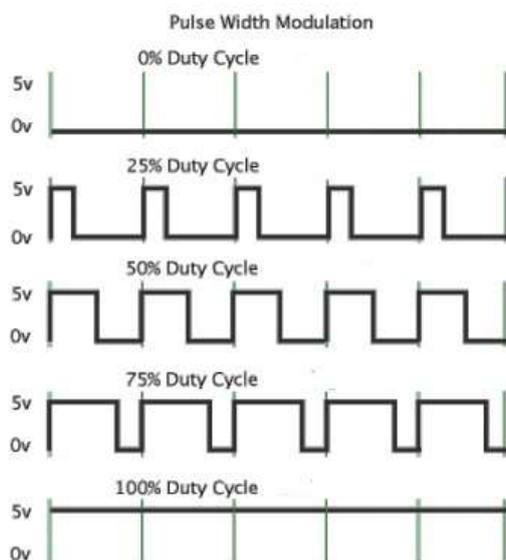
Figura 5 – Circuito simplificado



Fonte: <https://docplayer.com.br/19060122-Acionamento-de-motores-pwm-e-ponte-h.html>
<Acessado em 03/11/2020 às 16:30>

O período de tempo em que a chave permanece ligada é chamado de (*Ton*) e o período em que a chave permanece desligada é chamado de (*Toff*) como está apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Modulação por PWM



Fonte: <http://professor.luzerna.ifc.edu.br/marcelo-cendron/wp-content/uploads/sites/40/2017/07/Teoria-03-PWM.pdf> <Acessado em 10/11/2020 às 21:00 h>

A relação entre o período (T_{on}) e (T_{off}) é chamada de *duty cycle* (ciclo de trabalho) e representa em porcentagem o valor da tensão desejada em relação ao valor de fonte de alimentação. Ou seja, para o exemplo de um *duty cycle* de 75%, significa que o sinal fica ligado 75% do período e desligado 25%. No caso da Figura 6, como a tensão da fonte é 5V, o *duty cycle* irá permitir uma queda de tensão no motor de 3,75V. A modulação por PWM é amplamente encontrada em inversores de frequência, controle de servo motores, fontes chaveadas, controle de potência e velocidade de motores [7].

Como citado anteriormente, é necessário um circuito de transferência de potência que receba o sinal PWM do microcontrolador na ordem de 5V e transfira para o motor respeitando a modulação do sinal em níveis de tensão mais elevados, no caso desse protótipo, o nível é 24V, que corresponde ao nível de tensão máximo suportado pelo motor.

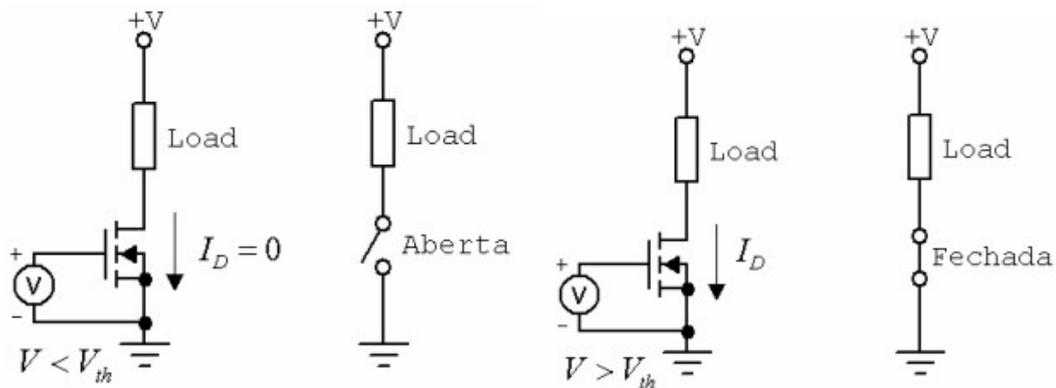
2.2.2 Circuito de potência

Um circuito de potência deve controlar o fluxo de potência tratando a energia proveniente da fonte de alimentação através de dispositivos semicondutores de potência, para alimentar as cargas.

Existem vários modelos de dispositivos semicondutores que podem ser usados para esta aplicação, podemos citar os tiristores, transistores MOSFET ou bipolar. Com o avanço da tecnologia, outros dispositivos que combinavam características dos já citados surgiram. O IGBT, do inglês (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), transistor bipolar de porta isolada, combina características do BJT e do MOSFET.

Os modos de operação do transistor de potência é apresentado na Figura 7 tomando o MOSFET como exemplo.

Figura 7 – Modo de operação de um MOSFET



Fonte: http://meggi.usuarios.rdc.puc-rio.br/teses/TFC04_Felipe_Maimon.pdf <Acessado em 09/11/2020 às 22:00 h>

Quando a tensão V na sua entrada *Gate* é menor do que a tensão de limiar (V_{th}), o transistor está em corte, se comportando como uma chave aberta, logo, não há circulação de corrente elétrica entre seus terminais (*Drain* e *Source*). E quando a tensão na sua entrada *Gate* é maior que sua tensão de limiar (V_{th}), o transistor entra no modo de condução se comportando como uma chave fechada, permitindo a passagem da corrente elétrica entre os seus terminais (*Drain* e *Source*).

Apesar do comportamento como chave, os semicondutores não são ideais, apresentando perdas de energia na forma de calor (efeito *joule*), mais comumente existem dois tipos de perdas:

- Perdas na condução: relativas ao comportamento do componente enquanto está em condução (chave fechada), devido a queda de tensão nos seus terminais enquanto é percorrido por uma corrente elétrica;
- Perdas na Comutação: Ocorrem na fase de mudança de estado da chave, ou seja, quando o componente está mudando da fase de condução para corte e vice-versa.

As perdas na condução e comutação consomem parte da potência que deveria ser entregue a carga na forma de calor, diminuindo a eficiência do circuito [8], sendo necessário utilizar dispositivos que dissipem a temperatura e resfriem o componente de potência.

3 METODOLOGIA E MATERIAIS UTILIZADOS

Neste capítulo são descritos a metodologia, os materiais e os demais recursos utilizados para o desenvolvimento deste projeto.

3.1 Metodologia

Para a elaboração do projeto, foram feitas pesquisas em livros, artigos acadêmicos, manuais técnicos e *sites* da internet que abordavam o tema sobre motores elétricos e circuitos de monitoramento.

Posteriormente foram determinadas as grandezas eletromecânicas que seriam monitoradas como a corrente consumida pelo motor, a tensão aplicada nos seus terminais, a temperatura de operação, rotação por minuto (rpm) e o torque, essas grandezas também devem ser disponibilizadas para visualização através de um *display* de LCD, sendo possível analisar como elas se relacionam durante o funcionamento do motor e através dos dados obtidos, gerar gráficos de desempenho. Para tanto, serão utilizados sensores, um circuito de potência, um microcontrolador para tratamento das informações e gerenciamento da estação, um teclado matricial para executar comandos e um circuito de freio magnético composto por outro motor semelhante ao que será ensaiado, que através de um acoplamento mecânico será tracionado adquirindo um comportamento de gerador. Um reostato estará ligado aos seus terminais sendo percorrido por uma corrente elétrica, este conjunto simula uma carga variável.

O método para estimar o torque se baseia nos princípios de um eletrodinamômetro [9], [10], onde uma haste de alumínio estará presa no corpo do motor de ensaio e a outra ponta apoiada em uma célula de carga.

A força que o motor aplicará na ponta da haste será medida por esta célula, e como o comprimento da haste é conhecido será possível calcular o torque do motor. Todos os componentes utilizados serão descritos nos itens abaixo.

A Figura 8 resume as etapas de desenvolvimento.

Figura 8 – Etapas de desenvolvimento do projeto



Fonte: Autor

Desta forma construiu-se uma Estação de Ensaio para análise e monitoramento de um motor de corrente contínua com escovas e imã permanente.

A tabela 1 apresenta os componentes estruturais, a quantidade utilizada e os custos:

Tabela 1 – Componentes estruturais utilizados

Componente Estruturais	Quantidade	Custo (R\$)
Placa de Acrílico	1	-
Pé de Borracha Micro 1	9	101,90
Suporte SK16	2	36
Suporte SK10	1	31,90
Suporte Machifit 775	1	19,42
Rolamento F625zz	4	28,99
Rolamento F623zz	2	31,90
Acoplamento 5x5	2	15,80
Acoplamento 5x3	1	14
Haste de Alumínio 10 cm	1	7,10
Eixo do Encoder	1	-
		Total = 287,01

Fonte: Autor

3.2 Componentes estruturais

Para a construção da base da estação de ensaio, foi utilizada uma chapa de acrílico de dimensões 50x50x5,00mm. O acrílico oferece as condições ideais para corte e furação, permitindo uma boa fixação dos componentes. Por ter uma espessura de 5,00mm, é possível fazer furações próximas umas das outras sem que ocorra quebras e trincas.

A placa está apoiada sobre nove pés de borracha antivibração, como exposto na Figura 9. Esses pés são necessários para absorver a vibração gerada durante o funcionamento e estão dispostos de modo que ofereçam um maior número de apoios pela área de acrílico melhorando a estabilidade do conjunto.

Figura 9 – Pés de borracha antivibração

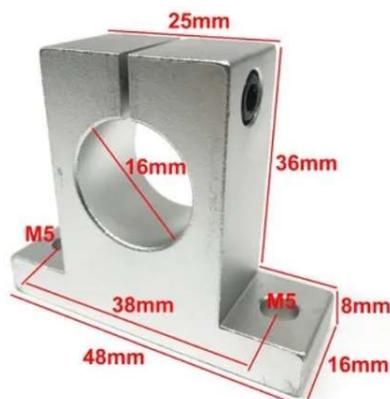


Fonte: Mercado Livre

3.2.1 Sistema de suporte do motor e do gerador

Para o suporte do motor utilizou-se um sistema de mancais adaptado, que baseou-se em um conjunto composto de suportes para eixos guias lineares modelo SK16 como ilustrado na Figura 10, e rolamentos F625zz com flange como ilustrado na Figura 11.

Figura 10 – Suporte eixo guia linear SK16



Fonte: Mercado Livre

Figura 11 – Rolamento F625zz com flange



Fonte: Mercado Livre

Estes suportes confeccionados em liga de alumínio, são muito utilizados em máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado), impressoras, mesas deslizantes, equipamentos de serigrafia e bancadas didáticas de automação.

Optou-se pela utilização dos suportes para compor o mancal devido as suas dimensões, preço e praticidade para adaptação, além de que é mais difícil se produzir tais suportes manualmente. Outro fator importante para sua escolha, foi a condição de encaixe dos rolamentos modelo F625zz com flange, estes rolamentos possuem diâmetro externo igual ao diâmetro do furo dos mancais, na medida de $\varnothing=16$ mm. O diâmetro interno dos rolamentos é de $\varnothing=5$ mm igual

a medida do diâmetro do eixo do motor.

Para a fixação do gerador, foi utilizado um suporte em “U” Machifit 775, como ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Suporte Machifit 775



Fonte: Banggod

3.2.2 Acoplamento mecânico dos eixos

A conexão entre o motor e o gerador é feita por um acoplamento flexível, ilustrado na Figura 13, com diâmetro interno de $\varnothing=5$ mm. Por ser flexível ou elástico, permite o movimento angular do eixo, absorvendo esforços causados pela partida ou freagem da rotação e também pelas vibrações, evitando a quebra do acoplamento durante o funcionamento.

Figura 13 – Acoplamento Flexível 5x5 mm



Fonte: Mercado Livre

Também foi utilizado um eixo com diâmetro $\varnothing=3$ mm e comprimento de 8 cm acoplado ao motor através de um acoplamento flexível 5x3 mm. Neste eixo está fixado o disco do encoder, que é o sensor de velocidade do motor. Para o mancal deste eixo, foi utilizado outro suporte para eixo guia linear modelo SK10 junto com dois rolamentos modelo F623zz. Este conjunto de componentes está ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Conjunto de componentes para o sensor de velocidade

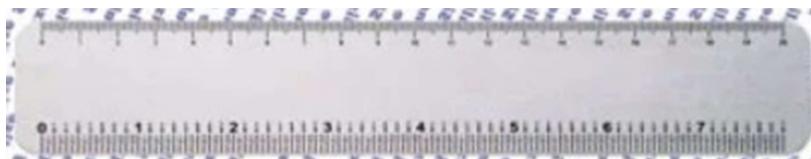


Fonte: Autor

3.2.3 Mecanismo de acionamento da célula de carga

Para a aplicação de força na célula de carga, foi utilizada uma régua de alumínio de 20 cm (Figura 15) porém, apenas 10 cm do seu comprimento foi utilizado para o projeto.

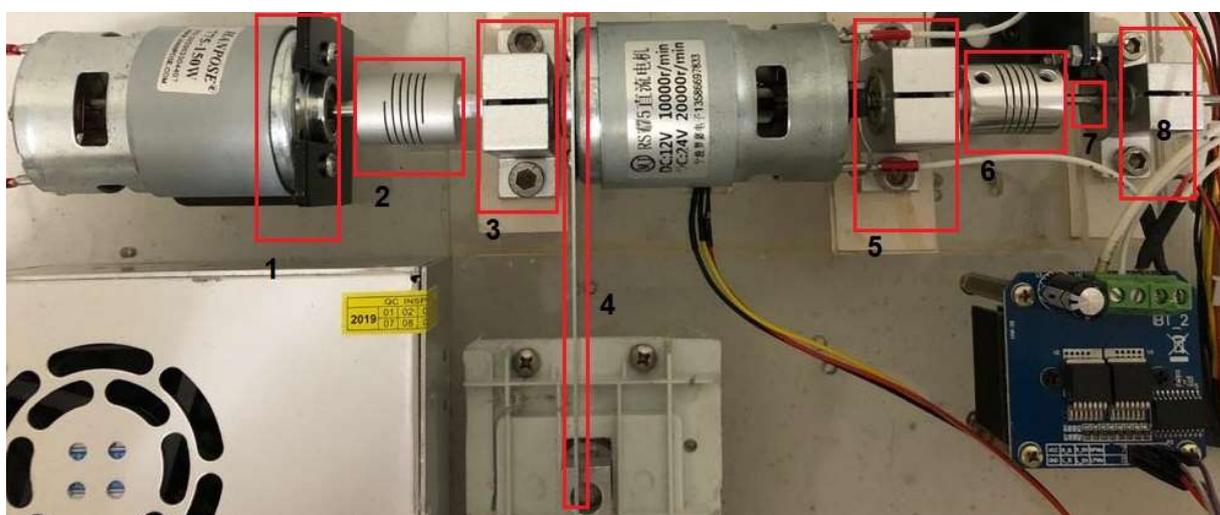
Figura 15 – Régua de alumínio



Fonte: Kalunga

E por fim, todo o conjunto de fixação do motor e do gerador está ilustrado na Figura 16. Importante citar que as dimensões dos componentes utilizados no sistema mecânico de suporte não são proporcionais, principalmente entre os mancais do motor, do eixo do encoder e do suporte do gerador, na dimensão da altura, então, foi necessário a utilização de “calços” para que o sistema se mantivesse o mais nivelado possível. No entanto, por ter sido construído artesanalmente, associado a falta de um instrumento de precisão para as medições tornou-se difícil um nivelamento ideal do sistema.

Figura 16 – Conjunto dos componentes estruturais



Fonte: Autor

Onde:

- 1 Suporte Machifit 775;
- 2 Acoplamento 5x5;
- 3 Suporte SK16;
- 4 Haste de Alumínio 10cm;
- 5 Suporte SK16;
- 6 Acoplamento 5x3;
- 7 Eixo do Encoder;
- 8 Suporte SK10;

3.3 Componentes elétricos e eletrônicos

A tabela 2, apresenta os componentes elétricos e eletrônicos utilizados na montagem do projeto.

Tabela 2 – Lista dos componentes elétricos e eletrônicos utilizados

Componente	Descrição	Quantidade	Custo (R\$)
Arduino Mega 2560 REV3	Microcontrolador	1	114,80
ACS712 20A	Sensor de Corrente	1	19,90
LM35	Sensor de Temperatura	1	8,00
Foto encoder	Sensor de Velocidade	1	35,53
Célula de Carga 10Kg	Sensor de Peso	1	36,90
Módulo HX711	Conversor Amplificador 24 bits	1	9,90
RS775 Eixo Duplo	Motor de Ensaio	1	171,45
BTS7960	Ponte H	1	125,78
Teclado Matricial de Membrana 5x4	Teclado de Comando	1	9,00
Módulo Relê 5VDC	Tongling JQC-3FF-S-Z	1	12,90
Reostato de 100W	Potenciômetro	1	78,42
HANPOSE 775	Motor Gerador	1	60,07
Display LCD	Display LCD 20x4	1	39,00
Fonte Chaveada 36V - 10A	Fonte de alimentação	1	97,62
Diodo	SK3/16 "roda livre"	1	1,20
Diodo	Diodo 1N4007	4	0,36
Barra resistiva	Barra resistiva 10KΩ	1	0,81
			Total = 821,64

Fonte: Autor

3.3.1 Microcontrolador Arduino Mega 2560

O Arduino Mega é uma plataforma de controle que utiliza o microcontrolador Atmega 2560 da Atmel. Esse microcontrolador oferece uma facilidade na prototipagem, programação, software de simulação gratuito, grande número de tutoriais e bibliotecas disponíveis e pela linguagem de programação ser C++, uma linguagem estruturada de alto nível.

Figura 17 – Arduino Mega 2560



Fonte: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>
<Acessado em 03/11/2020 às 11:00 h>

Os principais recursos oferecidos são:

- 54 pinos de entrada e saída;

Dos quais podem ser usados:

- 15 pinos como saída PWM;
- 16 pinos como entradas analógicas;
- 4 UARTS (portas seriais de hardware);

Na placa estão também os demais circuitos:

- Um oscilador de cristal de 16Mhz;
- Um conector de alimentação do tipo Jack;
- Um conector ICSP;

- Uma porta USB;
- Um botão de reset;

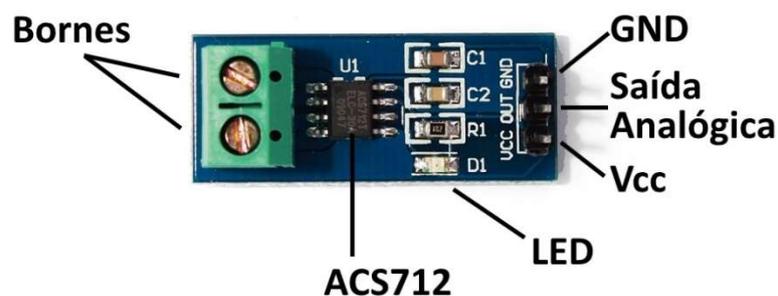
As entradas analógicas utilizadas operam na faixa de valor de 0 à 5Vcc, convertido em um valor digital, apresenta uma resolução de 10 bits, com uma variação de 0 à 1023.

3.3.2 Sensor de corrente ACS712 20A

Este é o dispositivo de medição de corrente utilizado, por efeito hall ele detecta o campo magnético gerado pela passagem de corrente, entregando na saída (pino OUT) uma tensão proporcional a 100mV/A.

Ele contém dois terminais do tipo borne que são ligados em série com o circuito a ser medido, e três pinos de controle, sendo dois deles de alimentação, 5Vcc e o negativo GND, o terceiro pino (OUT) é o de saída que é ligado na entrada analógica do microcontrolador.

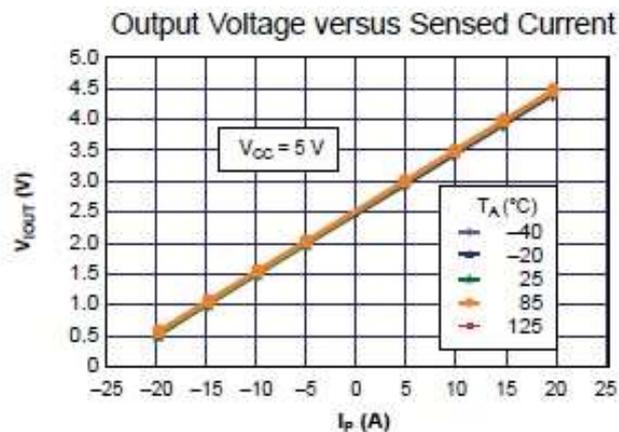
Figura 18 – Sensor de corrente modelo ACS712 20A



Fonte: <https://www.arduinoecia.com.br/como-usar-o-sensor-de-corrente-acs712/> <Acessado em 03/11/2020 às 16:00 h>

Este sensor trabalha na faixa de -20A à +20A e o seu sinal de saída varia de 0,5Vcc à 4,5Vcc de acordo com a corrente detectada conforme a Figura 19.

Figura 19 – Gráfico da tensão de saída versus corrente detectada



Fonte: Datasheet

3.3.3 Sensor de temperatura LM35

Este sensor possui uma alta sensibilidade, seu sinal de saída é analógico e mede temperaturas na faixa de 0°C à 100°C com uma precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e uma resolução de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$.

Figura 20 – Sensor de temperatura LM35



Fonte: <https://www.arducore.com.br/sensor-de-temperatura-lm35->
<Acessado em 14/08/2020 às 13:35 h>

O LM35 não necessita de de qualquer calibração externa para realizar leituras, fazendo com que a interface de leitura seja especificamente simples.

3.3.4 Sensor de Velocidade

Para determinar a velocidade do motor foi escolhido um sensor fotoelétrico com encoder, este sensor tem de um lado um LED infravermelho, e do outro lado um fototransistor. Quando o feixe de luz infravermelha é interrompido, a saída digital do sensor envia o sinal digital 1 referenciado em 5Vcc, caso contrário, a saída permanece em nível lógico 0 referenciado em 0Vcc. A interrupção ocorre através de um disco com 100 ranhuras que está acoplado no eixo de 3 mm solidário ao eixo do motor, essas ranhuras cortam o feixe de luz enquanto o eixo do motor gira criando os pulsos de contagem para determinar a velocidade.

Figura 21 – Sensor de velocidade



Fonte: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1345731919-sensor-de-velocidade-fotoeletrico-com-encoder-arduino-_JM?redirectedFromSimilar=true
<Acessado em 14/02/2020 às 10:00 h>

O sensor contém quatro terminais, dois de alimentação em 5Vcc e GND e dois de sinal de saída que enviam os pulsos ao microcontrolador.

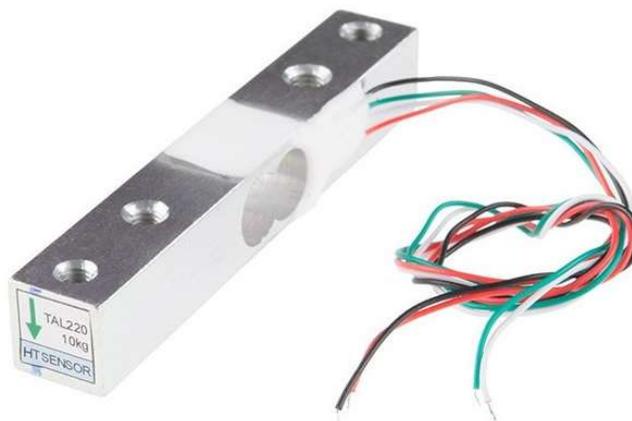
3.3.5 Célula de carga

Uma célula de carga é um transdutor de força que converte a carga que atua sobre ele em uma saída elétrica mensurável.

O tipo de célula mais comum encontrada no mercado é a que utiliza extensômetros ou *strain-gauges* colados na sua estrutura.

O *strain-gauge* é um sensor que é colado na superfície de uma peça responsável por medir a deformação diante da aplicação de uma força. Seu princípio de funcionamento se baseia em um fio resistivo que tem sua resistência alterada de acordo com o “alongamento” da superfície em que está colado, gerando sinais elétricos que são interpretados pelo microcontrolador. A célula de carga utilizada é do tipo barra e suporta uma massa de até 10kg, são muito utilizadas em balanças de cozinha .

Figura 22 – Célula de carga tipo barra



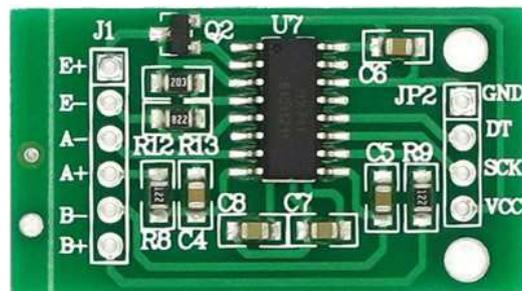
Fonte: <https://www.boxelectronica.com/pt/sensores-flexibilidade-forca-vibracao/848-celula-de-carga-10kg-barra-tal220-.html> <Acessado em 12/06/2020 às 14:30 h>

A variação da resistência provoca variações de corrente muito baixas, na ordem de micro amperes (μA) , dessa maneira, a entrada do microcontrolador não consegue realizar leituras com a precisão necessária, então é necessário utilizar um circuito amplificador de sinal entre a célula de carga e o microcontrolador.

3.3.6 Módulo HX711

O módulo HX711 é um componente composto de um amplificador e conversor analógico digital de 24 bits. É muito utilizado em aplicações que envolvem células de carga.

Figura 23 – Módulo HX711



Fonte: <https://www.robocore.net/modules.php?name=Forums&file=viewtopic&t=5757>
<Acessado em 12/06/2020 às 15:00 h>

O módulo contém os seguintes pontos de conexão:

- **E+**: pino que alimenta a célula de carga (+), neste projeto, estabelecido em 5Vcc;
- **E-**: pino que alimenta a célula de carga (-), GND;
- **A+**: sinal da célula de carga;
- **A-**: sinal da célula de carga;
- **B-**: não utilizado;
- **B+**: não utilizado;
- **VCC**: alimentação positiva do módulo em 5Vcc;
- **GND**: alimentação negativa do módulo;
- **DT**: pino de sinal de saída do módulo conectado no microcontrolador;
- **SCK**: pino de sinal do *clock* enviado do microcontrolador para o módulo;

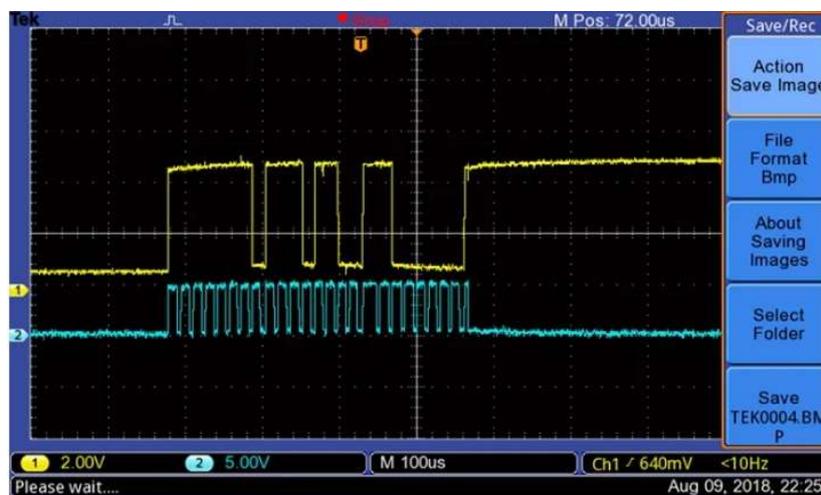
O pino SCK envia 25 pulsos, sendo que o 24º pulso indica o fim da conversão e o 25º pulso indica que a próxima conversão tem que ser no canal A

com ganho de 128. No pino DT temos a informação convertida em digital e quando o pino SCK envia o 24º pulso indicando que a conversão terminou, o pino DT vai para nível lógico alto.

Quando o pino DT vai para o nível lógico baixo, significa que o mesmo está pronto para a conversão aguardando o primeiro pulso do SCK para que essa nova conversão seja iniciada.

A Figura 24 ilustra o processo de conversão.

Figura 24 – Processo de Conversão



Fonte: <http://blog.baudaeletronica.com.br/conversor-hx711-para-balanca-eletronica/>
<Acessado em 13/06/2020 às 10:00 h>

Este módulo foi desenvolvido com a finalidade de realizar conversão das alterações de valor da resistência dos sensores da célula de carga em dados digitais por meio de um circuito ADC de 24 bits.

3.3.7 Motor RS775

O motor utilizado nos ensaios é do modelo 775 com o eixo prolongado, são muito utilizados em ferramentas de pequeno porte de bancada e para trabalhos manuais.

Tabela 3 – Especificação do motor RS775

Motor RS775 com Eixo Duplo		
		Tensão
Start Current	5A	
No-load Current	1,7A	
Speed (rpm)	10000	12V
	20000	24V

Fonte: Autor

Este motor foi escolhido pelas suas dimensões, características elétricas, custo e principalmente por ser o único modelo encontrado com o eixo prolongado o suficiente para ser apoiado pelos dois lados e que atendia essas especificações.

Figura 25 – Motor RS775 com eixo prolongado



Fonte: <https://www.ebay.com/itm/1pcs-DC12-24V-3000-20000rpm-RS775-Double-Shaft-High-Speed-DC-Motor-for-DIY-Parts> <Acessado em 09/11/2020 às 23:00 h>

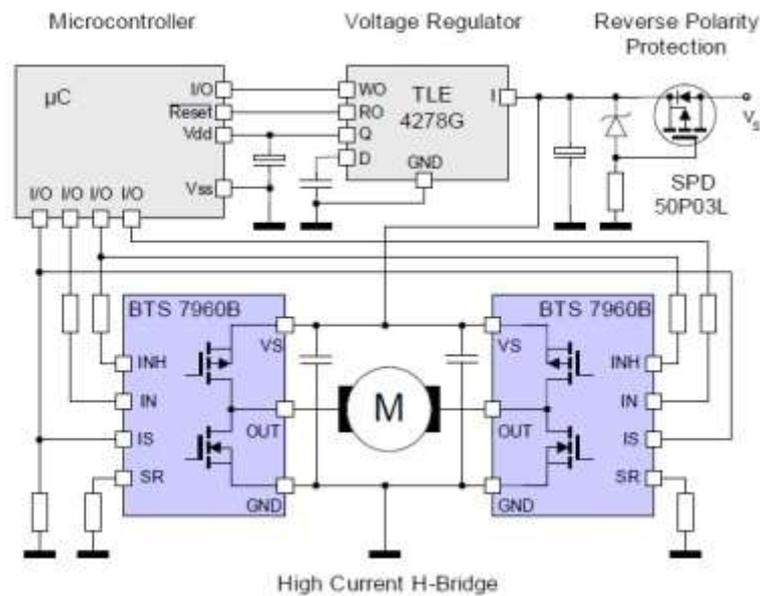
3.3.8 Ponte H

A ponte H é um circuito que permite variar o sentido da corrente em uma determinada carga, além de controlar sua potência. É muito utilizada para

controle de direção de rotação de motores DC.

Para o funcionamento do circuito, é necessário um caminho que conduza a corrente ao motor em uma direção, e outro caminho que leve a corrente no sentido oposto. O circuito tem que ser capaz de ligar e desligar a alimentação do motor, por isso, os *drivers* de Ponte H usualmente possuem interface com circuitos PWM. O controle do sentido de rotação é feito por chaves eletrônicas como transistores de potência do tipo MOSFET. A Ponte H modelo BTS7960 tem como base o circuito integrado (C.I.) meia ponte BTS7960, para compor a ponte completa são utilizadas duas unidades.

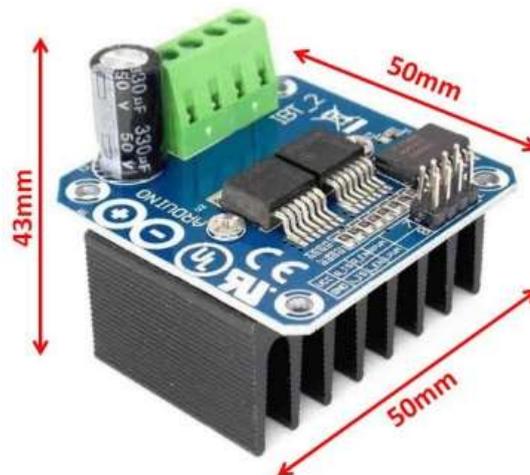
Figura 26 – Circuito Esquemático da ponte H 43A-BTS7960 IBT_2



Fonte: Datasheet disponível em: <https://www.saravati.com.br/modulo-driver-ponte-h-bts7960>
<Acessado em 08/11/2020 às 15:25 h>

É um módulo útil para controle de motores, oferece uma boa faixa de trabalho em corrente, tamanho reduzido, circuito integrado de controle e proteções contra temperatura, subtensão, sobretensão e sobrecorrente.

Figura 27 – Ponte H BTS7960



Fonte: Datasheet disponível em: <https://www.saravati.com.br/modulo-driver-ponte-h-bts7960>
<Acessado em 08/11/2020 às 15:25 h>

O módulo contém pinos de saída para interface com microcontroladores que indicam falhas durante o funcionamento permitindo a implementação de rotinas de programação que possam desligar o circuito e fornecer informações de diagnóstico do sistema.

A Ponte H BTS7960 apresenta as seguintes especificações técnicas:

Tabela 4 – Especificações Técnicas

PONTE H BTS7960	
Tensão Lógica	3,3 - 5,3Vcc
Corrente de Alimentação (módulo)	3mA
Tensão de Alimentação de Entrada	5 - 45Vcc
Corrente Máxima Contínua	43A
Corrente Máxima de Pico	60A
Frequência Máxima de Operação	25Khz

Fonte: Autor

3.3.9 Teclado Matricial

O teclado matricial é o componente que envia os comandos dados pelo operador para o microcontrolador. Seu modelo é 5x4 (cinco linhas por quatro

colunas) de membrana. Ele contém dez teclas numéricas, quatro literais, quatro representadas por setas e duas de caracteres.

Figura 28 – Teclado matricial de membrana 5x4



Fonte: <https://www.curtocircuito.com.br/teclado-matricial-membrana-4x5.html>
<Acessado em 10/04/2020 às 20:00 h>

A leitura das teclas é feita por meio de varredura ou multiplexação, ou seja, essa técnica consiste no compartilhamento do mesmo barramento por vários dispositivos para economizar pinos do microcontrolador. No caso do teclado matricial, os barramentos serão as colunas e os dispositivos as linhas. Logo, apenas uma coluna se liga as linhas por vez.

3.3.10 Módulo relé

O módulo Relé é utilizado para acionar cargas com características elétricas superiores aos níveis suportados pelo microcontrolador.

Figura 29 – Módulo Relé



Fonte: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-834599392-rele-arduino-ky-019-modulo-relay-automaco-raspberry-pic-_JM <Acessado em 10/11/2020 às 14:30 h>

O módulo contém um conector do tipo borne de três terminais, um contato comum, um contato normal aberto (NA) e outro contato normal fechado (NF).

Os sinais de controle estão divididos em três pinos, alimentação positiva em 5Vcc, GND e um pino de sinal enviado pelo microcontrolador para energizar a bobina e movimentar seus contatos. O relé suporta uma corrente de 10A e 30Vcc de tensão.

3.3.11 Reostato

O Reostato utilizado é do modelo de variação contínua na forma de um potenciômetro. Com ele é possível variar o valor da resistência continuamente entre dois pontos, desde o zero até um valor máximo predeterminado.

Figura 30 – Reostato 20Ω/150W



Fonte: <https://www.ebay.com/itm/383669170592> <Acessado em 02/02/2020 às 15:40 h>

Foi utilizado um reostato com uma capacidade de dissipação de potência de 100W, e sua resistência é de 20Ω.

3.3.12 Gerador

Um gerador de corrente contínua é uma máquina elétrica capaz de converter energia mecânica em energia elétrica. Um motor de corrente contínua pode funcionar como um gerador, para isso, basta que uma força mecânica rotacione seu eixo.

Pela lei de Faraday quando um fio condutor corta as linhas de campo magnético, surgirá nele uma força eletromotriz.

No caso de um motor atuando como gerador, as bobinas de armadura cortam as linhas de campo dos ímãs no estator, com isso surge uma tensão induzida em cada espira, e através do comutador, uma diferença de potencial é gerada nos terminais do motor adquirindo um comportamento de gerador.

Figura 31 – Motor HANPOSE 775



Fonte: https://www.banggood.com/HANPOSE-775-Motor-DC-12V-24V-80W-150W-288W-DC-Motor-Large-Torque-High-Power-DC-Motor-Double-Ball-Bearing-Spindle-Motor-p-1441968.html?cur_warehouse=CN&ID=585307&rmmds=search
<Acessado em 10/11/2020 às 18:00 h>

A força eletromotriz gerada varia com a intensidade do campo magnético, com o comprimento do condutor e com a velocidade de deslocamento do condutor dentro do campo.

Como o campo e o comprimento do condutor são constantes, apenas a velocidade com que o rotor gira altera o valor da tensão gerada, mas o valor dessa tensão está limitado a um valor máximo determinado pela intensidade do campo fixo dos ímãs no estator.

O gerador utilizado é um motor modelo HANPOSE 775 de 150W e 24V.

3.3.13 Display LCD

O Display LCD é um componente eletrônico que tem por função mostrar caracteres através da programação do microcontrolador.

Figura 32 – Display LCD 4x20



Fonte: <https://dutchrfshop.nl/en/lcd/257-lcd-display-4x20-blauw.html>
<Acessado em 10/11/2020 às 19:00 h>

O display utilizado no projeto é do modelo 20x4 (20 colunas por 4 linhas), com esta configuração pode-se visualizar uma maior quantidade de dados em uma única tela.

E finalmente, a Figura 33 ilustra a montagem final de todo o protótipo, com os componentes eletrônicos utilizados destacados em vermelho.

Onde:

- 1 Motor RS775 de eixo prolongado;
- 2 Sensor de temperatura LM35;
- 3 Ponte H BTS7960;
- 4 Sensor de corrente ACS712 20A;
- 5 Foto Encoder;
- 6 Célula de Carga 10Kg;
- 7 Módulo HX711;
- 8 Display LCD;
- 9 Arduino Mega 2560;
- 10 Teclado Matricial;
- 11 Módulo Relê;
- 12 Motor HANPOSE 775;
- 13 Reostato;
- 14 Fonte de alimentação;

3.4 Softwares

Os principais softwares utilizados para programação, simulação e edição foram Arduino IDE, Proteus e o Excel.

3.4.1 Arduino IDE 1.8.13

Este software foi utilizado para a elaboração da programação do código fonte do Arduino.

Figura 34 – Programa Arduino IDE 18.13



Fonte: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/installing-arduino-ide/all>
<Acessado em 10/11/2020 às 21:09 h>

3.4.2 Proteus

O software Proteus foi utilizado para simular o circuito ou partes dele em regime virtual para depois realizar simulações em protoboard.

Figura 35 – Proteus 8 Professional



Fonte: <https://www.labcenter.com/> <Acessado em 10/11/2020 às 21:30>

3.4.3 Excel

Software desenvolvido pela Microsoft para edição de planilhas.

Figura 36 – Microsoft Excel



Fonte: <https://www.technipages.com/excel-enable-slashes-in-spreadsheets>
<Acessado em 10/11/2020 às 21:35 h>

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

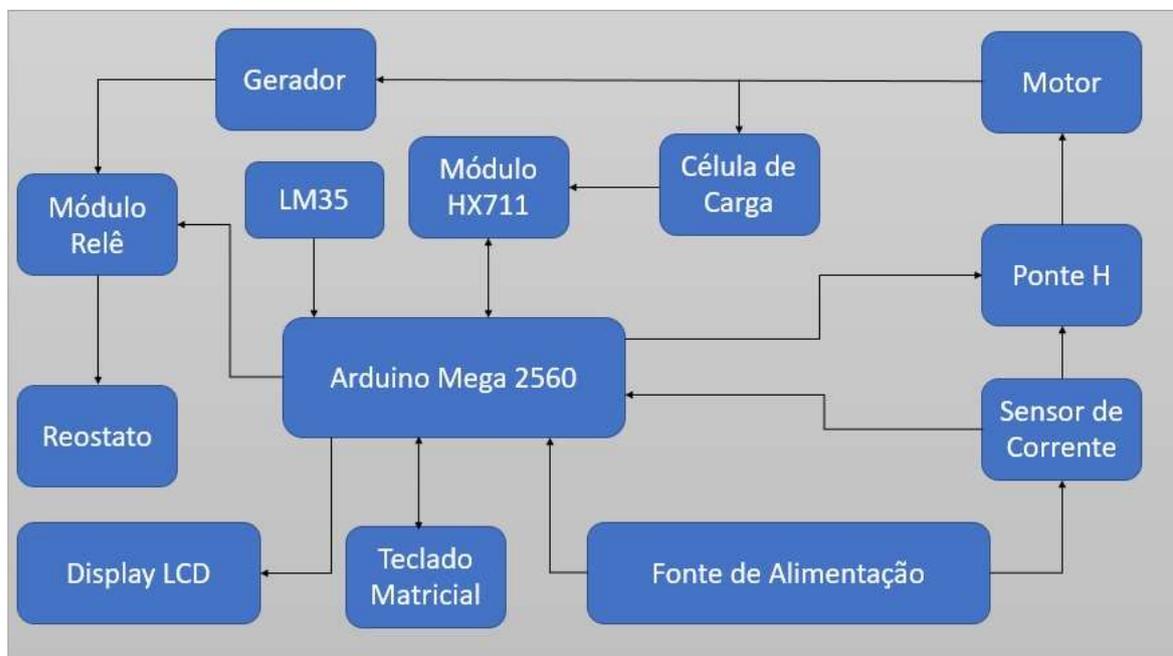
Este capítulo inclui o diagrama que representa o projeto em blocos, a descrição do seu funcionamento, nos modos manual e automático, e os métodos para estimar as grandezas eletromecânicas.

Os dados obtidos pelos sensores serão tratados pelo Arduino para calcular o torque, potência consumida, potência mecânica, rendimento, temperatura, corrente e velocidade. A tensão é calculada estabelecendo-se uma relação com o duty cycle do PWM (equação 12 , pg. 63).

4.1 Diagrama do projeto

O diagrama da Figura 37 apresenta a relação entre os componentes utilizados na estação de ensaio.

Figura 37 – Diagrama de estação de ensaio



Fonte: Autor

4.2 Funcionamento da Estação

Os comandos enviados para o microcontrolador são feitos através do teclado matricial, a tabela 5 apresenta a descrição das teclas:

Tabela 5 – Descrição das teclas do teclado matricial

Teclas	Descrição
F1	Inicia o modo manual
F2	Inicia o modo automático
#	Não usado
*	Liga e desliga o módulo relé
ESC	Desliga o sistema e volta para a tela de menu
ENT	Envia a velocidade desejada no modo automático (<i>set point</i>)
0	As teclas numéricas são utilizadas para configurar o valor da velocidade desejada no modo automático, não sendo possível inserir um valor maior do que o estipulado pelo fabricante do motor. Esse parâmetro de trava é ajustado na programação.
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
	Incrementa o <i>duty cycle</i> (Aumenta a velocidade do motor)
	Decrementa o <i>duty cycle</i> (Diminui a velocidade do motor)
	Avança para a próxima tela do <i>display</i>
	Retorna para a tela anterior do <i>display</i>

Fonte: Autor

Quando a estação é ligada, pode-se escolher entre dois métodos para ensaio, o modo manual, tecla (F1) e o modo automático, tecla (F2), conforme ilustrado na Figura 38.

Figura 38 – Tela 1: Menu inicial



Fonte: Autor

Quando a tecla F1 é pressionada a tela do *display* é atualizada para a tela de visualização das variáveis e controle de velocidade do motor ilustrada na Figura 39, o aumento e o decremento da velocidade é feito a partir dos comandos do operador pelas teclas de seta para cima e seta para baixo.

Figura 39 – Tela 2: Leitura das variáveis 1



Fonte: Autor

Pressionando a tecla seta para a direita, a tela do display avança para a

Figura 41 – Tela 4: Seleção de velocidade



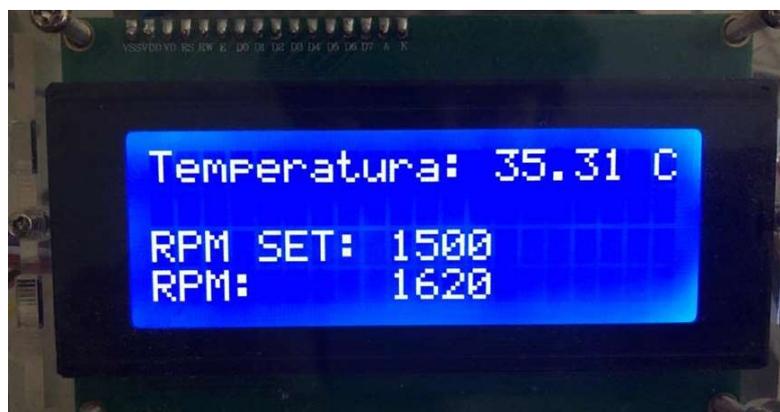
Fonte: Autor

Quando a velocidade medida ultrapassar o valor de *set point*, o Arduino envia um comando por PWM para diminuir a velocidade do motor, e quando a velocidade medida for menor do que o *set point*, novamente o Arduino via PWM aumenta a velocidade do motor.

Esse método não permite uma correção precisa e rápida da velocidade, devido a não existir um controle PID integrado ao sistema, mas possibilita perfeitamente um ponto de partida para futuras melhorias.

Após a tecla ENT ser pressionada a tela do *display* avança novamente para a tela de leitura das variáveis, e pressionando a tecla seta para direita, a tela avança para de leitura da temperatura com um adicional da velocidade setada e a velocidade sendo corrigida.

Figura 42 – Tela 5: Leitura da temperatura e velocidades



Fonte: Autor

A qualquer momento a tecla ESC pode ser pressionada desligando o

sistema e a tela do *display* retorna para a tela de menu.

4.3 Interface gráfica

A demonstração das variáveis é feita por um display LCD em tempo real, a tabela 6 apresenta o resumo das telas já citadas no item 4.2.

Tabela 6 – Funções das telas do display

Tela	Descrição
1	Menu Inicial
2	Variáveis
3	Temperatura
4	Seleção de Velocidade
5	Temperatura e Velocidade

Fonte: Autor

O modelo utilizado é o Arduino Mega 2560, pois oferece uma boa quantidade de pinos disponíveis, com uma boa variação de entradas analógicas e digitais, saídas PWM e uma ampla variedade de bibliotecas auxiliares para usar com os mais variados sensores.

Foram utilizados 24 pinos ao todo, sendo 09 pinos para o teclado matricial, 01 pino para o sensor de corrente, 01 pino para o sensor de temperatura, 01 pino para saída PWM, 06 pinos para o *display* LCD, 02 pinos para o módulo HX711 e 01 pino para o módulo relé.

Os pinos utilizados e a qual circuito foram distribuídos estão resumidos na tabela 7.

Tabela 7 – Pinos utilizados

Arduino Mega 2560	
circuito	pinos
Display	05 ao 10
Sensor de Corrente	A1
Sensor de Temperatura	A0
PWM	11
Módulo Relé	20
Teclado Matricial	22 ao 30
Módulo HX711	03 e 04

Fonte: Autor

4.4 Bibliotecas de programação

Na etapa de programação foram testados vários meios para determinar as grandezas com a maior precisão possível, e para algumas delas foram usadas bibliotecas auxiliares que possibilitaram uma melhor qualidade nas medidas obtidas.

A tabela 8 mostra as bibliotecas utilizadas para o desenvolvimento do projeto.

Tabela 8 – Bibliotecas auxiliares

Dipositivos	Bibliotecas
Módulo HX711	HX711
Display LCD	LiquidCrystal
Sensor de Corrente	Robojax_AllegroACS_Current_Sensor

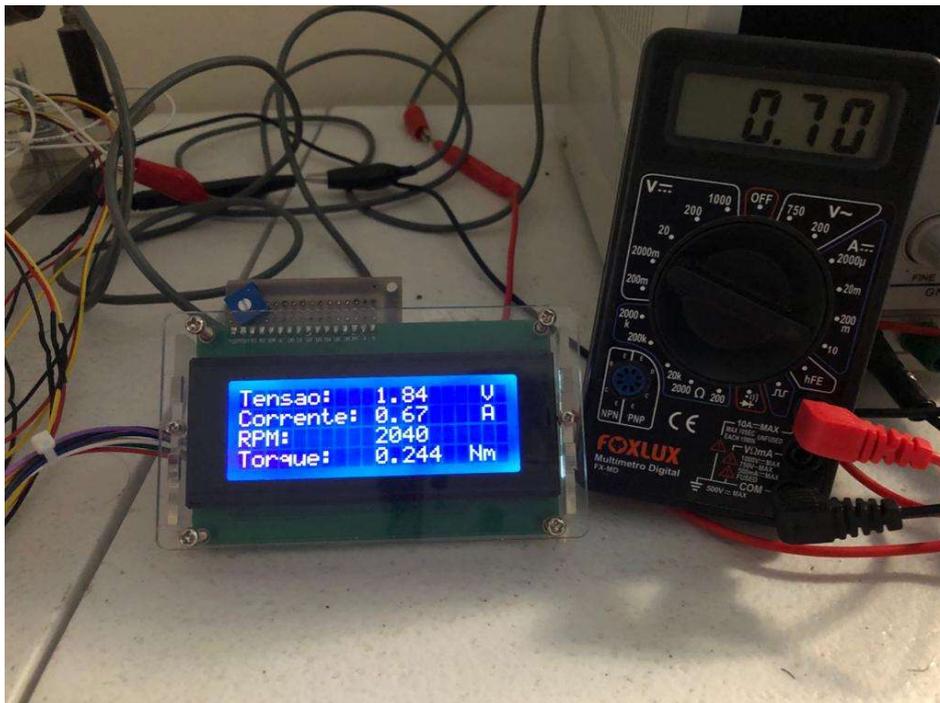
Fonte: Autor

4.5 Medição de Corrente

Como se pode ver no gráfico da Figura 19 no item 3.3.2, para uma corrente de -20A, a tensão de saída no sensor será de 0,5Vcc, e para uma

corrente de 20A, a saída será de 4,5Vcc. Como foi utilizada apenas a parte positiva do gráfico (não se utilizam as correntes negativas neste projeto), deve-se observar que para uma corrente nula, temos 2,5Vcc na saída do sensor. É necessário realizar um ajuste de *offset*, que se obtém internamente na biblioteca, através da declaração do modelo de sensor utilizado no código da biblioteca correspondente (tabela 8), para que a leitura seja feita corretamente.

Figura 43 – Comparação entre o sensor de corrente e um amperímetro comercial



Fonte: Autor

O cálculo para atingir o valor de corrente mais próximo de um amperímetro comercial como visto na Figura 43, está dentro da biblioteca auxiliar de programação citada na tabela 8 no item 4.4.

4.6 Tensão aplicada no motor

Como citado anteriormente, para determinar o valor da tensão elétrica aplicada no motor não foi utilizado nenhum sensor. A queda de tensão é determinada por método de cálculo em que se leva em consideração a tensão

média devido a modulação PWM, então para se obter valor da tensão estabelecemos a seguinte formula:

$$Tensão = \left(\frac{duty\ cycle \cdot 36}{255} \right) \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

- **Duty cycle:** é o valor entre 0 e 255, essa faixa determina a porcentagem em que está operando o módulo;
- **36:** é o valor da tensão da fonte de alimentação em Volts (V);
- **255:** é o valor onde a saída do Arduino permanece sempre em nível alto;

4.7 Medição da temperatura

O sensor LM35 foi instalado no espaço entre o motor e a placa de acrílico, acomodar o sensor no corpo do motor se tornou inviável devido ao aquecimento do corpo do motor, este aquecimento comprometeu o adesivo da fita que prendia o sensor causando a sua queda durante o funcionamento do protótipo.

Figura 44 – Sensor de temperatura posicionado abaixo do motor



Fonte: Autor

A distância do sensor para o motor não comprometeu a medição da temperatura.

4.8 Medição da velocidade

O Arduino determina a velocidade do motor de acordo com o número de pulsos gerados pelo sensor, a cada 100 pulsos, o eixo do motor realiza uma revolução. A cada pulso gerado, a interrupção externa presente no código de programação é chamada, a quantidade de pulsos capturada é utilizada no seguinte cálculo para determinar o rpm.

$$rpm = \left(\left(\frac{\text{pulsos}}{100} \right) \cdot 60 \right) \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

- **pulsos:** representa a quantidade de pulsos gerada pelo sensor e capturada pelo Arduino;

- **100**: é a quantidade de ranhuras no disco do encoder;
- **60**: é a base de tempo em segundos;

4.9 Medição do torque

A estimativa do torque utiliza uma célula de carga para transformar a força aplicada em uma medida de massa. Mas para essa transformação ser feita com a maior precisão possível, é necessário realizar a calibração da célula. Primeiro é preciso ter um objeto de massa conhecida e colocá-lo sobre o sensor, e observar o valor lido.

A divisão deste valor pelo peso do corpo conhecido em quilogramas, nos dá o valor de calibração que será informado à biblioteca relacionada à célula de carga.

Para a célula de carga utilizada neste projeto, o valor obtido é 370464, é um valor adimensional que deve ser inserido na programação para efetuar a calibração. Após essa etapa, a balança está calibrada como pode ser visto na Figura 45.

É importante ressaltar que esse valor de calibração obtido serve exclusivamente para essa célula de carga utilizada e para essa montagem específica.

Figura 45 – Célula de carga calibrada



Fonte: Autor

Medir o torque de um motor com o eixo sob rotação oferece dificuldades, então realizar a medição dessa grandeza de maneira experimental requer alguns ajustes construtivos.

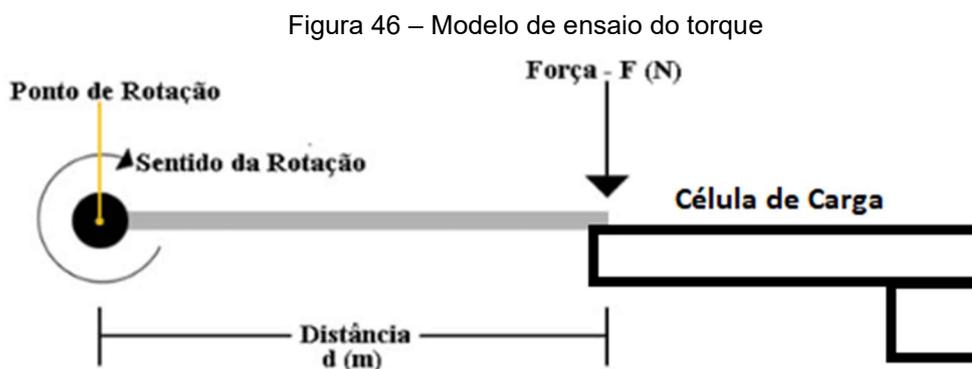
Quando o motor de ensaio, que está apoiado nos mancais é energizado, a corrente que circula pela armadura gera um campo magnético nas bobinas do rotor, este campo magnético interage com o campo dos imãs do estator que estão fixos na carcaça, forçando o corpo do motor a um movimento rotacional.

Conforme o valor da corrente aumenta, a intensidade do campo da armadura também aumenta e por consequência, as forças de atração e repulsão entre os campos da armadura e dos imãs também aumentam.

Para determinar o torque, a haste ou braço de alavanca de comprimento igual a 10cm citada no item 3.2.3, está fixada no corpo do motor, a outra extremidade está apoiada na célula de carga que impede o corpo do motor de girar, esta montagem não interfere nas forças de interação entre os campos magnéticos.

Com isso, uma força perpendicular a célula de carga é aplicada, sendo convertida em torque seguindo alguns cálculos.

O modelo que representa o ensaio do torque é representado na Figura 46.



Fonte: Adaptado pelo Autor

Admitindo o ponto de rotação como o corpo do motor, a distância $d = 0,1\text{m}$, o torque é determinado com a seguinte equação:

$$T = F \cdot d$$

Equação 14

Onde:

- **T:** é o torque em Newton-metro (Nm);
- **F:** é a força aplicada em Newtons (N);
- **d:** é a distância entre o ponto de rotação e o ponto de atuação da força em metros (m);

A força **F** que é aplicada na célula de carga, corresponde a força peso. As balanças digitais convencionais determinam a massa de um objeto a partir dela, e é dada por:

$$F = m \cdot g$$

Equação 15

Sendo que:

- **F:** é a força peso em Newtons (N);
- **m:** é a massa do corpo em quilogramas (kg);
- **g:** é aceleração da gravidade aproximada para 10m/s²;

Portanto, podemos dizer que o Torque do motor é estimado com a seguinte fórmula.

$$T = m \cdot g \cdot d$$

Equação 16

O torque então é uma grandeza física que consiste na ação de girar ou torcer um corpo em torno do seu eixo de rotação por meio de uma força.

A Figura 47 representa a montagem do sistema de medição do torque.

Figura 47 – Sistema de medição do torque



Fonte: Autor

3.10 Sistema de frenagem

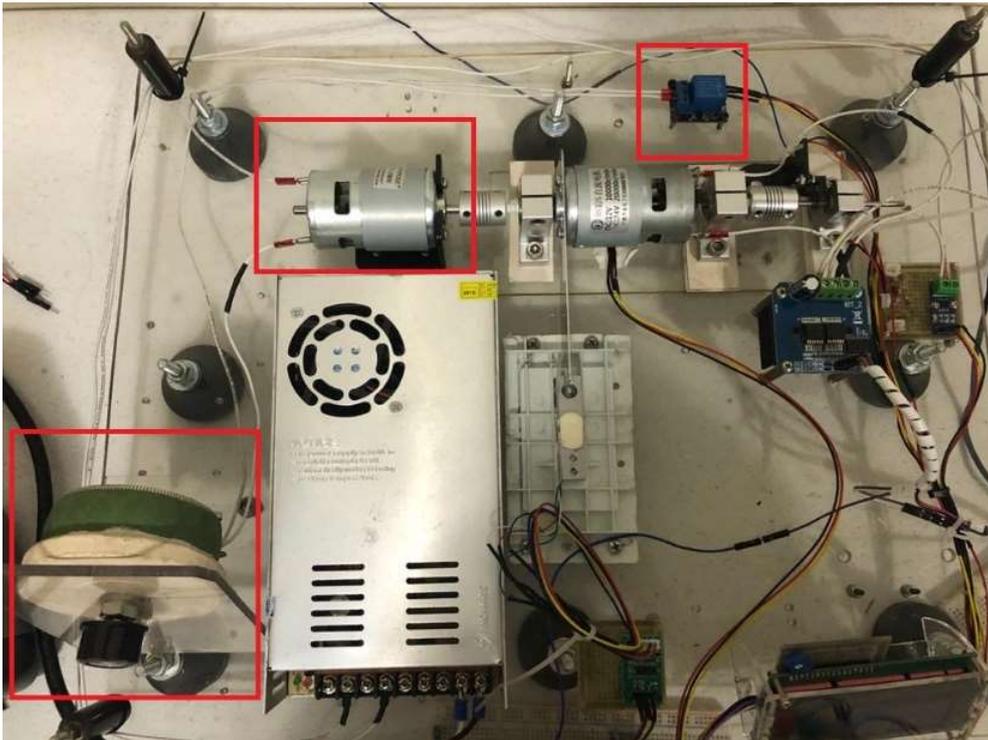
Para mensurar o torque dinâmico do motor, é necessário uma carga variável, e o conjunto que forma esse sistema é composto pelo gerador, módulo relé e o reostato.

Quando a tecla (*) do teclado é pressionada, o reostato é inserido no circuito do gerador, e com isso uma corrente elétrica começa a circular. A corrente magnetiza a armadura criando um freio magnético no gerador, como o gerador está acoplado mecanicamente ao motor, a perda de velocidade é sensibilizada pelo Arduino através do encoder.

Se o modo de operação for manual, o aumento de velocidade é feito através de comandos, se o modo for o automático, a correção da velocidade é realizada pelo Arduino referenciado pelo *set point* de velocidade desejado.

Na Figura 48 os componentes do sistema de frenagem estão destacados em vermelho.

Figura 48 – Sistema de frenagem



Fonte: Autor

5 PROTÓTIPO E RESULTADOS

Este capítulo apresenta o protótipo final, testes e a análise dos dados obtidos pela leitura dos sensores.

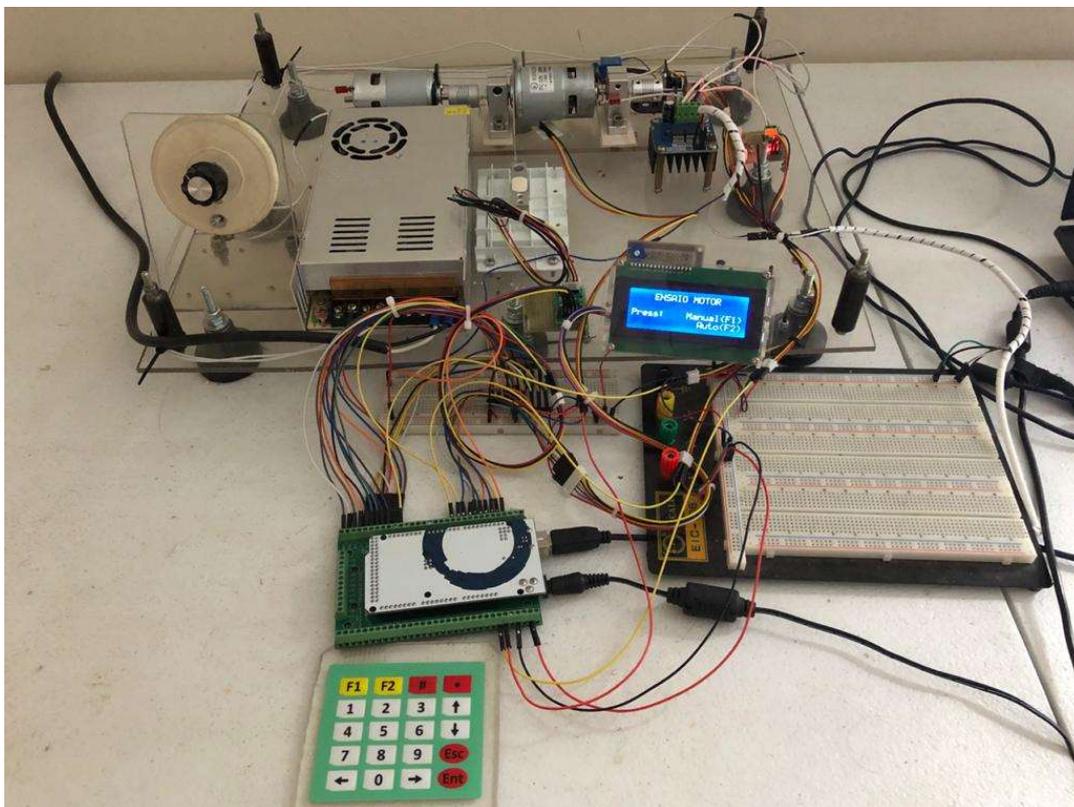
5.1 Protótipo da estação de ensaio

O protótipo foi projetado para que se tenha espaço suficiente para que em futuras melhorias possa acomodar além dos motores, circuitos de controle, fonte de alimentação a placa central de controle.

Dessa maneira a estação poderá ser deslocada entre ambientes e colocada sobre mesas ou bancadas que proporcionem boas condições para os ensaios.

No estágio atual, o protótipo não contempla uma placa central de controle, suas ligações foram feitas através de cabos e protoboard.

Figura 49 – Protótipo da estação de ensaio



Fonte: Autor

5.2 Métricas utilizadas

As métricas utilizadas foram criadas para facilitar o estudo dos dados obtidos durante as leituras.

As métricas selecionadas para a análise consistiram em fixar uma variável como referência, no caso a tensão aplicada no motor, e que a cada incremento manual de aproximadamente 0,5Vcc, as demais variáveis eram coletadas também manualmente.

Esse padrão possibilita a criação de gráficos em pares de variáveis onde

é possível analisar o comportamento do motor em um intervalo determinado de medições.

A partir de algumas das variáveis coletadas, outras grandezas como rendimento, potência gerada, potência consumida e velocidade angular puderam ser calculadas e analisadas.

Tais métricas possibilitam compreender também como cada grandeza se comporta uma em relação a outra.

5.3 Testes e coleta de dados

Os testes foram realizados com o motor sob esforço através de uma carga, composta por gerador e reostato.

As leituras das variáveis foram coletadas a cada incremento de 0,5Vcc aplicado no motor até o limite de 10Vcc, devido ao aquecimento gerado e o crescimento da corrente consumida, os dados foram preenchidos na tabela 9.

Como o motor é de pequeno porte, apenas para uma melhor visualização dos gráficos, o torque é demonstrado em Newton-centímetros (Ncm), mas para os cálculos das grandezas a partir das equações demonstradas, a unidade utilizada é a definida pelo Sistema Internacional que é o Newton-metro (Nm).

Tabela 9 – Grandezas eletromecânicas coletadas

Tensão (V)	Corrente (A)	RPM	Temperatura (°C)	Torque (Ncm)
0	0	0	26,15	0
0,56	0,18	220	26,45	0,34
0,99	0,36	350	27	0,879
1,55	0,55	620	28,2	1,215
1,98	0,82	1020	28,9	1,425
2,54	1,23	1680	29,15	1,608
2,96	1,61	2280	29,32	1,705
3,53	2,04	2640	30,72	1,894
3,95	2,26	3000	31,4	1,994
4,52	2,6	3420	32,65	2,143
4,94	2,9	3840	33,88	2,239
5,51	3,15	4440	34,55	2,421
5,93	3,53	4980	34,9	2,592
6,49	3,9	5400	36,62	2,725
6,92	4,25	5220	38,75	2,825
7,48	4,28	4880	39,45	2,978
7,91	4,31	4250	41,75	3,114
8,47	4,34	4020	42,2	3,171
9,04	4,36	3920	42,82	3,238
9,46	4,38	3740	43	3,324
10	4,65	3350	43,5	3,338

Fonte: Autor

A partir destas variáveis, outras grandezas puderam ser calculadas como a potência consumida pelo motor, a potência mecânica gerada, velocidade angular, e o rendimento.

Tabela 10 – Grandezas eletromecânicas calculadas

ω (rad/s)	Potência Consumida (W)	Potência Mecânica (ω*Torque (Nm)) = (W)	Rendimento (η) = (%)
0,000	0,000	0,000	0,000
23,027	0,101	0,078	77,669
36,633	0,356	0,322	90,350
64,893	0,853	0,788	92,487
106,760	1,624	1,521	93,701
175,840	3,124	2,828	90,503
238,640	4,766	4,069	85,379
276,320	7,201	5,234	72,675
314,000	8,927	6,261	70,137
357,960	11,752	7,671	65,275
401,920	14,326	8,999	62,816
464,720	17,357	11,251	64,822
521,240	20,933	13,511	64,542
565,200	25,311	15,402	60,850
546,360	29,410	15,435	52,481
510,773	32,014	15,211	47,512
444,833	34,092	13,852	40,631
420,760	36,760	13,342	36,296
410,293	39,414	13,285	33,707
391,453	41,435	13,012	31,403
350,633	46,500	11,704	25,170

Fonte: Autor

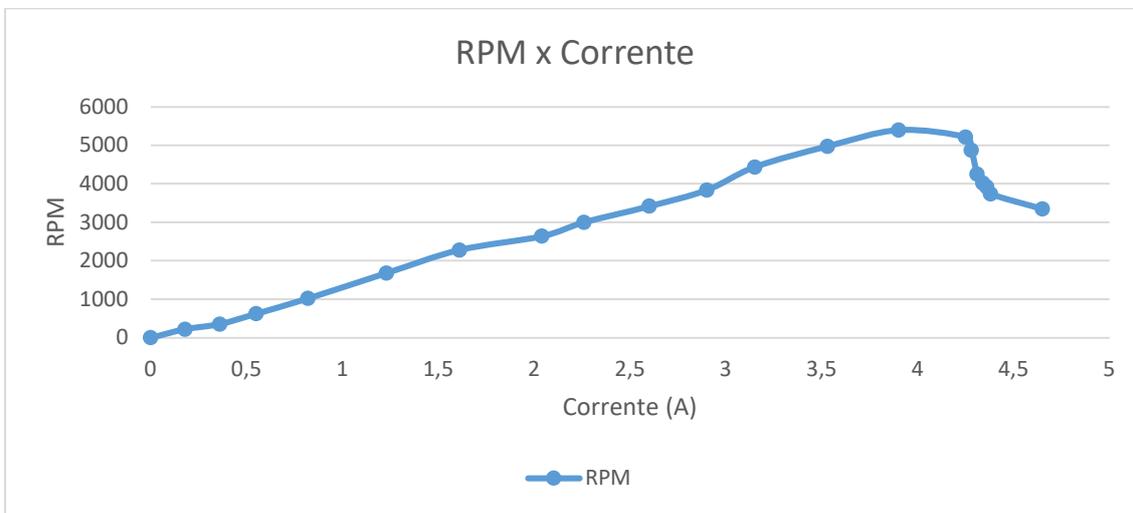
5.4 Análise dos dados

Para uma melhor compreensão dos dados coletados foram desenvolvidos gráficos no plano cartesiano que possibilitaram a visualização de como as grandezas se comportam e se relacionam durante a etapa de teste.

O primeiro gráfico da Figura 50 mostra a relação entre a velocidade (rpm)

e a corrente.

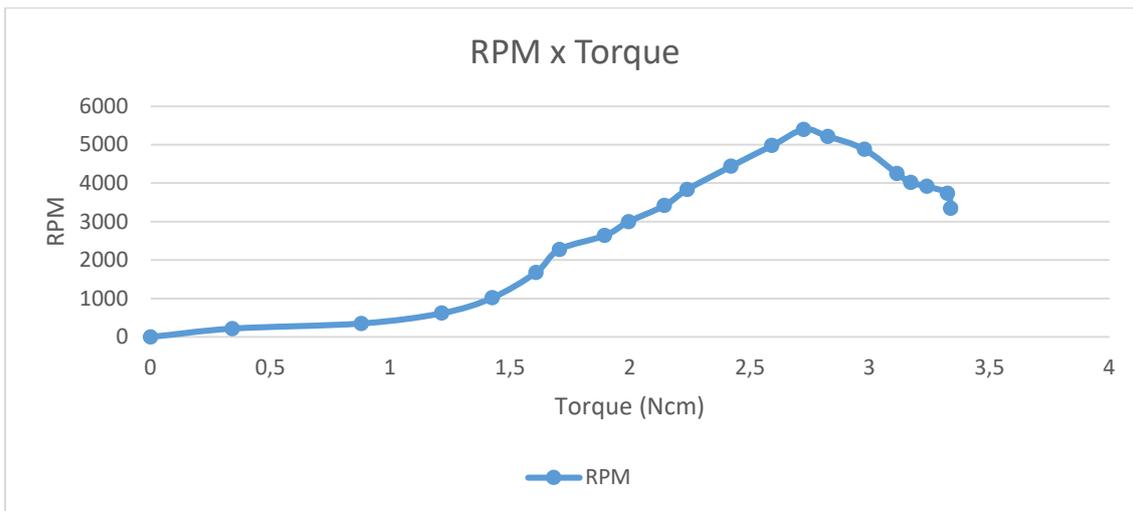
Figura 50 – RPM em função da corrente



Fonte: Autor

Com o aumento da corrente, houve um aumento da velocidade até atingir o ápice de 5400 rpm como visto na tabela 9, após atingir esse valor, a velocidade começou a diminuir devido a um aumento do torque como pode ser visto no gráfico da Figura 51.

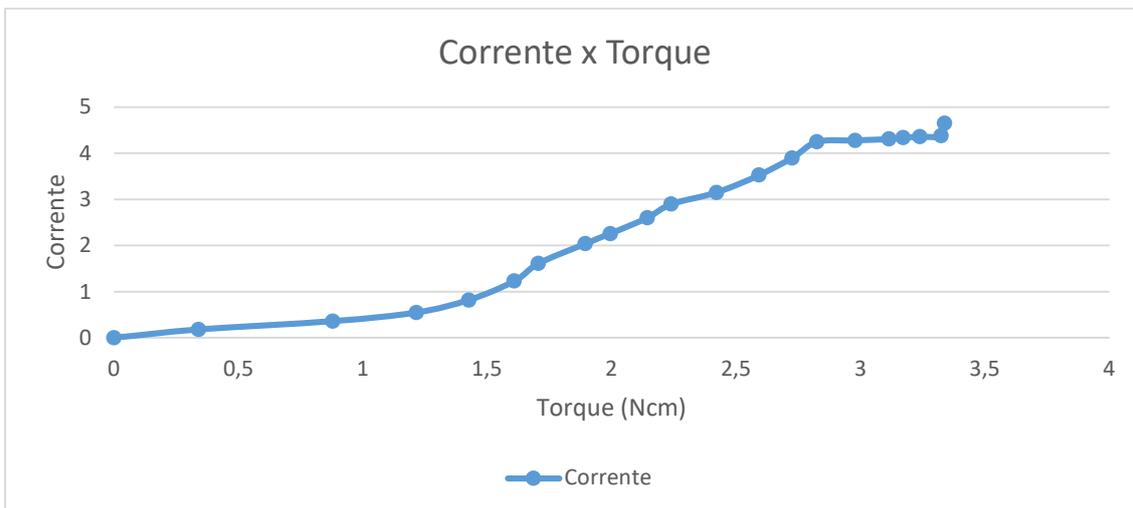
Figura 51 – RPM em função do torque



Fonte: Autor

É possível perceber uma semelhança entre os gráficos, já que o valor da corrente também aumenta com o crescimento do torque, como é possível perceber pelo gráfico da Figura 52.

Figura 52 – Corrente em função do torque

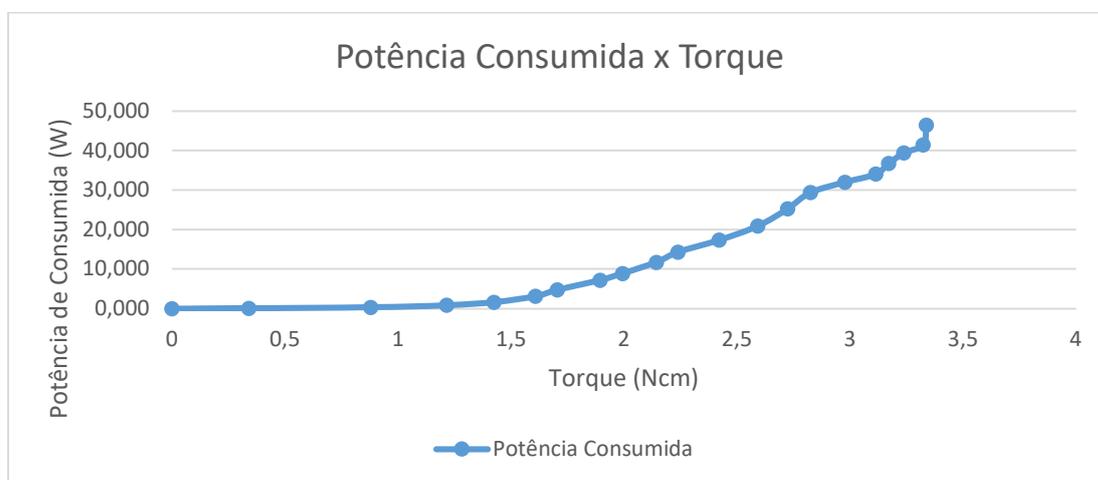


Fonte: Autor

A partir da tensão aplicada e a corrente consumida pelo motor, foi possível calcular a potência consumida.

O gráfico da potência em função do torque está apresentado na Figura 53.

Figura 53 – Potência consumida e função do torque

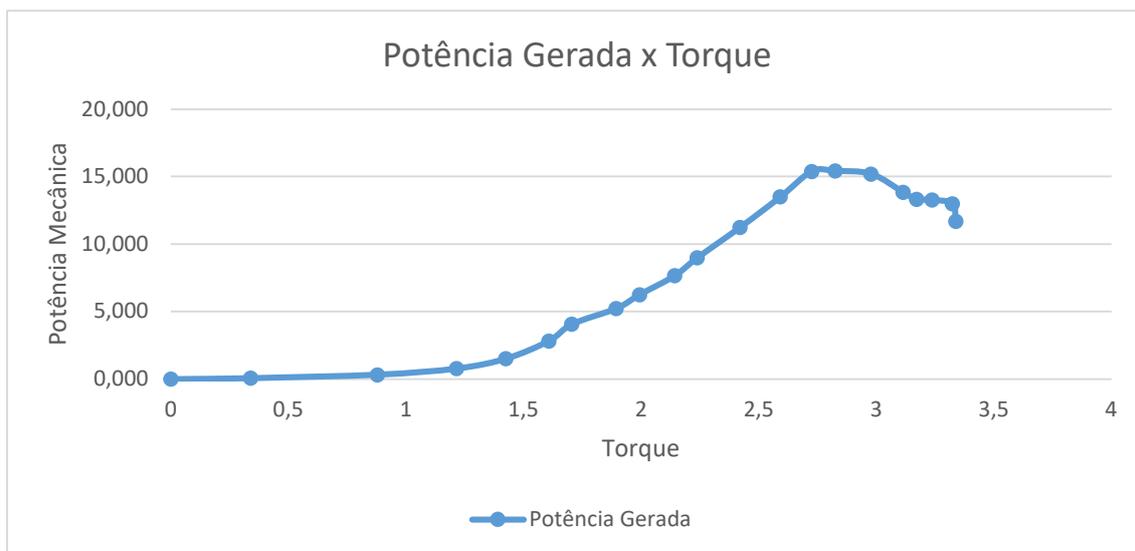


Fonte: Autor

A potência consumida pelo motor apresenta uma tendência de subida já que a tensão aplicada no motor e a corrente que por ele circula, são crescentes.

O próximo gráfico apresenta a potência mecânica gerada em função do torque.

Figura 54 – Potência mecânica em função do torque

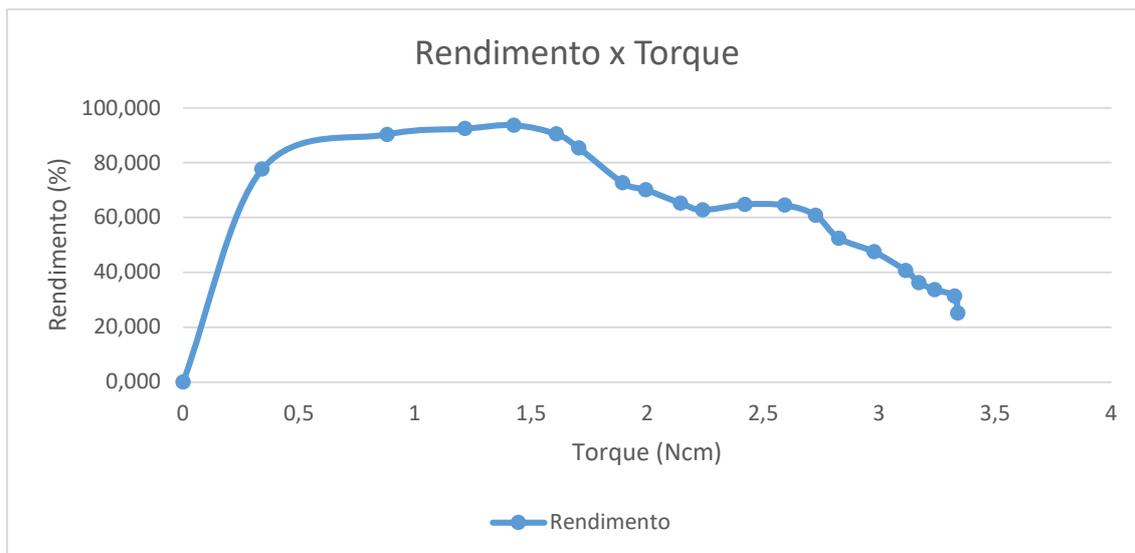


Fonte: Autor

A potência gerada, que é a potência que o motor fornece ao sistema, apresenta uma tendência de subida, até o momento em que a velocidade do motor começa a diminuir, como são diretamente proporcionais, a potência também decai.

Uma das grandezas mais importantes de um motor é o seu rendimento, que é a porcentagem da energia elétrica ativa consumida que é efetivamente convertida em trabalho e disponibilizada no eixo na forma da energia mecânica.

Figura 55 – Rendimento do motor em função do torque

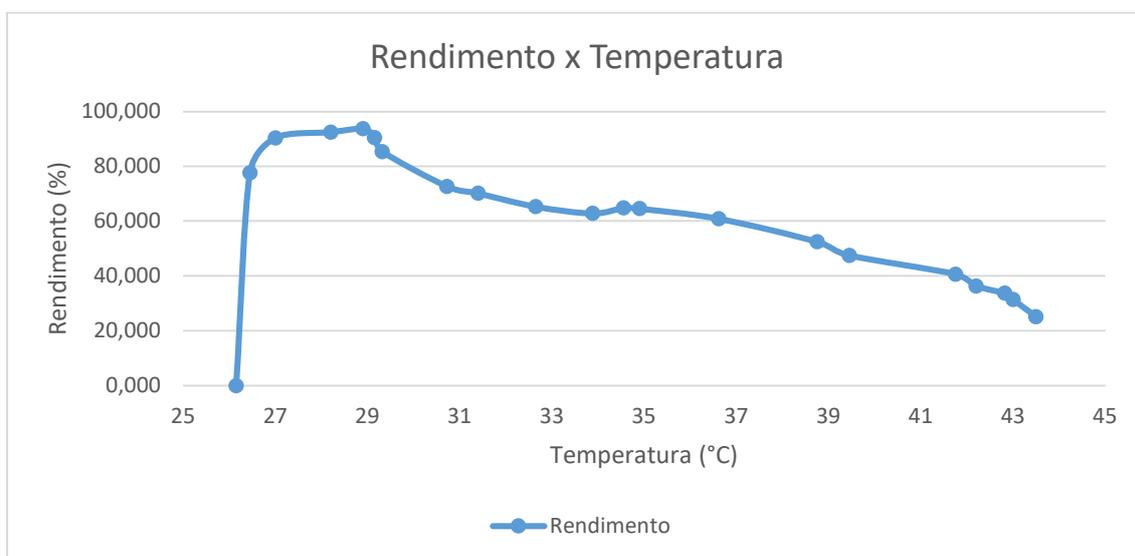


Fonte: Autor

Importante citar que o rendimento do motor nunca será igual ou superior a 100%, devido as perdas do sistema, principalmente na forma de calor.

A temperatura é uma grandeza muito importante a ser medida e controlada, pois interfere diretamente na eficiência do sistema, por isso dispositivos que estão sujeitos a dissiparem calor necessitam de um bom sistema de refrigeração.

Figura 56 – Rendimento do motor em função da temperatura

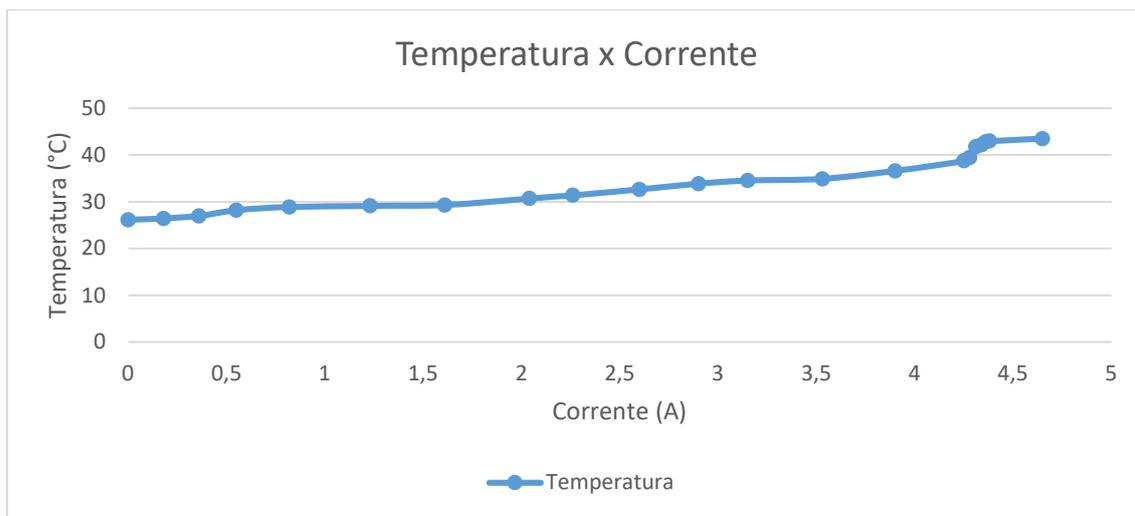


Fonte: Autor

O gráfico da Figura 56 apresenta um comportamento semelhante ao da Figura 55, porque o torque está relacionado com a corrente, que é a grandeza que gera calor nos enrolamentos das bobinas do motor.

O gráfico da Figura 57 apresenta a relação da temperatura em função da corrente.

Figura 57 – Temperatura em função da corrente



Fonte: Autor

5.5 Limitações encontradas

As principais limitações encontradas durante o desenvolvimento do trabalho foram os aspectos construtivos do sistema de suporte do motor.

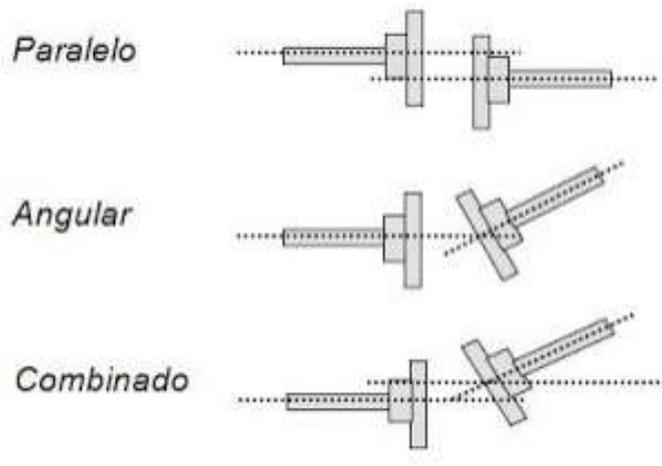
Para um bom funcionamento de um sistema que utilize motores elétricos independente do porte, é importante que os elementos estejam bem alinhados.

O desalinhamento é uma divergência entre as linhas de centro dos eixos acoplados, pode ser paralelo, que ocorre quando as linhas de centro dos eixos são paralelas mas não se encontram no ponto de transferência de carga, pode ser angular, que ocorre quando as linhas de centro entre os dois eixos se cruzam no ponto de transferência de carga, mas não são paralelas entre si, e existe o desalinhamento misto, muito comum em máquinas rotativas, que é uma

combinação dos dois primeiros tipos.

A figura 58 apresenta os três tipos de desalinhamento.

Figura 58 – Tipos de desalinhamento



Fonte: <http://tecmecanica2.blogspot.com/2014/09/alinhamento.html>
<Acessado em 17/11/2020 às 21:00 h>

No protótipo, foi observado a combinação dos desalinhamentos angular e paralelo, por falta de equipamentos para ajustar estes alinhamentos.

O desalinhamento provoca forças de reações nos mancais, eixos e acoplamentos, essas forças provocam efeitos secundários como empenamento dos eixos dos rotores ou em determinados casos, quebras.

A alta carga aplicada nos mancais provoca um aumento no consumo de energia pelo motor acionador, a partir disso, a temperatura do motor tende a aumentar consideravelmente, sendo transmitida da sua carcaça para os eixos, mancais e todos os dispositivos que fazem parte do sistema mecânico.

Essa condição leva a um comprometimento do sistema, interferindo na qualidade dos testes.

Como o protótipo da estação foi feito artesanalmente, é muito difícil manter o sistema alinhado e nivelado, devido ao fato dos mancais e suportes não possuírem as mesmas dimensões.

Foi possível verificar os efeitos prejudiciais nos testes devido ao aumento da temperatura e do consumo de energia, e o valor máximo da velocidade obtida

durante os testes ser inferior aos níveis especificados pelo fabricante. Dessa forma evitou-se atingir níveis maiores de velocidade para não forçar o motor e ocasionar possíveis danos ao componente.

6 CONCLUSÃO

O objetivo geral do projeto de TCC foi o desenvolvimento de um protótipo de uma estação de ensaio para motores de corrente contínua de ímãs permanentes de baixa potência, de modo que fosse possível monitorar as suas grandezas durante os ensaios .

O desenvolvimento envolveu tecnologia de sensores de temperatura, corrente, massa e velocidade. A unidade de controle utiliza a plataforma Arduino Mega 2560 que possui um microcontrolador de 8 bits de arquitetura RISC avançada da ATMEL Atmega2560. Importante citar que inicialmente o projeto foi desenvolvido com a utilização de um microcontrolador PIC 16F877A porém, pelas dificuldades encontradas para estabelecer uma comunicação eficaz entre o microcontrolador PIC e a célula de carga, a central de controle foi migrada para o microcontrolador Arduino, por oferecer bibliotecas que solucionaram estas dificuldades. Para dimensionar o torque dinâmico foi utilizado um sistema de gerador e reostato como um sistema de freio magnético.

O protótipo atendeu os resultados com algumas limitações. O sistema realizou as medições das grandezas de modo que houve uma correspondência lógica entre elas, porém como é um sistema que contém motores e gera movimento, o desbalanceamento interferiu no alcance de velocidades mais elevadas devido ao aumento da corrente e por consequência, a elevação da temperatura, sendo distribuída por condução para todo sistema de acoplamento.

Foi possível também, compreender a relação entre as grandezas eletromecânicas responsáveis e resultantes do funcionamento do motor através dos gráficos de desempenho.

É possível utilizar o mesmo princípio de funcionamento para outros tipos de motores, sendo o balanceamento do sistema um ponto crítico para resultados

mais satisfatórios.

7 APLICAÇÕES FUTURAS

Durante o desenvolvimento do projeto e a etapa de testes e ensaios, foi constatado que alguns recursos podem ser implementados para futuras melhorias e alcançar resultados mais satisfatórios. São eles:

- Um sensor de temperatura que permita uma leitura mais precisa;
- Implementação de uma interface IHM para que todo acionamento da estação e visualização das grandezas possam ser feitos em um único componente;
- Desenvolvimento de um sistema supervisório para o monitoramento contínuo das variáveis e aquisição de dados;
- Implementação de um sistema de controle PID;
- Utilizar motores de corrente contínua sem ímãs permanentes, para que o campo magnético do estator possa ser controlado;
- Controle do balanceamento do sistema de eixos do motor e gerador;

8 REFERÊNCIAS

[1] **WEG Guia de Especificação Mototres Elétricos**, Jaraguá do Sul – SC, mar 2020. Disponível em: <http://www.weg.net>. Acesso em: 18 mar 2020

[2] CHAPMAN; Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas** 5ª edição, Mc Graw Hill, 2013.

[3] HUGHES; Austin. DRURY: Bill. **Electric Motors and Drivers Fundamentals, Types and Applications** 4ª edição, Reino Unido, Elsevier, 2013.

[4] **Momento ou Torque de uma força**; por Frederico Borges de Almeida; disponível em: [https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/momento-ou-torque-uma-forca.htm#:~:text=A%20grandeza%20f%C3%ADsica%20associada%20ao,for%C3%A7a%20ao%20ponto%20\(polo\)](https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/momento-ou-torque-uma-forca.htm#:~:text=A%20grandeza%20f%C3%ADsica%20associada%20ao,for%C3%A7a%20ao%20ponto%20(polo).).

[5] BORGES, J. C. S.; SOBRINHO, C. A. N.; FILHO, A. C. L.; BELO, F. A. *Métodos e Técnicas de Medição de Torque Diretamente em eixos rotativos*. Revista Principia. Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB. João Pessoa, 2015

[6] OLIVEIRA, Gustavo C.: *Acionamentos de Motores: PWM e Ponte H*. Warthog Robotics. Grupo de pesquisa, desenvolvimento e extensão da USP. Universidade de São Paulo, 2014, disponível em: <https://docplayer.com.br/19060122-Acionamento-de-motores-pwm-e-ponte-h.html>.

[7] **Controle de velocidade de motor de corrente contínua com o uso do arduíno e interfaceamento LABVIEW** disponível em:

https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2016/ceel2016_artigo157_r01.pdf

[8] MAIMON; Felipe. Projeto de um Sistema Eletrônico para o Controle de Motores de Alta Potência; PUC; Rio de Janeiro; disponível em: http://meggi.usuarios.rdc.puc-rio.br/teses/TFC04_Felipe_Maimon.pdf

[9] CARVALHO; Geraldo. Máquinas Elétricas Teoria e Ensaio, 4ª edição, São Paulo: Érica, 2011.

[10] <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/5453-mec127>

ANEXO A: Código Fonte

```

//--- BIBLIOTECAS ---
#include <HX711.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include <Robojax_AllegroACS_Current_Sensor.h>
LiquidCrystal lcd(10, 9, 8, 7, 6, 5);
//(10(RS), 9(E), 8(D4), 7(D5), 6(D6), 5(D7))
//=====
// --- MAPEAMENTO DE HARDWARE ---
#define col_1 22 //coluna 1 do teclado
#define col_2 23 //coluna 2 do teclado
#define col_3 24 //coluna 3 do teclado
#define col_4 25 //coluna 4 do teclado
#define linha_1 26 //linha 1 do teclado
#define linha_2 27 //linha 2 do teclado
#define linha_3 28 //linha 3 do teclado
#define linha_4 29 //linha 4 do teclado
#define linha_5 30 //linha 5 do teclado
#define Brake 20 //pino que ativa o módulo
relé
#define DOUT 3 //pino de saída do módulo HX711
#define SCK 4 //pino de clock do módulo HX711
#define escala 370464.0f //medida de calibração da tara da célula de carga
#define Encoder 2 //pino que recebe os pulsos do encoder
#define pwm_motor 11 //pino de saída do
pwm
//=====
//---INSTÂNCIANDO OBJETOS---
HX711 scale;
//=====
// --- PROTÓTIPO DAS FUNÇÕES ---
void teclado();
void corrente_tensao_motor();
void temperatura_motor();
void torque();
void Show_display();
void Set_rpm();
void Desliga();
void rpm();
void automatico();
//=====
// --- VARIÁVEIS GLOBAIS ---
int rpm_set[5] = {0,0,0,0,0};
volatile int pulsos = 0x00;
int rpm_total = 0x00;
int rpm_total_auto;
int tempo = 0x00;
char control = 0x01;
unsigned int duty = 0x00;
unsigned char cont, counter, counter2, butt, a3 = 0x00;
bool flagb0, flagb1, flagb2, flagb3, flagb4, flagb5, flagb6, flagb7, flagb8, flagb9 = 0x00;
bool flagF1, flagL, flagF2, flagH, flagR, flagA, flagU, flagD, flag_off, flagSet = 0x00;
bool TRUE, TRUE3, F1, F2, OFF, flag_clear, menos, mais, slowdown = 0x00;
bool TRUE2 = 0x01;
bool flag_control = 0x01;
unsigned char character = 0x00;
float medida, Torque = 0x00;
float temperatura = 0x00;

```



```

pinMode(col_1, OUTPUT);
pinMode(col_2, OUTPUT);
pinMode(col_3, OUTPUT);
pinMode(col_4, OUTPUT);
pinMode(linha_1, INPUT);
pinMode(linha_2, INPUT);
pinMode(linha_3, INPUT);
pinMode(linha_4, INPUT);
pinMode(linha_5, INPUT);
digitalWrite(col_1, HIGH);
digitalWrite(col_2, HIGH);
digitalWrite(col_3, HIGH);
digitalWrite(col_4, HIGH);
digitalWrite(linha_1, HIGH);
digitalWrite(linha_2, HIGH);
digitalWrite(linha_3, HIGH);
digitalWrite(linha_4, HIGH);
digitalWrite(linha_5, HIGH);
}
void loop() {
  lcd.setCursor(4, 0);
  lcd.print("ENSAIO MOTOR");
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("Press: Manual(F1)");
  lcd.setCursor(12, 3);
  lcd.print("Auto(F2)");
  if(F1 == 0x01){
    TRUE = 0x01;
    TRUE2 = 0x00;
    lcd.clear();
    while(TRUE){
      TRUE
      corrente_tensao_motor();
      temperatura_motor();
      torque();
      analogWrite(pwm_motor, duty);
      Show_display();
      Show_display
      if(tempo >= 0x01){
        tempo = 0x00;
        rpm();
        if(OFF)Desliga();
      }
    }
  }
  else if (F2 == 0x01){
    TRUE = 0x00;
    TRUE2 = 0x01;
    duty = 0x00;
    lcd.clear();
    while(TRUE2){
      Set_rpm();
      if(flag_clear == 0x1){
        duty = 0x00;
        lcd.clear();
        flag_clear = 0x00;
      }
      else if(OFF)Desliga();
      while(TRUE3){
        corrente_tensao_motor();

```

```

//Define o pino da coluna 1 como saída
//Define o pino da coluna 2 como saída
//Define o pino da coluna 3 como saída
//Define o pino da coluna 4 como saída
//Define o pino da linha 1 como entrada
//Define o pino da linha 2 como entrada
//Define o pino da linha 3 como entrada
//Define o pino da linha 4 como entrada
//Define o pino da linha 5 como entrada
//Inicializa coluna 1 em HIGH
//Inicializa coluna 2 em HIGH
//Inicializa coluna 3 em HIGH
//Inicializa coluna 4 em HIGH
//Inicializa linha 1 em HIGH
//Inicializa linha 2 em HIGH
//Inicializa linha 3 em HIGH
//Inicializa linha 4 em HIGH
//Inicializa linha 5 em HIGH
//Fim da Função principal
//Inicializa void loop
//Posiciona o cursor na coluna 4, linha 0
//Imprime o texto no lcd
//Posiciona o cursor na coluna 0, linha 2
//Imprime o texto no lcd
//Posiciona o cursor na coluna 12, linha 3
//imprime o texto no lcd
//Botão F1 pressionado?
//Variável TRUE igual a 1
//Zera a variável TRUE2
//Limpa o lcd
//looping infinito em

//chama a rotina corrente_tensao_motor
//chama a rotina temperatura_motor
//chama a rotina torque
//Atribui o valor do duty ao PWM
//Chama a rotina

//Se tempo maior ou igual a 1
//Zera a variável tempo
//Chama a rotina rpm
//Se botão ESC pressionado, chama a rotina Desliga
//Fim do if tempo
//Fim do looping infinito TRUE
//Fim do ifV F1
//Se botão F2 pressionado
//Zera a variável TRUE
//Variável TRUE2 igual a 1
//Zera o duty
//Limpa o display de lcd
//Inicia o looping Infinito TRUE2
//Chama a rotina Set_rpm
//Se flag_clear = 1
//Zera a variável duty
//Limpa o display de lcd
//Zera a variável flag_clear
//Fim do if flag_clear
//Se botão ESC pressionado chama a rotina Desliga
//Inicia o looping infinito TRUE3
//Chama a rotina corrente_tensao_motor

```

```

temperatura_motor(); //Chama a rotina temperatura_motor
torque(); //Chama a rotina torque
automatico(); //Chama a rotina automatico
Show_display(); //Chama a rotina Show_display
if(tempo >= 0x01){ //Se tempo maior ou igual a 1
tempo = 0x00; //Zera a variável tempo
analogWrite(pwm_motor, duty); //Atribui o valor do duty ao PWM
rpm(); //Chama a rotina rpm
if(OFF)Desliga(); //Se botão ESC pressionado chama a rotina Desliga
else if(rpm_total > 20000)duty--; //Se rpm_total for maior que 20000, decrementa o duty
} //Fim do if de tempo
} //Fim do looping infinito TRUE3
} //Fim do looping infinito
TRUE2 //Fim do if F2
} //Fim do void Loop
}
//=====
//--- SUBROTINAS ---
void teclado(){ //Função para leitura do teclado
if(digitalRead(col_1) && control == 1){ //Coluna 1 em nível HIGH? Control igual a 1?
control = 0x02; //control igual a 2
digitalWrite(col_1, LOW ); //apenas uma coluna em nível baixo
digitalWrite(col_2, HIGH);
digitalWrite(col_3, HIGH);
digitalWrite(col_4, HIGH);
if(!digitalRead(linha_1) && !flagF1)F1 = flagF1 = 0x01;
else if(!digitalRead(linha_2) && !flagb1){
flagb1 = butt = caracter = 0x01;
}
else if(!digitalRead(linha_3) && !flagb4){
flagb4 = butt = 0x01;
caracter = 0x04;
}
else if(!digitalRead(linha_4) && !flagb7){
flagb7 = butt = 0x01;
caracter = 0x07;
}
else if(!digitalRead(linha_5) && !flagL){
flag_clear = 0x01;
menos = 0x01;
mais = 0x00;
}
else if(digitalRead(linha_1) && flagF1)flagF1 = F1 = 0x00;
else if(digitalRead(linha_2) && flagb1)flagb1 = butt = 0x00;
else if(digitalRead(linha_3) && flagb4)flagb4 = butt = 0x00;
else if(digitalRead(linha_4) && flagb7)flagb7 = butt = 0x00;
else if(digitalRead(linha_5) && flagL)flagL = 0x00;
}
else if(digitalRead(col_2) && control == 2){ //Coluna 2 em nível HIGH? Control igual a 2?
control = 0x03; //control igual a 3
digitalWrite(col_1, HIGH);
digitalWrite(col_2, LOW ); //apenas uma coluna em nível baixo
digitalWrite(col_3, HIGH);
digitalWrite(col_4, HIGH);
if(!digitalRead(linha_1) && !flagF2)F2 = flagF2 = 0x01;
else if(!digitalRead(linha_2) && !flagb2){
flagb2 = butt = 0x01;
caracter = 0x02;
}
}
}
}

```

```

}
else if(!digitalRead(linha_3) && !flagb5){
flagb5 = butt = 0x01;
caracter = 0x05;
}
else if(!digitalRead(linha_4) && !flagb8){
flagb8 = butt = 0x01;
caracter = 0x08;
}
else if(!digitalRead(linha_5) && !flagb0){
flagb0 = butt = 0x01;
caracter = 0x00;
}
else if(digitalRead(linha_1) && flagF2)flagF2 = F2 = 0x00;
else if(digitalRead(linha_2) && flagb2)flagb2 = butt = 0x00;
else if(digitalRead(linha_3) && flagb5)flagb5 = butt = 0x00;
else if(digitalRead(linha_4) && flagb8)flagb8 = butt = 0x00;
else if(digitalRead(linha_5) && flagb0)flagb0 = butt = 0x00;
}
else if(digitalRead(col_3) && control == 3){           //Coluna 3 em nível HIGH? Control igual a 3?
control = 0x04;                                       //control igual a 4
digitalWrite(col_1, HIGH);
digitalWrite(col_2, HIGH);
digitalWrite(col_3, LOW );                             //apenas uma coluna em nível baixo
digitalWrite(col_4, HIGH);
if(!digitalRead(linha_1) && !flagH)flagH = 0x01;
else if(!digitalRead(linha_2) && !flagb3){
flagb3 = butt = 0x01;
caracter = 0x03;
}
else if(!digitalRead(linha_3) && !flagb6){
flagb6 = butt = 0x01;
caracter = 0x06;
}
else if(!digitalRead(linha_4) && !flagb9){
flagb9 = butt = 0x01;
caracter = 0x09;
}
else if(!digitalRead(linha_5) && !flagR){
flag_clear = 0x01;
flagR = mais = 0x01;
menos = flag_control = 0x00;
}
else if(digitalRead(linha_1) && flagH)flagH = 0x00;
else if(digitalRead(linha_2) && flagb3)flagb3 = butt = 0x00;
else if(digitalRead(linha_3) && flagb6)flagb6 = butt = 0x00;
else if(digitalRead(linha_4) && flagb9)flagb9 = butt = 0x00;
else if(digitalRead(linha_5) && flagR)flagR = flag_clear = 0x00;
}
else if(digitalRead(col_4) && control == 4){           //Coluna 4 em nível HIGH? Control igual a 4
control = 0x01;                                       //control igual a 1
digitalWrite(col_1, HIGH);
digitalWrite(col_2, HIGH);
digitalWrite(col_3, HIGH);
digitalWrite(col_4, LOW );                             //apenas uma coluna em nível baixo
if(!digitalRead(linha_1) && !flagA){
flagA = 0x01;
digitalWrite(Brake, !digitalRead(Brake));
}
else if(!digitalRead(linha_2)){

```

```

if(TRUE == 0x01){
duty++;
if(duty >= 0x55)duty=0x55;
}
}
else if(!digitalRead(linha_3)){
if(TRUE == 0x01){
if(duty > 0x00)duty--;
}
}
else if(!digitalRead(linha_4) && !flag_off)flag_off = OFF = 0x01;
else if(!digitalRead(linha_5) && !flagSet)flagSet = butt = 0x01;
else if(digitalRead(linha_1) && flagA)flagA = 0x00;
else if(digitalRead(linha_4) && flag_off)flag_off = OFF = 0x00;
else if(digitalRead(linha_5) && flagSet)flagSet = butt = 0x00;
}
}
void corrente_tensao_motor(){ //Rotina de cálculo da corrente e da tensão
robojax.getCurrent(),2; //Rotina de cálculo da corrente
robojax.getCurrentAverage(300),2; //Rotina de cálculo da média da leitura da corrente
tensao = (duty*36.0)/255.0; //cálculo da tensão em função do duty e da tensão da fonte
} //Fim da
rotina
void rpm(){ //Rotina de cálculo do rpm
detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(Encoder)); //Desabilita a interrupção externa (int.0) pino 2
rpm_total = ((pulsos/100)*60); //Cálculo do rpm
pulsos = 0x00; //Zera a variável pulsos
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(Encoder), ISR_contador, RISING); //habilita a interrupção
externa (int.0) no pino 2, chama a função ISR_contador, na borda de subida
} //Fim da
rotina
void temperatura_motor(){ //Rotina de cálculo da temperatura
int acct, acct_aux = 0x00; //Declaração de variáveis locais
char i = 0x00; //Declaração de variável local
for(i=0; i<50; i++){ //Laço for com 50 iterações
acct_aux = acct_aux + analogRead(temp_ADC); //soma o valor analógico lido
} //Fim do laço for
acct = acct_aux/50; //Cálculo da média do valor analógico
temperatura = (acct*0.489); //Cálculo do valor da temperatura em Celsius
} //Fim da
rotina
void torque(){ //Rotina de cálculo do
Torque
medida=medida*0; //inicia a medida em 0
medida = scale.get_units(5); //cálculo da medida da massa descontando o valor de calibração
da tara
scale.power_down(); //desliga a rotina da escala
delay(1000); //aguarda 1 segundo
scale.power_up(); //liga a rotina da escala
Torque = medida*10*10; //cálculo do torque (medida da massa * 10m/s2 * 10 cm)
if (Torque < 0)Torque = 0; //Se o torque for menor que 0, torque é igual a 0
else if(duty == 0)Torque = 0; //Se duty igual a 0, Torque é igual a zero
} //Fim da
rotina
void Set_rpm(){ //Inicia a rotina do rpm desejado no modo automático
if(butt == 0x00 && cont == 0x00)rpm_total_auto = 0x00; //Nenhum botão pressionado? cont igual
a 0? -> rpm_total_auto igual a 0
else if(butt == 0x01 && cont == 0x00){ //Algum botão numérico pressionado? cont igual a 0?
butt = 0x00; //butt igual a 0
cont = 0x01; //cont igual a 1
}
}

```

```

if(caracter > 0x02)caracter = 0x02; //Se caracter maior que 1? caracter igual a 0
rpm_set[0] = caracter; //rpm_set na posição 0 igual a caracter
} //Fim do if
else if(butt == 0x01 && cont == 0x01){ //Algum botão numérico pressionado? cont igual a 1?
butt = 0x00; //butt igual a 0
cont = 0x02; //cont igual a 2
if(rpm_set[0] == 0x02)caracter = 0x00; //Se rpm_set na posição 0 igual a 1? caracter igual a 0
rpm_set[1] = caracter; //rpm_set na posição 1 igual a 0
} //Fim do if
else if(butt == 0x01 && cont == 0x02){ //Algum botão numérico pressionado? cont igual a 2?
butt = 0x00; //butt igual a 0
cont = 0x03; //cont igual a 3
if(rpm_set[0] == 0x02)caracter = 0x00; //Se rpm_set na posição 0 igual a 1? caracter igual a 0
rpm_set[2] = caracter; //rpm_set na posição 2 igual a caracter
} //Fim do if
else if(butt == 0x01 && cont == 0x03){ //Algum botão numérico pressionado? cont igual a 3?
butt = 0x00; //butt igual a 0
cont = 0x04; //cont igual a 4
if(rpm_set[0] == 0x02)caracter = 0x00; //Se rpm_set na posição 0 igual a 1? caracter igual a 0
rpm_set[3] = caracter; //rpm_set na posição 3 igual a
caracter
} //Fim do
if
else if(butt == 0x01 && cont == 0x04){ //Algum botão numérico pressionado? cont igual a 4?
butt = 0x00; //butt igual a 0
cont = 0x05; //cont igual a 5
if(rpm_set[0] == 0x02)caracter = 0x00; //Se rpm_set na posição 0 igual a 1? caracter igual a 0
rpm_set[4] = caracter; //rpm_set na posição 4 igual a caracter
} //Fim do if
rpm_total_auto = (rpm_set[0]*10000); //Somatória dos valores das posições de rpm_set
rpm_total_auto = (rpm_total_auto + (rpm_set[1]*1000));
rpm_total_auto = (rpm_total_auto + (rpm_set[2]*100));
rpm_total_auto = (rpm_total_auto + (rpm_set[3]*10));
rpm_total_auto = (rpm_total_auto + (rpm_set[4]));
if(flagSet == 0x01 && cont == 0x05){ //Se botão ENTER pressionado? cont igual a 5?
flagSet = 0x00; //flagSet igual a 0
flag_clear = 0x01; //flag_clear igual a 0
TRUE3 = 0x01; //TRUE3 igual a 1
} //Fim do if
lcd.setCursor(2, 0); //Posiciona o cursor na coluna 2 e na linha 0
lcd.print("RPM Maximo: 20000"); //Imprime o texto no
display
lcd.setCursor(0, 2); //Posiciona o cursor na coluna 0 e na linha 2
lcd.print("RPM SET:"); //Imprime o texto no display
lcd.setCursor(9, 2); //Posiciona o cursor na coluna 9 e na linha 2
lcd.print(rpm_total_auto); //Imprime o rpm_total_auto no display
} //Fim da rotina Set_rpm
void automatico(){ //Inicia a rotina de correção do rpm
if(rpm_total<=rpm_total_auto)duty++; //Se rpm_totap é menor ou igual
rpm_total_auto(desejado)? Incrementa o duty
else if(rpm_total>rpm_total_auto)duty--; //Se rpm_total é maior que o rpm_set_auto(desejado)?
Decrementa o duty
else if(rpm_total>2000)duty--; //Se rpm_total ultrapassar o valor máximo de rpm
especificado, decrementa o duty
} //Fim da rotina de correção do rpm
void Desliga(){ //Inicia a rotina Desliga
TRUE = TRUE2 = TRUE3 = 0x00; //Zera as variáveis TRUE, TRUE2, TRUE3 e duty
F1 = F2 = OFF = 0x00; //Zera as variáveis F1, F2 e OFF
cont = tempo = 0x00; //Zera as variáveis cont e tempo
digitalWrite(Brake, LOW); //Atribui nível LOW à saída do relé do freio

```

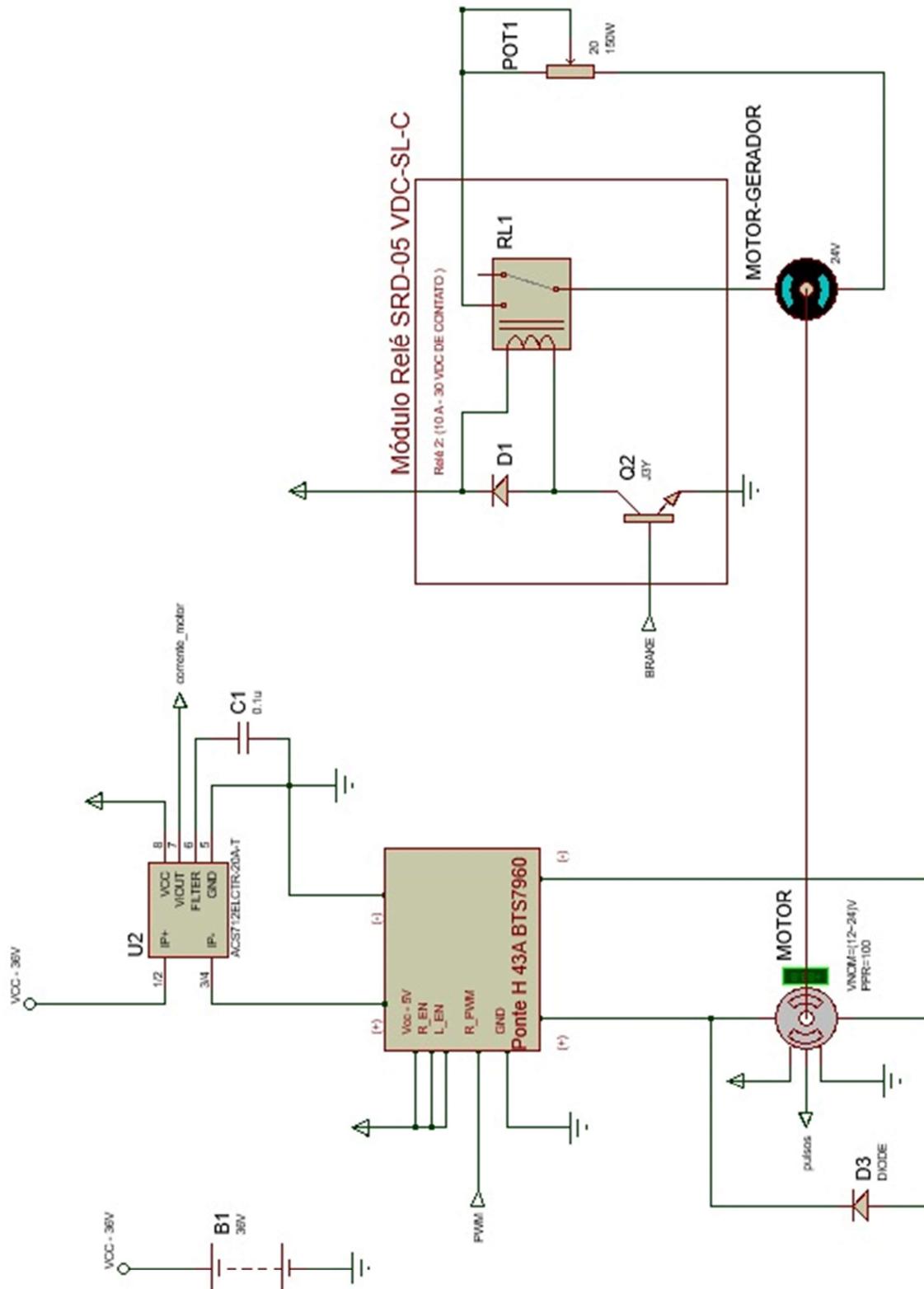
```

rpm_set[0]=rpm_set[1]=rpm_set[2]=rpm_set[3]=rpm_set[4] = 0x00; //Zera as posições do vetor
rpm_set
flag_clear = flag_control = 0x01; //Variáveis flag_clear e flag_control iguais a 1
slowdown = 0x01; //Variável Slowdown(desaceleração) igual a 1
detachInterrupt(0); //Desabilita a Interrupção Externa
lcd.clear(); //Limpa o display de lcd
} //Fim da rotina Desliga
void Show_display(){ //Inicia a Rotina Show_display
if(flag_clear == 0x01){
lcd.clear();
flag_clear = 0x00;
delay(1000);
}
else if(menos == 0x01 || flag_control == 0x01){ //Se menos igual a 1 ou flag_control igual a 1
lcd.setCursor(0, 0); //Posiciona o cursor na coluna 0 e na linha 0
lcd.print("Tensao: V"); //Imprime o texto no display de lcd
lcd.setCursor(10, 0); //Posiciona o cursor na coluna 10 e na linha 0
lcd.print(tensao); //Imprime o valor da tensao no display lcd
lcd.setCursor(0, 1); //Posiciona o cursor na coluna 0 e na linha 1
lcd.print("Corrente: A"); //Imprime o texto no display de lcd
if(duty == 0){ //Se duty igual a 0?
lcd.setCursor(10, 1); //Posiciona o cursor na coluna 10 e na linha 1
lcd.print("0.00"); //Imprime o texto no display de lcd
} //Fim do if duty igual a 0
else if(duty > 0){ //Se duty maior que 0
lcd.setCursor(10, 1); //Posiciona o cursor na coluna 10 e na linha 1
lcd.print(robjax.getCurrentAverage(300),2); //Imprime o valor da corrente média no display
} //Fim do if do duty
lcd.setCursor(0, 2); //Posiciona o cursor na coluna 0 e na linha 2
lcd.print("RPM: "); //Imprime o texto no display de lcd
lcd.setCursor(10, 2); //Posiciona o cursor na coluna 10 e na linha 2
lcd.print(rpm_total); //Imprime o rpm(rpm_total) no display de lcd
lcd.setCursor(0, 3); //Posiciona o cursor na coluna 0 e na linha 3
lcd.print("Torque: Ncm"); //Imprime o texto no display de lcd
lcd.setCursor(10, 3); //Posiciona o cursor na coluna 10 e na linha 3
lcd.print(Torque,3); //Imprime o Torque com 3 casas decimais no display de lcd
} //Final do if menos igual a 1 ou flag_control igual a 1
else if(mais == 0x01 && menos == 0x00){ //Se mais igual a 1 e menos igual a 0?
lcd.setCursor(0, 0); //Posiciona o cursor na coluna 0 e na linha 0
lcd.print("Temperatura: C"); //Imprime o texto no display de lcd
lcd.setCursor(13, 0); //Posiciona o cursor na linha 13 e na coluna 0
lcd.print(temperatura); //Imprime o valor da temperatura no display de lcd
if(TRUE3 == 0x01){ //Se TRUE3 igual a 0
lcd.setCursor(0, 2); //Posiciona o cursor na coluna 0 e na linha 2
lcd.print("RPM SET:"); //Imprime o texto no display de lcd
lcd.setCursor(9, 2); //Posiciona o cursor na coluna 9 e na linha 2
lcd.print(rpm_total_auto); //Imprime o valor rpm_total_auto no display de lcd
lcd.setCursor(0, 3); //Posiciona o cursor na coluna 0 e na linha 3
lcd.print("RPM:"); //Imprime o texto no display de lcd
lcd.setCursor(9, 3); //Posiciona o cursor na coluna 9 e na linha 3
lcd.print(rpm_total); //Imprime o valor do rpm_total no display
} //Fim do if TRUE3
}
} //Fim do if mais igual a 1 e menos igual a 0
} //Fim da rotina Show_display

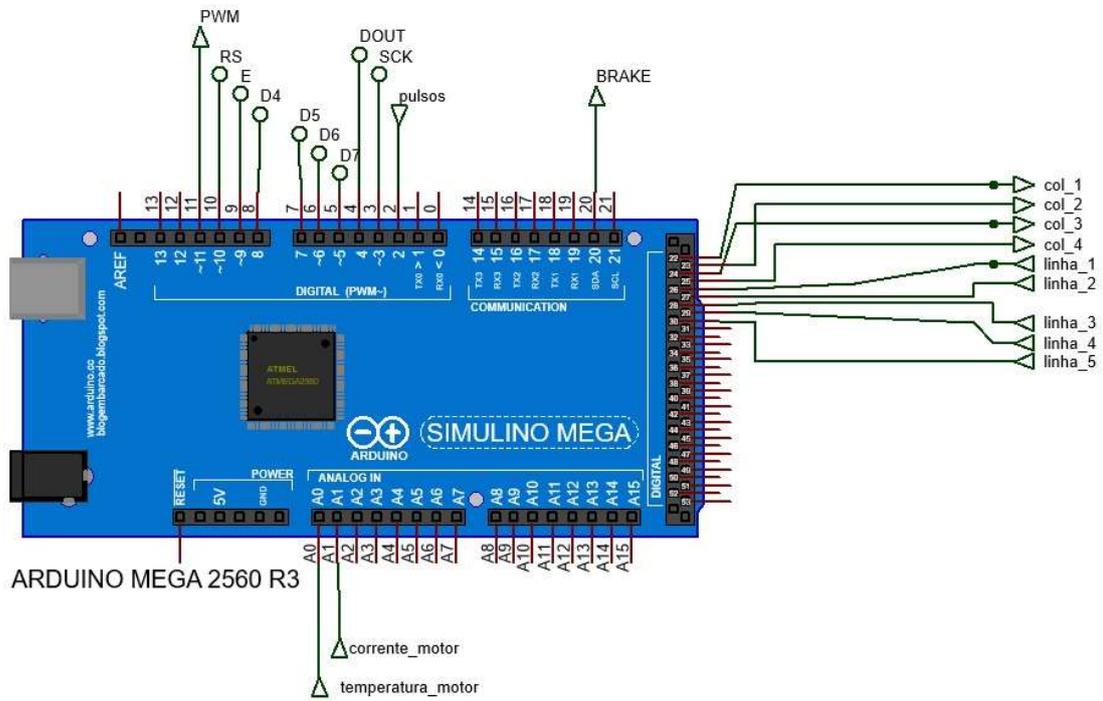
```

ANEXO B: Circuitos Elétricos

- Circuito de potência e freio;



- Circuito de controle – Microcontrolador Arduino Mega 2560;



- Circuito de comando do teclado matricial

