

**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
ANDRÉ LUIZ EUFRÁSIO**

**DISPOSITIVO DE CONTROLE DE PARTIDA DE UM MOTOR DE
CORRENTE CONTINUA**

FORMIGA – MG.

2022

ANDRÉ LUIZ EUFRÁSIO

**DISPOSITIVO DE CONTROLE DE PARTIDA DE UM MOTOR DE
CORRENTE CONTINUA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica do Instituto Federal de Minas
Gerais, como requisito para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof.^a Msc. Mariana
Guimarães dos Santos

FORMIGA – MG.

2022

Eufrásio, André Luiz
E86d Dispositivo de controle de partida de um motor de corrente contínua / André Luiz
Eufrásio -- Formiga : IFMG, 2022.
66p. : il.

Orientador: Profª. MSc. Mariana Guimarães dos Santos
Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga.

1. Acionamento de motores de corrente contínua. 2. Derramador de partida.
3. Sistemas embarcados. I. Santos, Mariana Guimarães dos. II. Título.

CDD 621.3

ANDRÉ LUIZ EUFRÁSIO

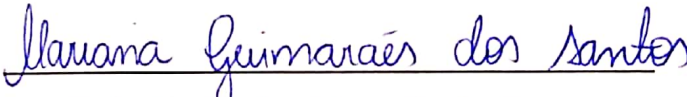
DISPOSITIVO DE CONTROLE DE PARTIDA DE UM MOTOR DE
CORRENTE CONTINUA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica do Instituto Federal de Minas
Gerais, como requisito para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Elétrica.

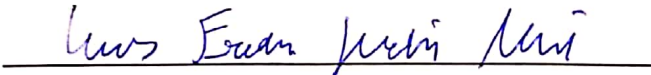
Avaliado em: 08 de setembro de 2022.

Nota: 76,7 pontos.

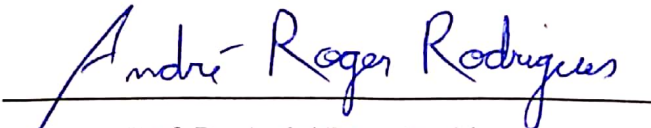
BANCA EXAMINADORA



Prof. Ma. Mariana Guimarães dos Santos



Prof. Dr. Lucas Frederico Jardim Meloni



Prof. Dr. André Roger Rodrigues

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a minha família, a minha avó Maria Cristina, meus pais, meus irmãos, minha esposa e aos muitos amigos que tenho, cada um deles sabe o quão grato sou por tê-los.

Aos meus colegas de classe agradeço pela paciência e parceria, tenho certeza que manteremos esta amizade por toda vida.

Agradeço a toda equipe do IFMG Campus Formiga: vigilantes, cantineiros, faxineiros, técnicos de laboratórios e manutenções, secretários, bibliotecários e professores. Agradeço a cada um de vocês por fazer deste lugar minha segunda casa.

Também agradeço especialmente aos meus professores Ma. Mariana Guimarães dos Santos e Dr. Lucas Frederico Jardim Meloni, foi com a dedicação de vocês que este trabalho pôde ser realizado.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o muito obrigado.

RESUMO

O instante de partida é crítico para todos os tipos de motores, uma vez que neste momento a máquina deve operar com valores de corrente significativamente superiores aos valores de corrente em regime permanente de operação. Neste sentido, este trabalho propõe a elaboração de um dispositivo de controle de partida de motores de corrente contínua. O dispositivo tem o objetivo de controlar os valores de corrente no instante de partida, realizando uma entrega de potência gradativa e garantindo valores máximos de corrente desejáveis estabelecidos em projeto. Todo este processo é controlado e acompanhado por um sistema embarcado, que irá exercer o controle sobre um circuito de partida baseado em variação de valores de resistência de armadura, conhecido como “demarrador de partida”. Além disso, o dispositivo permite a interrupção da operação do motor em caso de riscos. Vale ressaltar que, o protótipo foi construído com o objetivo de ser utilizado no laboratório de máquinas elétricas do Instituto Federal de Minas Gerais Campus Formiga, auxiliando professores e alunos no processo de ensino-aprendizagem.

Palavras-chave: Acionamento de Motores de Corrente Contínua, Demarrador de Partida; Sistemas Embarcados.

ABSTRACT

The starting time is a critical point for all motors since at this moment the machine works with current values significantly higher than the current values in steady state operation. Thus, this work proposes the elaboration of a control device for starting direct current motors. The device controls the soft start and instantaneous design values in order to establish a valid and instantaneous start design reference values, and proposes start design reference instantaneous. The process is controlled and monitored by an embedded system, which train the control over a starting circuit based on the survey of armature resistance values, known as “starting lag”. Furthermore, the device allows an interruption of the motor operation in case of risk to the motor or to the operation. It is worth mentioning that, the prototype was designed to be used in the laboratory classes about electrical machines at Federal Institute of Minas Gerais Campus Formiga.

Keywords: Driving of Direct Current Motors, Starting Resistor; Embedded Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rolo tensor de alimentação de tiras em operação na Usiminas, movimentado por motor de corrente contínua de 325KW.	16
Figura 2 - Máquina elétrica e seus modos de operação.	19
Figura 3 - Matriz elétrica brasileira, (BEN, 2019).....	20
Figura 4 – Aspectos construtivos do motor elétrico CC, rotor e estator motor CC.....	21
Figura 5 – Aspectos construtivos da máquina CC, estator e rotor.....	22
Figura 6 - Enrolamentos de campo-série e campo-shunt.....	23
Figura 7 - Ligação motor CC independente.	24
Figura 8 - Ligação motor CC série.	24
Figura 9 – Ligação motor CC shunt.	25
Figura 10 – Ligação motor CC composto.....	25
Figura 11 – (a) Circuito elétrico equivalente de um motor CC. (b) Circuito elétrico equivalente simplificado sem a queda de tensão nas escovas.	26
Figura 12 – (a) Circuito elétrico equivalente de um motor CC de excitação independente (b) Circuito elétrico equivalente de um motor CC de excitação <i>shunt</i>	27
Figura 13 – Conjugado versus velocidade de um motor CC com efeito da reação de armadura.	28
Figura 14 – Circuito elétrico equivalente de um motor CC série.....	29
Figura 15 – Velocidade do motor CC em função do conjugado.	30
Figura 16– Circuito elétrico equivalente de um motor CC composto (a) composto longo (b) composto curto.....	31
Figura 17 – Conjugado <i>versus</i> velocidade do motor CC composto (a) composto cumulativo (b) composto diferencial.....	32
Figura 18 – Diagrama do fluxo de potência de um motor CC.	33
Figura 19 – Motor CC com técnica de partida e controle Ward-Leonard.	36
Figura 20 – Motor CC em derivação com demarrador de partida em série.	36
Figura 21 – Modelos de amperímetros	38
Figura 22 – Arduino uno.....	39
Figura 23 – Fluxograma.....	40
Figura 24 – Dados de placa da máquina CC.....	41
Figura 25 – Unidade dissipadora 20Ω e 160W.....	42

Figura 26 – Teste de chaveamento relé Ht2150(t90) 12v 6 pinos.	43
Figura 27 – Circuito por unidade de Carga.	44
Figura 28 – Unidade de carga.	44
Figura 29 – Circuito de acionamento da máquina.	45
Figura 30 – Circuito amplificador de tensão	46
Figura 31 – Teste em circuitos amplificadores de tensão.	47
Figura 32 – Placa de medição de corrente.	47
Figura 33 – Teste do protótipo aplicado a máquina CC.	50
Figura 34 – Curva de tensão medida por sensor de corrente na partida da máquina. ..	51
Figura 35– Display LCD em operação.	52
Figura 36 – Circuito para conexão entre fonte, máquina e protótipo.	53
Figura 37 – Protótipo de demarrador de partida.	56
Figura 38 – Curva de tensão medida por sensor de corrente na partida da máquina com demarrador de partida.	57
Figura 39 – Gráfico de corrente de partida da máquina com e sem demarrador de partida.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Corrente resultante em função da variação da impedância.	49
Tabela 2 – Dados de partida da máquina sem carga.....	51
Tabela 3 – Custo estimado do protótipo.....	55
Tabela 4 – Dados de partida da máquina com carga e demarrador de partida.	57

LISTA DE ABREVIATURAS

BEN	Balanço Energético Nacional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
LKT	Lei de Kirchhoff das tensões
RA	Reação de armadura
TCC	Trabalho de conclusão de Curso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO	14
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	17
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	INTRODUÇÃO	19
2.2	MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	21
2.2.1	<i>Princípio de funcionamento</i>	21
2.2.2	<i>Classificação</i>	23
2.2.3	<i>Características e conexão de enrolamentos do motor CC</i>	23
2.3	EQUACIONAMENTO E CURVAS DE TORQUE VERSUS VELOCIDADE 26	
2.3.1	<i>Motor CC com excitação independente e shunt</i>	27
2.3.2	<i>Motor CC série</i>	28
2.3.3	<i>Motor CC composto</i>	30
2.3.4	<i>Diagrama de potência e perdas no motor CC</i>	33
2.4	MÉTODOS DE PARTIDA DE MOTORES CC	34
2.5	DISPOSITIVO PARA MONITORAMENTO	37
2.5.1	<i>Principais grandezas de interesse</i>	37
2.5.2	<i>Sistema de medição de corrente</i>	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO DEMARRADOR	41
3.2	DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE CARGAS	41
3.3	CHAVEAMENTO DO BANCO DE CARGAS	43
3.4	MEDIÇÕES DE CORRENTE	45
3.5	CHAVEAMENTO TEMPORAL DAS UNIDADES DE CARGA	50
3.6	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	52

3.7	DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO.....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
6	REFERÊNCIAS	60
7	ANEXO A – ALGORITMO APLICADO AO PROTÓTIPO.....	63

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

Desde o final do século XIV, o homem enxergou os motores elétricos como uma ferramenta de trabalho indispensável. Atualmente, o desenvolvimento destas máquinas tem sido um desafio especialmente no que tange a projetos de melhorias no controle de operação e na eficiência.

De acordo com Wolff (2004, p.19) a criação e desenvolvimento das máquinas elétricas é um processo que se estende por volta de três séculos, tendo início com a invenção do gerador auto induzido de corrente contínua de Werner Siemens em 1866, data esta considerada como ano de nascimento do motor elétrico.

Segundo El-Sharkawi (2007, p.4) os motores são os dispositivos elétricos mais utilizados no mundo, estando presentes em todas atividades que envolvem movimento mecânico, desde brinquedos infantis a naves espaciais. A título de informação, nos Estados Unidos da América, atividades com motores representam aproximadamente 65% da energia consumida. Quanto à energia gerada em todo o mundo, 99% é produzida através de geradores elétricos.

Considerando o contexto nacional, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2017), aproximadamente 38% da energia elétrica produzida no país é consumida nas Indústrias, sendo que 68% são consumidos por motores elétricos.

Devido à grande representatividade dos motores em relação ao consumo, segundo Brasil (2001) a eficiência destes motores deixou de ser destaque exclusivo dos fabricantes e começou a ser discutida pelo próprio governo, que desde 2001, com a lei 10.295 que regulamenta sobre a eficiência dos motores elétricos fabricados no Brasil. Este aspecto influencia diretamente na escolha adequada dos motores de acordo com aplicação.

Em sua grande maioria, os motores industriais em operação são trifásicos e movidos a corrente alternada. Apesar de tal fato, em algumas aplicações o motor de corrente continua apresenta resultados satisfatórios devido as suas características.

Segundo Matas (2012, p.12) , dentre as principais aplicações da corrente contínua, citam-se:

A corrente contínua é aplicada em diversas áreas da indústria, principalmente em aplicações que envolvem o uso de tecnologia de precisão, no posicionamento e controle de velocidade de instrumentos de transformação, como por exemplo a eletrônica para a fabricação de componentes e elementos cada vez menores.

Dentre as vantagens da utilização dos motores de corrente contínua destacam-se: o amplo controle de velocidade, tanto acima como abaixo da velocidade nominal, a agilidade nos processos de aceleração, frenagem e inversão de sentido de rotação, a manutenção do torque constante durante a variação da velocidade, o conjugado de partida elevado. Para algumas aplicações, estas vantagens superam algumas desvantagens, como por exemplo a necessidade frequente de manutenção e uma menor eficiência quando comparado a motores CA de mesmo porte (WEG S.A., 2012).

Ainda de acordo com a fabricante de motores WEG (2012), os motores de CC vendidos pela companhia são comumente utilizados em:

- Máquinas operatrizes em geral;
- Bombas a pistão;
- Torques de fricção;
- Ferramentas de avanço;
- Tornos;
- Bobinadeiras;
- Mandrilhadoras;
- Máquinas de moagem;
- Máquinas têxteis;
- Guinchos e guindastes;
- Pórticos;
- Veículos de tração;
- Prensas;
- Máquinas de papel;
- Tesouras rotativas;
- Indústria química e petroquímica;
- Indústrias siderúrgicas;
- Fornos,
- Exaustores
- Separadores
- Esteiras para indústria cimenteira e outras

A Figura 1 ilustra uma aplicação de um motor de corrente continua em operação na Usiminas.

Figura 1 – : Rolo tensor de alimentação de tiras em operação na Usiminas, movimentado por motor de corrente contínua de 325KW.



Fonte: (WEG, 2012).

Além da teoria acerca das características construtivas dos motores de corrente contínua é importante também analisar suas características operacionais, visto que seu funcionamento depende de uma série de cuidados, como por exemplo a garantia da existência de campo, a atenção aos detalhes operacionais desta máquina e seus parâmetros é algo que vem a influenciar diretamente no rendimento da máquina (MORAES, 2015).

O instante de partida é crítico para o funcionamento de todos os tipos de motores, porque neste instante as correntes que circulam nos enrolamentos dos motores atingem valores elevados quando comparados aos valores de corrente na operação em regime permanente da máquina. Vale ressaltar que, caso haja necessidade de partida do motor com carga, os valores de corrente chegam a valores mais elevados ainda, podendo atingir até 10 vezes o valor da corrente nominal de operação. Assim, durante a energização dos motores, são utilizadas estratégias, chamadas de métodos de partida para reduzir as correntes no instante da partida (VILLAR, 2006).

Villar (2006, p. 27) apresenta duas estratégias para mitigação e redução de correntes durante a partida de motores CC. A primeira trata-se da proteção dos condutores e do próprio motor em relação à corrente de partida, sugerindo então a aplicação de uma resistência externa em série com a armadura do motor de forma temporária, conhecido como demarrador de

partida. A segunda estratégia trata-se do controle do torque durante a partida, quanto maior for o torque na partida mais rápido o motor atingirá sua velocidade nominal de operação. Para esta estratégia é necessária a utilização de um dispositivo de controle a base de eletrônica de potência, como os conversores CC-CC ou CA-CC.

Além disso, outros fatores podem prejudicar o funcionamento dos motores de corrente contínua, como as falhas na alimentação da máquina por exemplo. A ausência ou variação abrupta no fluxo magnético, pode influenciar diretamente na velocidade da máquina fazendo com que a mesma atinja velocidades rotóricas elevadas que podem ocasionar a quebra do equipamento.

Diante do exposto, compreendendo a necessidade de controle da partida e operação dos motores CC, este trabalho visa desenvolver um dispositivo que seja capaz de realizar a partida do motor com segurança e que garanta o monitoramento das principais grandezas de natureza elétrica, pertinentes para o estudo e operação segura dos motores. Como método de partida pretende-se construir um demarrador de partida, onde juntamente a este demarrador pretende-se desenvolver um dispositivo de monitoramento, onde este fará uso de um sistema embarcado.

O protótipo desenvolvido será utilizado nas aulas laboratoriais de máquinas elétricas I realizadas no laboratório de máquinas elétricas do Instituto Federal de Minas Gerais Campus Formiga. Espera-se que o dispositivo auxilie na melhoria do processo aprendizagem e permitindo a elaboração de novas práticas para os discentes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um dispositivo que utiliza sistema embarcado para monitoramento da operação e partida de motores de corrente contínua.

1.2.2 Objetivos específicos

São definidos os seguintes objetivos específicos para a consolidação do objetivo geral:

1. Estudo a respeito dos métodos de partida de motores de corrente contínua.
2. Desenvolvimento do projeto de demarrador de partida.
3. Montagem do sistema de demarrador de partida.

4. Projeto de um sistema de monitoramento da operação de motores de corrente contínua.
5. Montagem do dispositivo de monitoramento da operação dos motores.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso é composto por sete capítulos e demais subcapítulos, de forma a facilitar a sua compreensão e oferecer uma melhor leitura do mesmo. Os capítulos estão assim estruturados:

- Capítulo 2: este capítulo contém a apresenta uma formulação teórica para o conteúdo posteriormente apresentado;
- Capítulo 3: este capítulo tem por objetivo apresentar as metodologias e adequações utilizadas em busca de um resultado satisfatório;
- Capítulo 4: este capítulo expõe os resultados obtidos e dados registrados durante a utilização do protótipo;
- Capítulo 5: este capítulo apresenta uma conclusão geral sobre a utilização do protótipo e possíveis ajustes futuros;
- Capítulo 6: este capítulo contém as referências bibliográficas utilizadas durante o desenvolvimento do trabalho;
- Capítulo 7: apresenta em anexo o algoritmo aplicado ao protótipo.

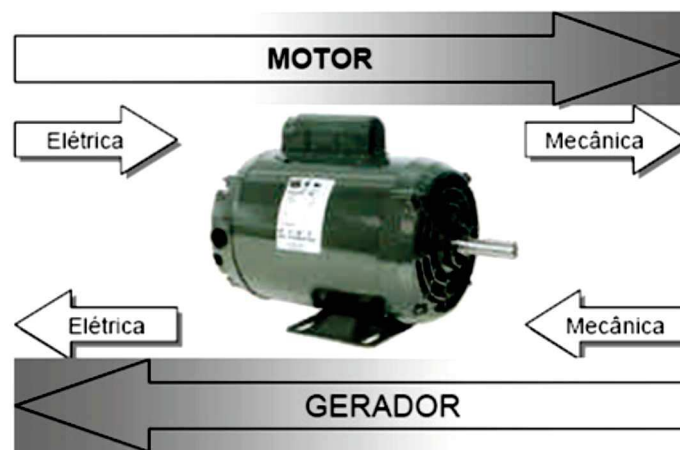
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas podem ser classificadas conforme a sua utilização, em geradores ou motores e de acordo com a sua alimentação ou produção de energia elétrica, em máquinas de corrente alternada ou máquinas de corrente contínua.

Conforme Seixas (2012, p. 3) as máquinas elétricas são dispositivos capazes de realizar a conversão de uma forma de energia em outra, ou seja converter a energia elétrica em energia mecânica. Estes dispositivos são reversíveis, portanto, podem operar em ambos os sentidos de conversão. O equipamento que converte energia elétrica em energia mecânica é denominado motor e o que converte a energia no sentido oposto denomina-se gerador elétrico. A Figura 2 exemplifica o sentido de conversão e modo de operação do dispositivo.

Figura 2 - Máquina elétrica e seus modos de operação.



Fonte: Extraída de: (SEIXAS, 2012).

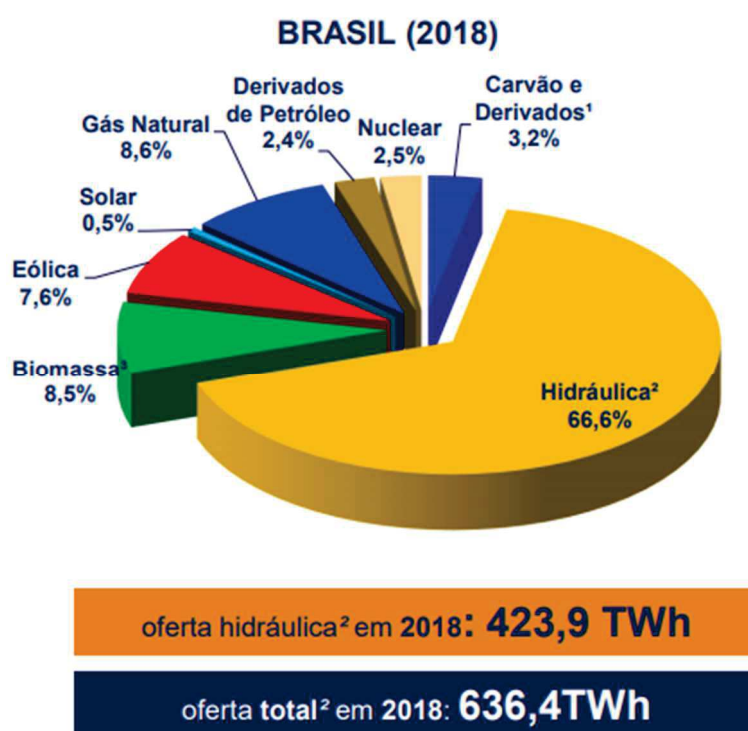
Apesar da capacidade de operação em ambos os sentidos, as máquinas elétricas podem apresentar baixos níveis de eficiência devido ao seu modo de operação, visto que uma máquina construída para operar como motor apresentará menor produção de energia elétrica que uma máquina construída como gerador ou vice-versa, fato que pode estar diretamente ligado as características construtivas do equipamento ou até mesmo as condições de operação.

Considerando a classificação de acordo com o tipo de alimentação, segundo Kosow (1985, p. 38) as máquinas elétricas podem ser classificadas em três diferentes grupos sendo

estes as máquinas de corrente alternada síncrona, as máquinas de corrente alternada assíncrona e as máquinas de corrente contínua, objeto de estudo deste TCC.

No Brasil o processo de geração de energia utiliza predominantemente geradores de corrente alternada, do tipo geradores síncronos. Segundo a EPE (2019), o Balanço Energético Nacional (BEN) informa que em 2018 foram produzidos 636,4 TWh. Observando a Figura 3 pode-se notar que 99,5% desse montante foram produzidos por geradores elétricos, máquinas estas utilizadas em usinas hidrelétricas, termoelétricas, eólicas entre outras.

Figura 3 - Matriz elétrica brasileira, (BEN, 2019).



Fonte: (EPE, 2019).

No que diz respeito a utilização de motores elétricos, segundo relatório apresentado pela empresa de pesquisa Grand View Research (2019), o mercado de venda de motores elétricos foi avaliado em 126,9 bilhões de dólares em 2018. Este mercado foi impulsionado devido as aplicações de motores em ventiladores, bombas, compressores, máquinas-ferramentas, eletrodomésticos, carros elétricos, aplicações de HVAC, ferramentas elétricas e robôs automatizados e nos setores industriais e agrícola.

Para utilização como motores, os motores de indução trifásicos e monofásicos são os mais utilizados nas mais diversas aplicações, devido a sua robustez, rendimento e facilidade de

manutenção e operação. No entanto, para algumas aplicações que requerem controle de velocidade e torque, tais como locomotivas, processos de laminação, prensas, pistões e demais operações com tais características, os motores de corrente contínua apresentam-se como a melhor opção (WEG, 2012).

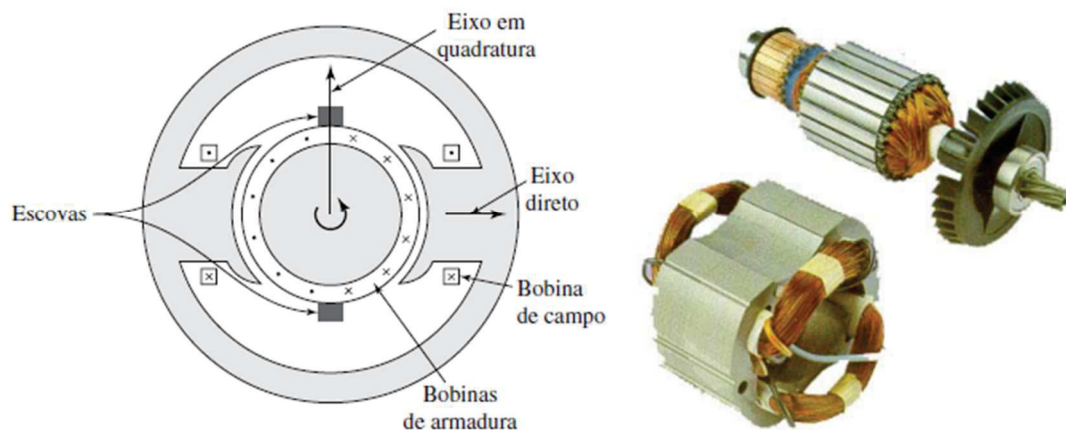
O objeto de estudo deste TCC é a máquina de corrente contínua, operando como motor, cuja operação e instante de partida serão monitorados visando a operação com segurança e eficiência para diferentes condições e carga.

2.2 MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

2.2.1 Princípio de funcionamento

Basicamente o motor CC possui duas estruturas para realização do trabalho, são elas o estator e o rotor. O estator é composto de uma estrutura ferromagnética onde são enroladas as bobinas que formam o enrolamento de campo. Já no rotor temos como principal diferença a existência de um sistema comutador com escovas para conectar as bobinas que se encontram na superfície do rotor. A Figura 4 apresenta exemplos destes itens como também os aspectos construtivos do motor CC.

Figura 4 – Aspectos construtivos do motor elétrico CC, rotor e estator motor CC.

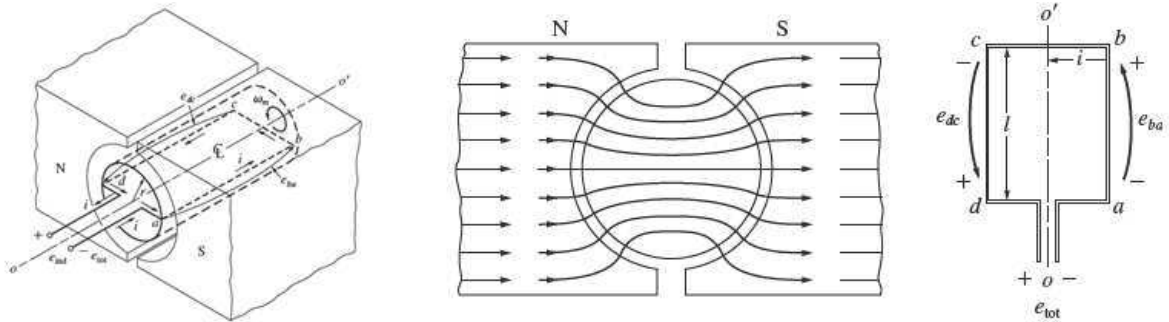


Fonte: (a) (CHAPMAN, 2013) (b) (FUENTES, 2005).

Observando um motor, no qual o estator é composto por duas bobinas de n espiras, ao percorrer a corrente elétrica no circuito do estator, cada bobina se comportará como um ímã permanente, formando assim o campo magnético com os polos norte e sul definidos. Imerso

neste campo se encontra o rotor também formado por n espiras. A Figura 5 traz o exemplo de como o rotor se encontra fixado junto ao campo magnético.

Figura 5 – Aspectos construtivos da máquina CC, estator e rotor.



Fonte: Extraído de: (CHAPMAN, 2013).

Uma vez que as espiras do rotor são alimentadas por uma corrente I , e o estator está produzindo o campo magnético, resultando em uma força sobre o eixo do rotor. Esta força pode-se ser explicada e descrita utilizando-se a Lei de Força de Lorentz, conforme Equação (1).

$$F = q(E + v \times B) \quad (1)$$

Na qual F é a força, q é a carga elementar, E o campos elétrico e B o campo magnéticos, sendo F dado em *newtons* e q em *coulombs*, E *volt por metro*, B em *tesla* e v que é a velocidade em *metros por segundo*.

Como trata-se de um número n de cargas percorrendo o condutor em espira, é conveniente substituir q por ρ que denota-se como densidade de carga. Esta densidade é dada em *coulombs por metro cubico*, uma vez que se observe apenas a contribuição magnética da Equação (1) o produto apresentado na Equação (2).

$$J = \rho v \quad (2)$$

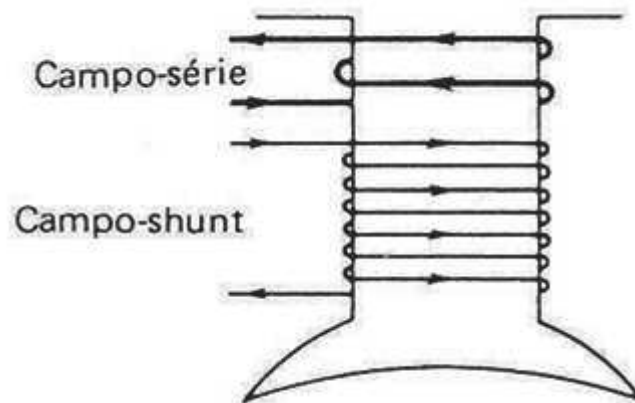
Na qual J é conhecido como densidade de corrente e é dado em *amperes por metro quadrado*, assim a densidade de força magnética F_v pode ser descrita pela Equação (3).

$$F_v = J \times B \quad (3)$$

Analisando a Equação (3) é possível notar então que a força ou torque gerado por um motor CC é diretamente proporcional a corrente que transita no rotor e ao campo gerado pelo estator, lembrando que as limitações de funcionamento desta máquina estão diretamente ligadas aos seus aspectos construtivos.

Analisando novamente o estator, segundo Villar (2006, p.8), este exerce a função de um eletroímã, que produz o fluxo que percorre a armadura e sua construção possui duas seções, sendo elas o campo shunt e o campo série. Como diferença entre eles temos que o campo shunt possui mais espiras e pode ser construído com fios menos robustos. Já o campo série possui menos enrolamentos e deve ser construído com fios mais espessos para suportar a corrente de armadura, visto que este operar em série com a mesma. A Figura 6 apresenta um exemplo de construção do campo.

Figura 6 - Enrolamentos de campo-série e campo-shunt.



Fonte: (VILLAR, 2006).

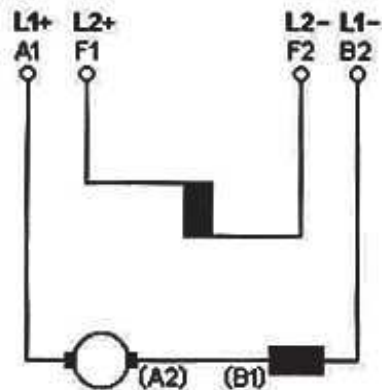
2.2.2 Classificação

Uma vez compreendida que à origem da força do motor está relacionada diretamente com sua alimentação elétrica, os motores passaram a ser subdivididos em grupos de acordo com este aspecto, ou seja, o método de alimentação do motor passou a ser uma característica não só construtiva, mas também uma classificação. Portanto, os quatro grupos de classificação são: independente, série, shunt e composto.

2.2.3 Características e conexão de enrolamentos do motor CC

Segundo Francisco (2013) o motor de excitação independente necessita de duas fontes de alimentação, uma para o estator e outra para o rotor, possibilitando o controle de velocidade da máquina de forma independente, através da armadura e do campo. A Figura 7 apresenta os métodos de ligação deste circuito em rotação horária e anti-horária.

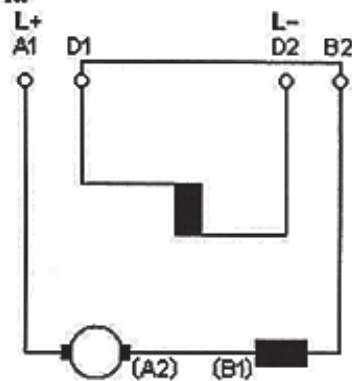
Figura 7 - Ligação motor CC independente.

Rotação horária**Rotação anti-horária**

Fonte: (FRANCISCO, 2013).

O motor de alimentação em série possui a mesma corrente passando por seus enrolamentos, portanto este será alimentado com uma única fonte de tensão. Diferente do motor independente este possui baixo controle de velocidade, porém é capaz de operar com maior facilidade em situações de sobrecarga, uma vez que a corrente demandada pela carga também passara pelo enrolamento de campo, elevando o conjugado da máquina. A Figura 8 apresenta os métodos de ligação deste circuito e também como alterar seu sentido de rotação.

Figura 8 - Ligação motor CC série.

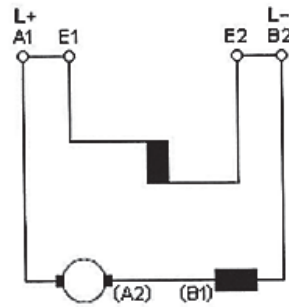
Rotação horária**Rotação anti-horária**

Fonte: (FRANCISCO, 2013).

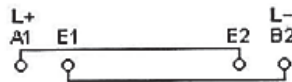
Já no motor de alimentação shunt, conhecido como “paralelo”, o estator e o rotor da máquina se encontram em paralelo e são alimentados por uma mesma fonte. Este tipo de motor possui menor torque de arranque que o motor série, porém sua velocidade varia pouco com a carga. A Figura 9 demonstra a ligação deste circuito em ambos os sentidos de rotação.

Figura 9 – Ligação motor CC shunt.

Rotação horária



Rotação anti-horária

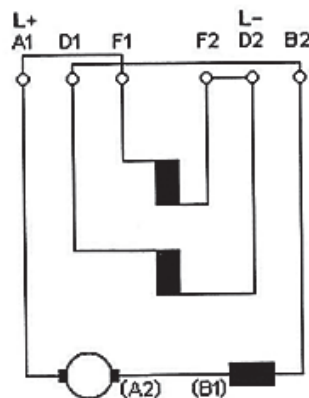


Fonte: (FRANCISCO, 2013).

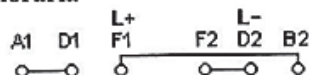
O motor com alimentação composta possui um enrolamento de estator em série com o rotor e outro enrolamento ligado em paralelo, sendo capaz de unir as vantagens encontradas no motor série e shunt quais sejam elevado conjugado de partida e boa regulação de velocidade. A Figura 10 apresenta os métodos de ligação deste circuito e também como alterar seu sentido de rotação.

Figura 10 – Ligação motor CC composto.

Rotação horária



Rotação anti-horária

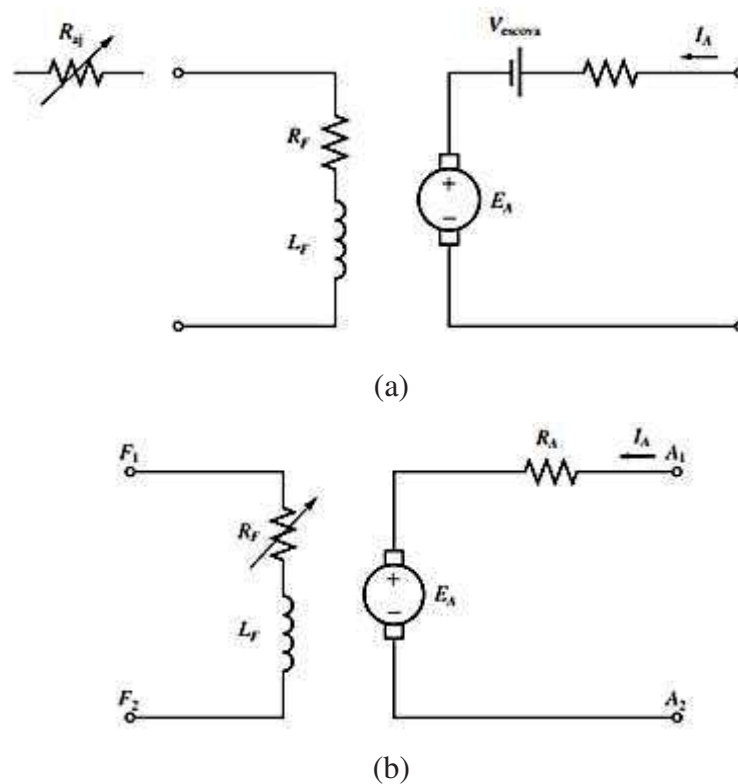


Fonte: (FRANCISCO, 2013).

2.3 EQUACIONAMENTO E CURVAS DE TORQUE VERSUS VELOCIDADE

O equacionamento matemático do motor CC é obtido a partir da análise feita em seu circuito equivalente, utilizando o teorema de Thévenin em toda a estrutura do rotor, juntamente com a representação do estator composta pela bobina de campo. A Figura 11 apresenta os circuitos equivalentes básico e simplificado de um motor CC, respectivamente (CHAPMAN, 2013).

Figura 11 – (a) Circuito elétrico equivalente de um motor CC. (b) Circuito elétrico equivalente simplificado sem a queda de tensão nas escovas.



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

A tensão (força contra eletromotriz) no rotor depende do fluxo magnético da máquina CC, da velocidade de rotação e do aspecto construtivo, representada pela Equação (4).

$$E_A = K \cdot \Phi \cdot \omega \quad (4)$$

Na qual, E_A é a força contra eletromotriz na armadura (rotor), K é uma constante que representa os aspectos construtivos da máquina, Φ é o fluxo magnético do circuito de campo, ω é frequência de rotação em rad/s.

O conjugado induzido desenvolvido pelo motor CC é dado como

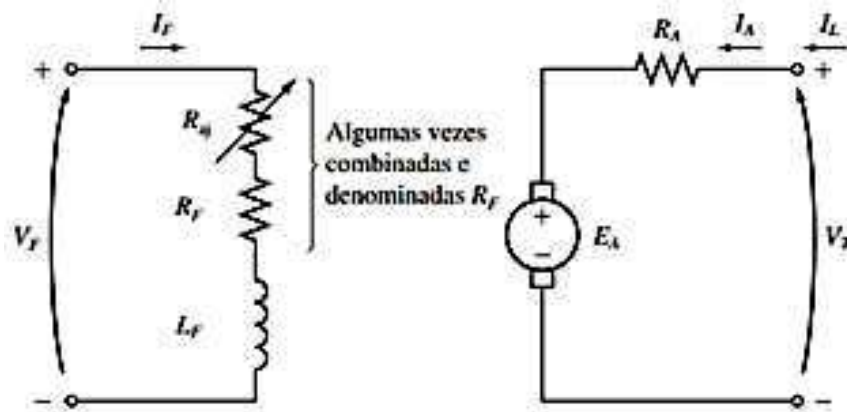
$$\tau_{ind} = K \cdot \Phi \cdot I_A \quad (5)$$

sendo I_A a corrente de circulação na armadura.

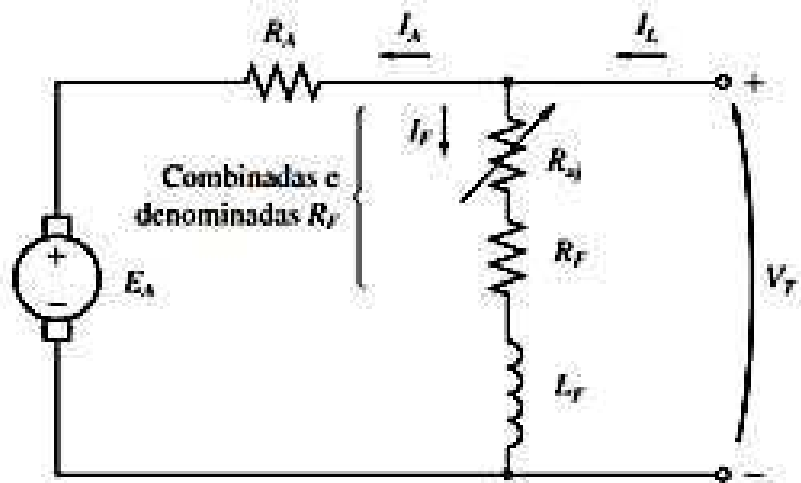
2.3.1 Motor CC com excitação independente e *shunt*

Os circuitos elétricos equivalentes do motor CC com excitação independente e excitação *shunt* são demonstrados na Figura 12. Aplicando-se lei de Kirchhoff das tensões (LKT) são obtidas as equações que relacionam as grandezas elétricas do circuito, Equações (6), (7), (8) e para o motor de excitação independente a Equação (9).

Figura 12 – (a) Circuito elétrico equivalente de um motor CC de excitação independente (b) Circuito elétrico equivalente de um motor CC de excitação *shunt*.



(a)



(b)

Fonte: (CHAPMAN, 2013).

$$I_F = \frac{V_F}{R_F} \quad (6)$$

$$V_T = E_A + I_A \cdot R_A \quad (7)$$

$$I_L = I_A + I_F \quad (8)$$

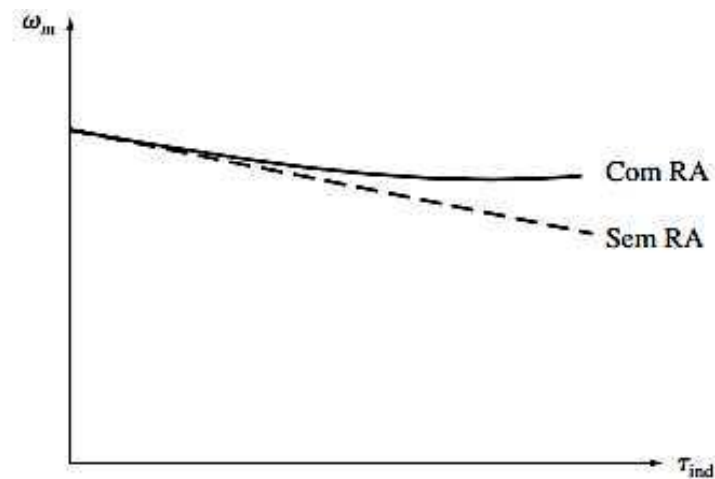
$$I_L = I_A \quad (9)$$

Manipulando a Equação (7), substituindo as tensão E_A e a corrente I_A pelas equações (4) e (5), obtém-se a relação da velocidade do motor CC nessas configurações, representado pela Equação (10).

$$\omega_m = \frac{V_T}{K\Phi} - \frac{R_a}{(K\Phi)^2} \cdot \tau_{ind} \quad (10)$$

A Equação (10) resulta em uma reta com inclinação negativa, que representa a relação do conjugado *versus* velocidade do motor CC nas configurações de fechamento em excitação independente e *shunt*. O gráfico na Figura 13 apresenta essa relação linear, e com um fenômeno interno ao motor CC, denominado reação de armadura (RA), que distorce parcialmente a reta $\tau_{ind} \times \omega$ (CHAPMAN, 2013).

Figura 13 – Conjugado versus velocidade de um motor CC com efeito da reação de armadura.

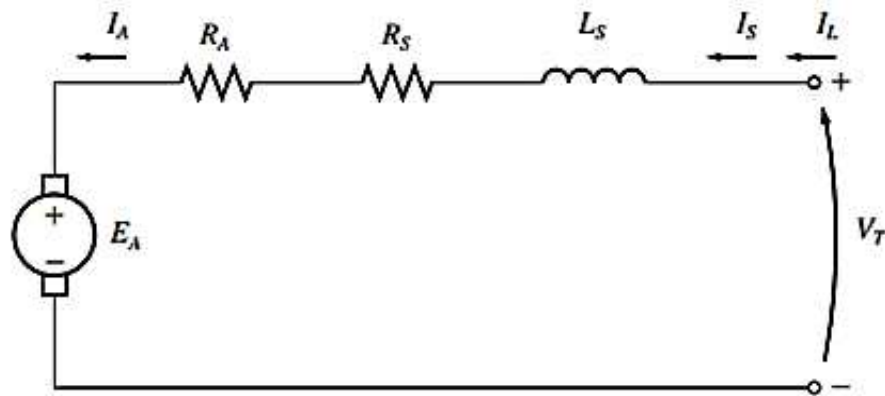


Fonte: (CHAPMAN, 2013).

2.3.2 Motor CC série

O motor CC série tem como características poucas espiras em seus enrolamentos de campo, conectados em série com os enrolamentos da armadura. O seu circuito elétrico equivalente é bem simples, conforme demonstrado na Figura 14.

Figura 14 – Circuito elétrico equivalente de um motor CC série.



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Analisando o circuito elétrico equivalente da Figura 14 e aplicando a LKT, verifica-se que a corrente de campo e a de armadura são as mesmas, e a tensão no motor é dado pela Equação (11).

$$V_T = E_A + I_A \cdot (R_A + R_S) \quad (11)$$

Na qual, V_T é a tensão aplicada a máquina, E_A é a força contra eletromotriz, I_A é a corrente de armadura e de campo, R_A e R_S são as resistências dos enrolamentos em série.

O conjugado induzido no eixo do motor CC série se difere muito das configurações demonstradas anteriormente. A característica principal é que o fluxo no enrolamento de campo é diretamente proporcional a corrente de armadura, uma vez que esses enrolamentos estão em série (CHAPMAN, 2013). A Equação (12) apresenta essa relação.

$$\Phi = c \cdot I_A \quad (12)$$

Sendo “c” é uma constante de proporcionalidade.

Com isto, o conjugado induzido no motor CC, dado pela Equação (5), se torna proporcional ao quadrado da corrente de armadura, que também é a corrente de campo.

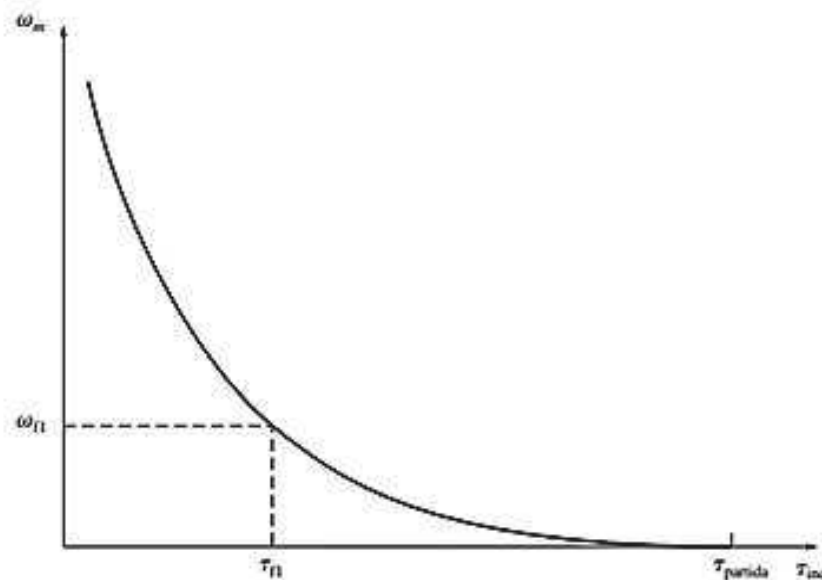
$$\tau_{ind} = K \cdot c \cdot I_A^2 \quad (13)$$

Assim, percebe-se que a máquina CC série fornece muito mais torque no seu eixo por ampere. E por meio da manipulação matemática das equações das tensões no circuito, do fluxo e do torque induzido, Equações (4), (11), (12) e (13), obtém-se a relação resultante do conjugado *versus* a velocidade do motor CC série, expressa na Equação (14) (CHAPMAN, 2013).

$$\omega_m = \frac{V_T}{\sqrt{Kc}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau_{ind}}} - \frac{R_A + R_S}{Kc} \quad (14)$$

Esta relação demonstra que a velocidade da motor CC série varia com o inverso da raiz quadrada do conjugado, o que resulta em uma curva declinada bem acentuada, conforme mostram na Figura 15. É possível constatar também as limitações e desvantagens desse tipo de ligação, uma vez que, o motor CC não pode funcionar sem carga em seu eixo, sendo que pela relação da Equação (14) a velocidade tende ao infinito.

Figura 15 – Velocidade do motor CC em função do conjugado.

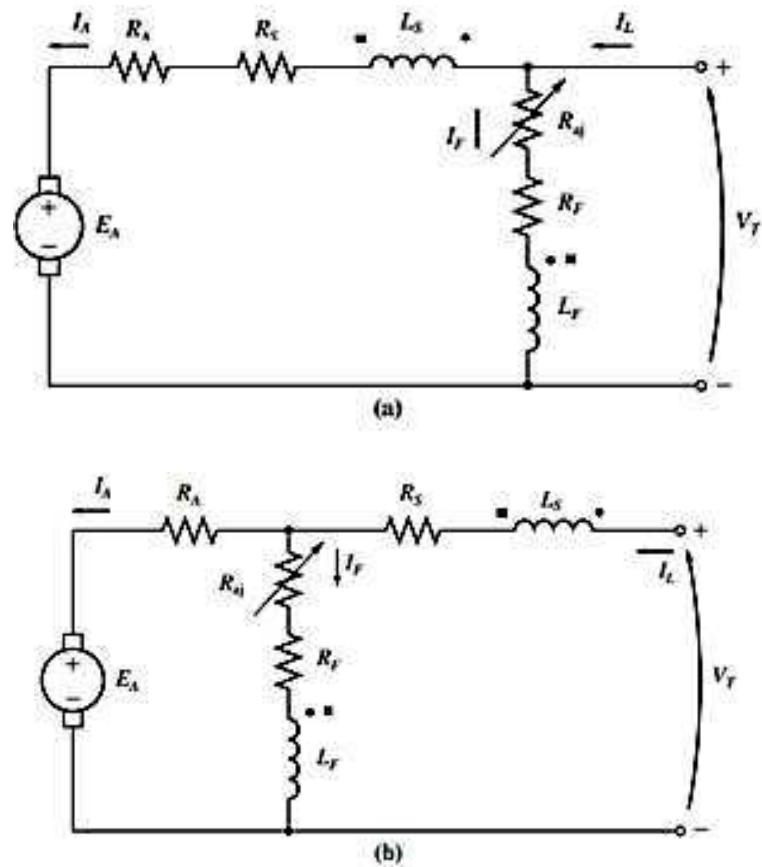


Fonte: (CHAPMAN, 2013).

2.3.3 Motor CC composto

O motor CC composto é uma combinação dos tipos série e shunt, tendo dois enrolamentos de campo, um em série com a armadura e outro em paralelo. O seu circuito elétrico equivalente se divide nas duas configurações possíveis desse motor CC, composto longo e curto, conforme demonstrado na Figura 16.

Figura 16– Circuito elétrico equivalente de um motor CC composto (a) composto longo (b) composto curto.



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Aplicando a LKT nos circuitos da Figura 16 obtém-se as seguintes equações para o motor CC composto:

$$V_T = E_A + I_A \cdot (R_A + R_S) \quad (15)$$

$$V_T = E_A + I_A \cdot R_A + I_S \cdot R_S \quad (16)$$

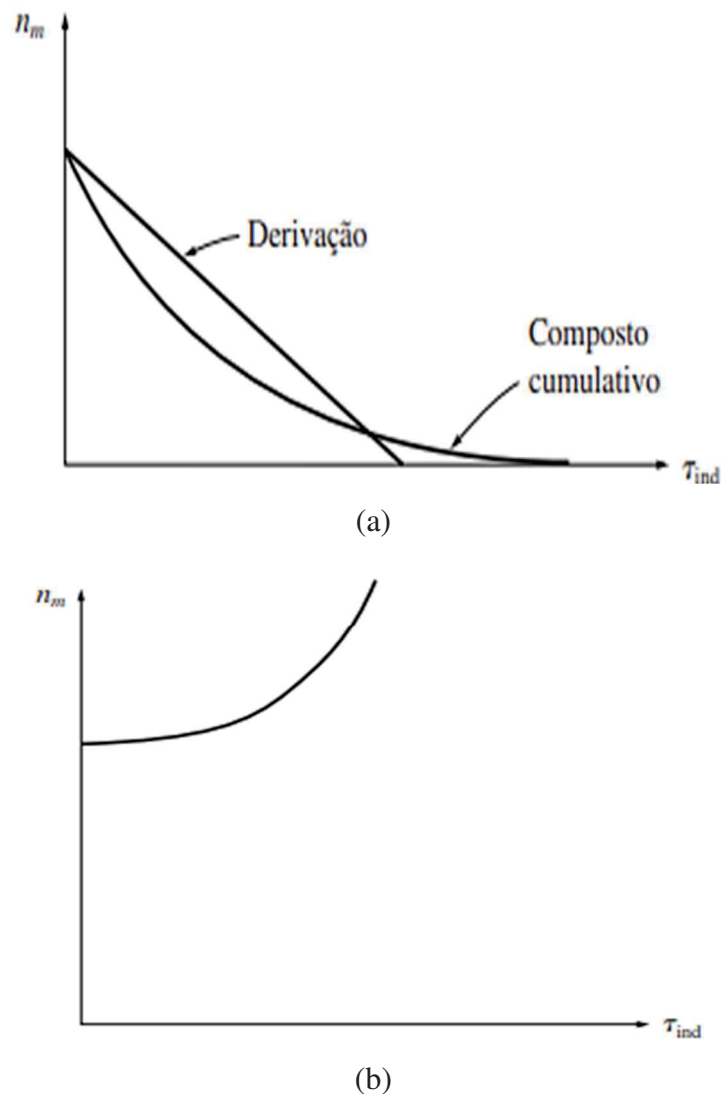
$$I_A = I_L - I_F \quad (17)$$

Nos motores CC compostos, os enrolamentos de campo série e shunt podem estar ligados de forma a produzirem fluxo no mesmo sentido, neste caso o motor é denominado como motor cc composto cumulativo, ou em sentido contrário, sendo chamados de motores cc compostos diferenciais. Vale ressaltar que, o motor na configuração diferencial não possui

nenhuma aplicação prática e deve-se tomar o cuidado de não realizar esta ligação de forma acidental pois ela pode provocar a quebra do motor por excesso de velocidade no eixo.

O conjugado *versus* velocidade do motor CC cumulativo e diferencial é demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Conjugado *versus* velocidade do motor CC composto (a) composto cumulativo (b) composto diferencial.



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

O conjugado *versus* velocidade do motor CC cumulativo, demonstrado na Figura 17 (a), apresenta as vantagens dos motores *shunt* e *série* como dito anteriormente. Assim, este possui a vantagem de uma boa regulação de velocidade e um bom conjugado na partida. Por outro lado, o motor CC composto diferencial, Figura 17 (b), tem como característica desregulada de

velocidade devido à redução do fluxo da máquina pela configuração dos enrolamentos de campo série e *shunt*, o que o torna instável (CHAPMAN, 2013).

2.3.4 Diagrama de potência e perdas no motor CC

A máquina CC assim como qualquer dispositivo eletromecânico possui suas características de perdas, sendo esses parâmetros inerentes a sua construção e utilização.

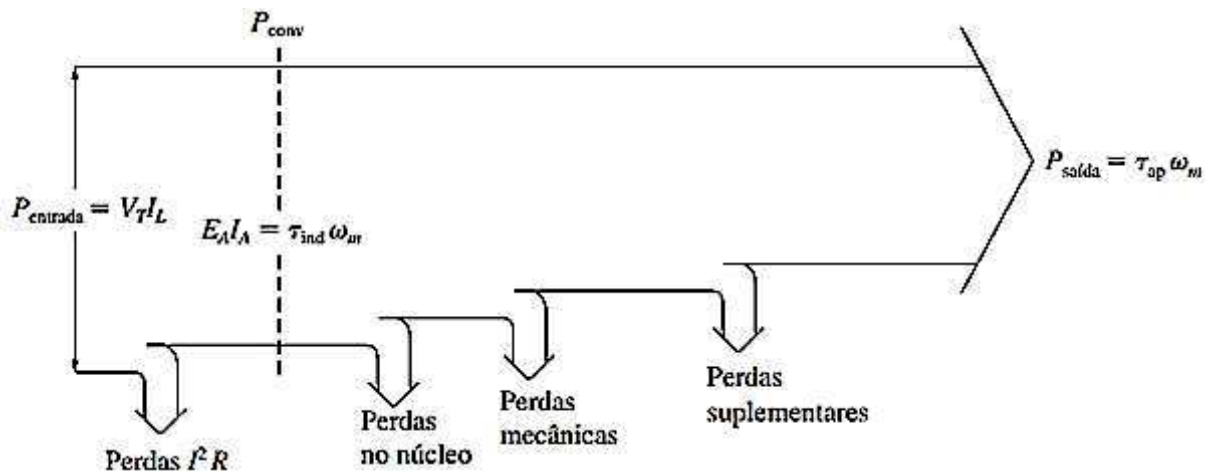
Tanto o gerador CC, que recebe potência mecânica no seu eixo e produz potência elétrica, quanto o motor CC, que recebe a potência elétrica e fornece potência mecânica no seu eixo, possuem uma eficiência que é dada em função da potência elétrica que entra e da potência elétrica que sai, conforme a Equação (18) (CHAPMAN, 2013).

$$\eta = \frac{P_{Saída}}{P_{Entrada}} \cdot 100\% \quad (18)$$

A diferença entre as duas potências representa o total de perdas ocorridas na máquina CC durante o processo de conversão. Essas perdas são classificadas como: perdas no cobre dos enrolamentos da máquina; perdas nas escovas de comutação; perdas no núcleo; perdas mecânicas/rotacionais e perdas suplementares (CHAPMAN, 2013).

O diagrama do fluxo de potência de um motor CC demonstrando as suas perdas é apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Diagrama do fluxo de potência de um motor CC .



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

As perdas elétricas no cobre são compostas pela soma das perdas no enrolamento de campo e no enrolamento da armadura, dada pelas Equações (19) e (20).

$$P_A = I_A^2 \cdot R_A \quad (19)$$

$$P_F = I_F^2 \cdot R_F \quad (20)$$

Nas quais, P_A e P_F são as perdas na armadura e no campo; I_A e I_F são as correntes de armadura e de campo; R_A e R_F são as resistências dos enrolamentos no motor CC.

As perdas nas escovas ocorrem devido a queda de tensão que ocorre em seus contatos, esta é dado pela Equação (21).

$$P_E = V_E \cdot I_A \quad (21)$$

Sendo P_E é a perda nas escovas, V_E é a queda de tensão nas escovas e I_A a corrente de armadura.

Conforme demonstrado na Figura 18 o motor recebe a potência elétrica de entrada que em seguida são subtraídas as perdas no cobre e as perdas nas escovas, resultando em uma potência que é considerada idealmente convertida em potência mecânica, dado pela Equação (22).

$$P_{conv} = E_A \cdot I_A = \tau_{ind} \cdot \omega_m \quad (22)$$

No entanto, essa potência resultante que é convertida em potência mecânica ainda é a potência resultante no eixo do motor CC, uma vez que, ainda deve-se subtrair desta as perdas mecânicas/rotacionais, perdas do núcleo e perdas suplementares, que normalmente são fornecidas pelo fabricante.

2.4 MÉTODOS DE PARTIDA DE MOTORES CC

Segundo Mamede Filho (1986, p.61), a partida de um motor elétrico de alta potência pode ocasionar uma queda de tensão em seu sistema de suprimento, isso devido à alta corrente demandada. Portanto, deve-se sempre se atentar as condições de partida de um motor para que a mesma ocorra de forma ideal e não venha a superar os limites de queda de tensão estabelecidos pelas normas vigentes.

Conforme Fitzgerald (2014), citado por Dias (2018, p.21), entender as características de um motor em regime permanente não é o suficiente para compreender o desempenho do mesmo. Ainda segundo Dias (2018, p.21) “para o desenvolvimento de controles com grande precisão e eficiência de resposta, o comportamento transitório do sistema precisa ser precisamente considerado”.

De acordo com Afonso (2014, p. 10), para cada tipo de máquina difere-se o método de partida aplicado. Para partida de motores, deve-se utilizar de dispositivos de proteção e controle, devido as suas características no instante da partida.

Apesar dos riscos durante o transitório do motor, o regime permanente precisa operar dentro das condições nominais da máquina. Posto isto, é necessário que estes dispositivos atendam a algumas funções principais de proteção a toda operação, sendo estas:

- Proteção contra curto circuito;
- Proteção contra I_p excessiva;
- Proteção contra sobrecarga durante a operação;
- Proteção contra perda do campo magnético.

Observadas as condições dos motores em geral, para que se possa definir um método de partida ideal para o motor CC, se faz necessário identificar algumas características deste motor, e de posse destas selecionar um método de partida.

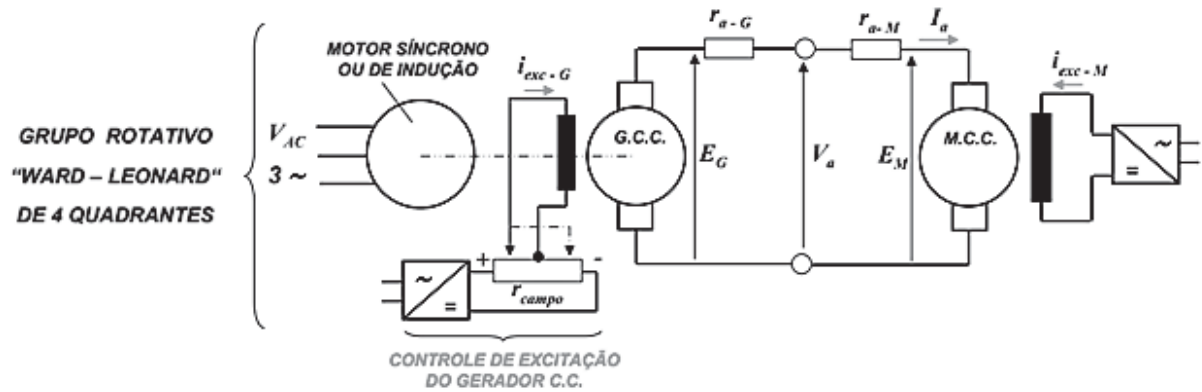
No momento em que o motor CC é alimentado com uma tensão em seus terminais da armadura, não há força contra eletromotriz devido a velocidade inicial ser nula. O único limitador da corrente nesse momento inicial fica sendo a resistência do enrolamento da armadura e a queda de tensão nas escovas, sendo estes valores muito pequenos, o que resulta em uma corrente de pico na partida podendo chegar a dezenas de vezes o valor da corrente nominal no momento da partida (CHAPMAN, 2013; KOSOW, 1985).

No que se diz respeito ao método de partida do motor CC, objetivo desta seção, o método de partida é especificado com o objetivo de proteção contra uma corrente de pico excessiva nos enrolamentos do motor, e dentro desta aplicação existem diferentes métodos que podem ser empregados, tais como: demarrador de partida, circuitos de controle de velocidade com eletrônica de potência (Recortador de tensão – *CHOPPER*), conversores CC-CC e CA-CC, sistema Ward-Leonard (CHAPMAN, 2013).

Os métodos mais complexos e também os mais modernos são baseados em eletrônica de potência, conversores CC-CC e CC-CA controlados, recortador de tensão (*CHOPPER*), os quais são baseados em tiristores, IGBT e GOT. Já o sistema Ward-Leonard é uma técnica antiga na qual consiste em um grupo motor-gerador, em que se tem uma máquina CA de indução acoplada a um gerador CC que por sua vez alimenta o motor CC, no qual é feito o controle de

velocidade do motor pela variação da tensão gerada pelo gerador CC. A Figura 19 exemplifica essa técnica de partida.

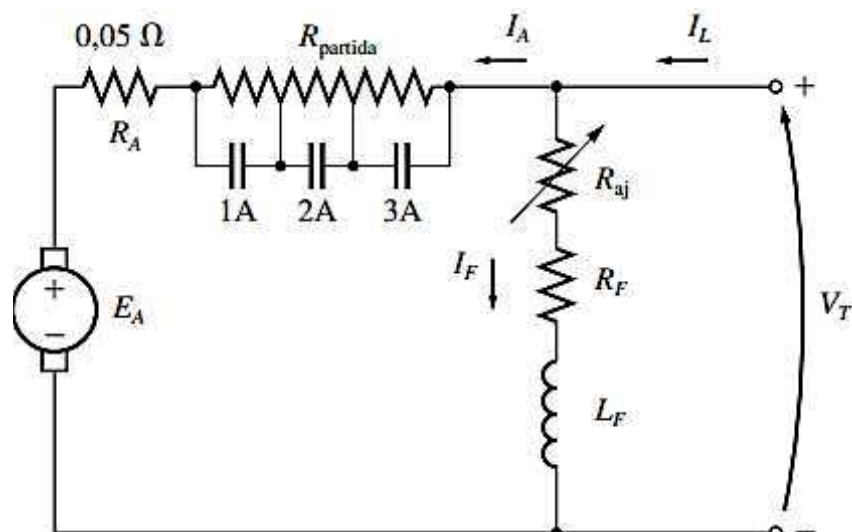
Figura 19 – Motor CC com técnica de partida e controle Ward-Leonard.



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Dentre os métodos mencionados, o demarrador de partida ou controle de partida reostática, é caracterizado por ser o método mais simples. Este consiste em inserir uma resistência em série com a armadura com o intuito de limitar a corrente de pico até o momento em que se tenha uma força contra eletromotriz gerada na armadura suficiente. Esse dispositivo é composto por um reostato contínuo ou com tapes, tendo sua resistência total reduzida progressivamente por um sistema de controle de chaveamento de acordo com o aumento de velocidade do motor CC (KOSOW, 1982). A Figura 20 demonstra um circuito equivalente de um motor CC em derivação com um demarrador em série com a armadura como método de partida.

Figura 20 – Motor CC em derivação com demarrador de partida em série.



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Os segmentos de resistências demonstrados na Figura 20 são calculados de forma a manter a corrente dentro dos valores aceitáveis em cada estágio durante a partida. E para o sistema de controle existem diversas configurações possíveis para o controle de comutação dos taps de resistências, podendo ser desde um circuito de acionamento com botoeiras, relés e sensores, até um sistema microcontrolado. Isto torna essa técnica de partida versátil e vantajosa comparada com os outros métodos mais complexos.

Outra vantagem do demarrador de partida é a facilidade de implementação do mesmo, uma vez que este configura um disposto simples sem a necessidade de realizar o controle de outras variáveis no motor CC. Posto isto, essa técnica de partida possui uma grande funcionalidade e se torna muito útil em aplicações laboratoriais para fins didáticos, o qual se apresenta com objetivo deste trabalho de conclusão de curso.

2.5 DISPOSITIVO PARA MONITORAMENTO

2.5.1 Principais grandezas de interesse

Para uma operação adequada, seja em regime permanente ou na partida, existe a necessidade de monitoramento de algumas grandezas de interesse. A medição de parâmetros do motor se faz necessário para obter uma melhor eficiência e segurança na operação do mesmo. Essa medição possui a finalidade tanto de controle, como para identificação de falhas nos motores. Medições de corrente, tensão, velocidade de rotação, vibração mecânica, temperatura, dentre outros, são alguns dos parâmetros mais observados (MAUSBACH, 2019). Cada uma destas medições exige um dispositivo próprio ou em alguns casos um dispositivo comum capaz de realizar tais medições. Por exemplo, a velocidade de rotação pode ser feita utilizando um tacogerador, encoder ou sensor ótico eletrônico de velocidade. Já a vibração mecânica pode ser medida utilizando-se um sensor de vibração, para as demais grandezas citadas comumente são utilizados multímetros para realização de tal medição.

2.5.2 Sistema de medição de corrente

Como o objetivo deste trabalho é o controle da corrente de partida, a medição pode ser realizada utilizando um amperímetro, que deve ser ligado em série e possuir a menor resistência possível, de forma a influenciar minimamente na medição. (NEVES, 2014).

Existem variações nos modelos e métodos de aplicação de amperímetros, cada um destes mostrando-se mais adequado a determinada aplicação. Três modelos destes medidores

podem ser observados na Figura 21, na qual o primeiro se encontra ligado em série ao circuito, o segundo por envolvimento do cabo condutor e o terceiro trata de um resistor shunt.

Figura 21 – Modelos de amperímetros



Fonte: (LEÃO, 2018).

2.5.3 Sistema embarcado

De acordo com Cunha (2007, p. 1)

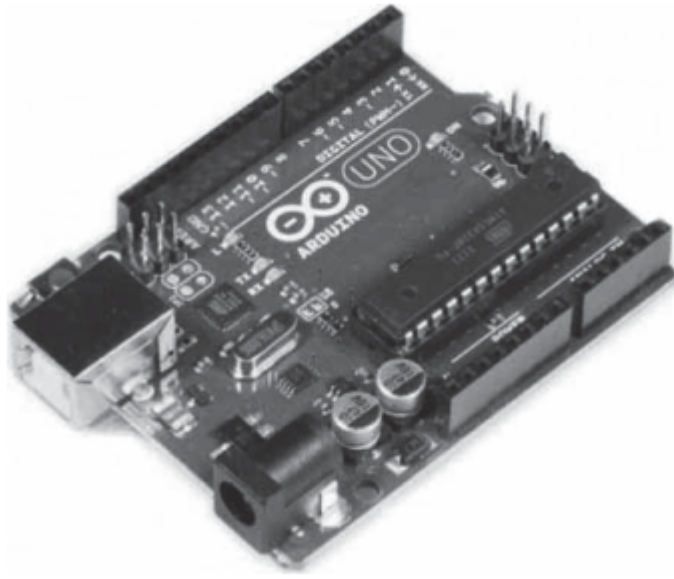
Colocar capacidade computacional dentro de um circuito integrado, equipamento ou sistema. Esta é uma definição para o que é um sistema embarcado. Note que um sistema como este deve ser mais do que um simples computador. É um sistema completo e independente, mas preparado para realizar apenas uma determinada tarefa.

Bosa (2009, p. 15) destaca que a aplicação de sistemas embarcados permite avaliar o desempenho, como também monitorar o comportamento de equipamentos, executando diagnósticos, evitando falhas e adicionando tolerância aos processos.

Com a intenção de automatizar os processos e ainda sim permitir ao usuário executar intervenções, a utilização do microcontrolador Arduino em projetos estudantis se mostra promissora. Segundo Silva (2019, p. 41) este microcontrolador foi criado sob as premissas de possuir baixo custo e interação simples com o usuário, permitindo a execução de tarefas simples e também de projetos sofisticados.

McRoberts (2018, p. 27) aponta que é possível realizar o controle de diversos dispositivos através da plataforma arduino, inclusive motores. Além do fato de possuir conexão com inúmeros tipos de sensores e métodos de interações com usuário. A Figura 22 apresenta o arduino no modelo uno, que foi utilizado para o desenvolvimento deste TCC.

Figura 22 – Arduino uno.

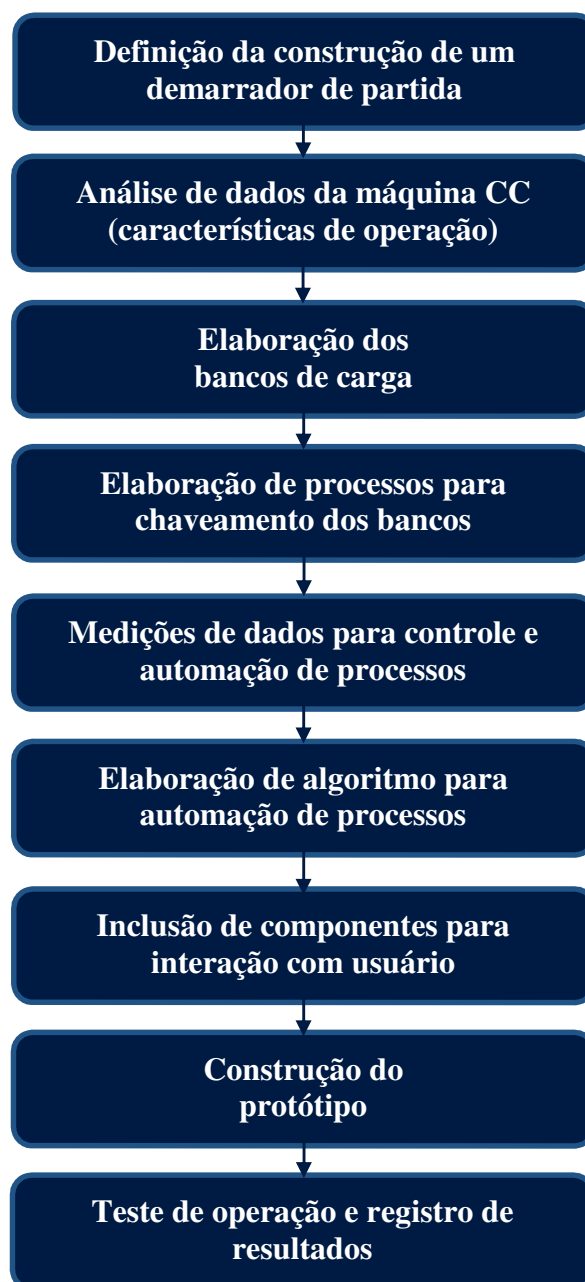


Fonte: (MCROBERTS, 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um “Demarrador de Partida” que seja adequado aos motores de corrente contínua do laboratório de máquinas elétricas do IFMG – campus Formiga. Para montagem do protótipo final é necessário o desenvolvimento de várias etapas de montagem, teste e validação de circuitos elétricos e eletrônicos. Para facilitar o entendimento, estes processos são organizados em um Fluxograma, apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Fluxograma.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A seguir são apresentados os detalhes construtivos necessários para a implementação de cada etapa.

3.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO DEMARRADOR

Para construção do demarrador é necessário determinar alguns parâmetros construtivos relacionados aos dados de operação dos motores os quais pretende-se acionar. Portanto, se faz necessária avaliar as características dos motores CC que virão a ser utilizados, ou seja, para determinar as condições de partida e operação da máquina CC foram observados os dados de placa da mesma, e a partir destes foram realizados os cálculos para determinar a construção do protótipo. A Figura 24 apresenta os dados de placa da máquina CC.

Figura 24 – Dados de placa da máquina CC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Considerando-se os dados da placa, observa-se que a corrente nominal da máquina operando como motor é de 2.2A. Sabe-se que, no instante de partida, os valores de corrente podem chegar a até 10 vezes o valor da corrente nominal. No entanto, pretende-se, ao construir este dispositivo, limitar a corrente de partida em valores próximos aos nominais.

3.2 DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE CARGAS

No instante de partida, a corrente do motor de corrente contínua é limitada apenas pela resistência do circuito de armadura, conforme Equação 07, uma vez que a Força contra eletromotriz (E_a) neste instante é zero. Desta forma, uma das alternativas para limitar tal corrente é aumentar o valor de resistência do circuito de armadura, inserindo-se resistores em série com o circuito de armadura. Sendo assim, o valor da resistência a ser inserida em série

com o enrolamento de campo da máquina, pode ser obtido utilizando-se os dados de placa na Equação (23).

$$V_F = (Z_A + R_{BC}) \cdot I_A \quad (23)$$

Na qual, V_F é a tensão da fonte, Z_A a impedância da armadura da máquina, R_A a resistência série (banco de cargas) e I_A a corrente de armadura.

Aplicando-se a tensão e corrente nominal, 220V e 2,2A respectivamente, temos o somatório de Z_A e R_A em 100Ω . Observando o fato que na partida a máquina tem seu valor de Z_A tendendo a zero, identificou-se que o valor ideal de R_{BC} seria aproximadamente 100Ω . Outro item a ser avaliado é a potência dissipada por este circuito, esta potência pode ser calculada pela Equação (24).

$$P_F = V_F \cdot I_A \quad (24)$$

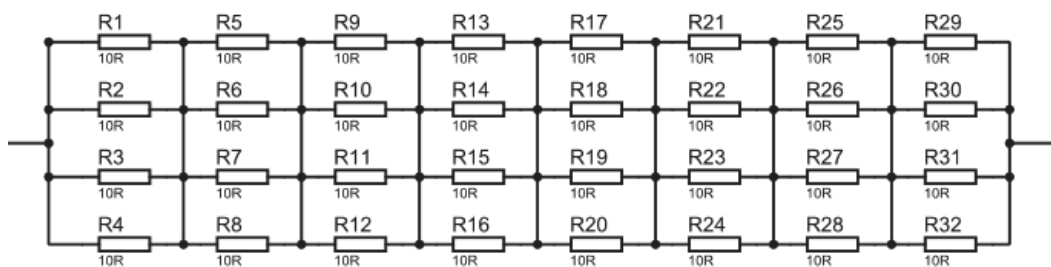
Na qual, P_F é a potência entregue ao circuito de armadura, V_F é a tensão da fonte e I_A a corrente de armadura.

Para os mesmos 220V e 2,2A temos a potência de 484W entregues ao circuito de armadura. Considerando a potência da máquina tendendo a zero na partida, o banco de cargas selecionado deve ser capaz de dissipar tal potência garantindo assim sua vida útil.

Verificando-se os dados construtivos do banco de cargas, foi realizada uma busca de resistores no mercado para atender as demandas de tensão e potência calculadas. Observando os orçamentos obtidos, definiu-se pela compra de 140 resistores 10Ω e 5W cada, visto que estes resultaram no menor custo de aplicação.

Estes resistores foram organizados de modo que fossem obtidos quatro bancos de cargas semelhantes de 20Ω e 160W cada. A Figura 25 apresenta a forma como foram dispostos os resistores em cada unidade de dissipadora.

Figura 25 – Unidade dissipadora 20Ω e 160W.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Apesar de superdimensionada a potência de 640W do banco de cargas, não foram encontradas outras combinações de menores custos de projeto, permanecendo assim com os resistores encontrados no mercado.

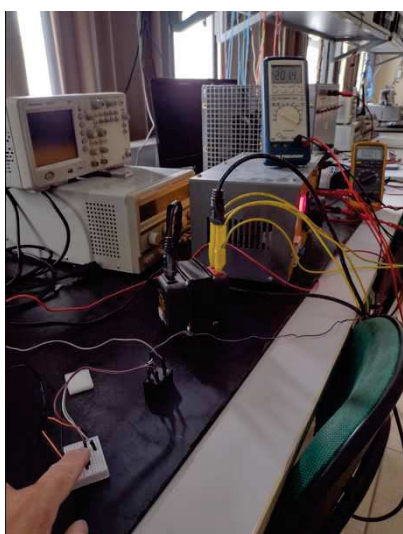
As aplicações das quatro unidades dissipadoras em série resultam em um banco de cargas de 80Ω e 640W, capaz de dissipar a potência da fonte em corrente nominal. Essa configuração de banco de cargas resultará em uma Corrente de Armadura (I_A) de 2,75A, valor tolerável para o transitório de partida da máquina.

3.3 CHAVEAMENTO DO BANCO DE CARGAS

Elaboradas as unidades dissipadoras, estas precisam ser inseridas em série com o circuito de armadura da máquina, e posteriormente, removidas de forma gradativa durante o transitório de partida da máquina. Para execução de tal operação foi definida a aplicação de relés para o chaveamento dos bancos. A escolha e aquisição destes relés apresentou um certo grau de dificuldade devido ao fato de que a maioria dos relés possuem características construtivas para operação em corrente alternada. No entanto, foi possível identificar no mercado um relé capaz de operar em corrente CC. Sendo assim, foram adquiridos cinco relés Ht2150(t90) 12v 6 pinos.

Para garantia de segurança e aplicabilidade, os relés foram submetidos a testes para verificação do seu funcionamento antes de serem aplicados ao projeto. A Figura 26 apresenta uma imagem dos testes realizados no relé.

Figura 26 – Teste de chaveamento relé Ht2150(t90) 12v 6 pinos.



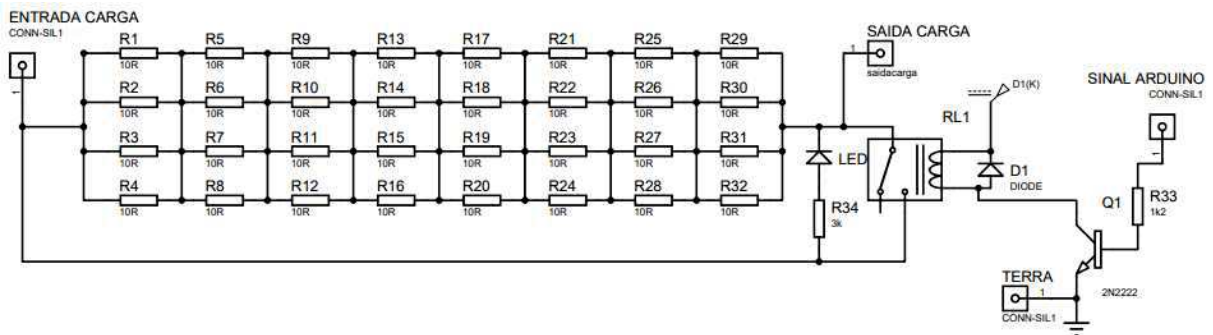
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para realizar os testes foram aplicados 220V e uma carga que resultasse em uma corrente de operação de 3A, como a corrente calculada para o demarrador é de 2,75A o teste foi apropriado para garantir o correto funcionamento do chaveamento.

Uma vez testado o relé, para realizar o seu acionamento dentro do protótipo, foi utilizado um circuito eletrônico conhecido como circuito de chaveamento com transistor, este também foi testado e obteve resultados satisfatórios.

Após a realização dos testes, foi iniciada a etapa de montagem e implementação do circuito de chaveamento e construção das placas de fenolite para fixar os componentes, a Figura 27 apresenta o circuito presente em cada unidade de carga.

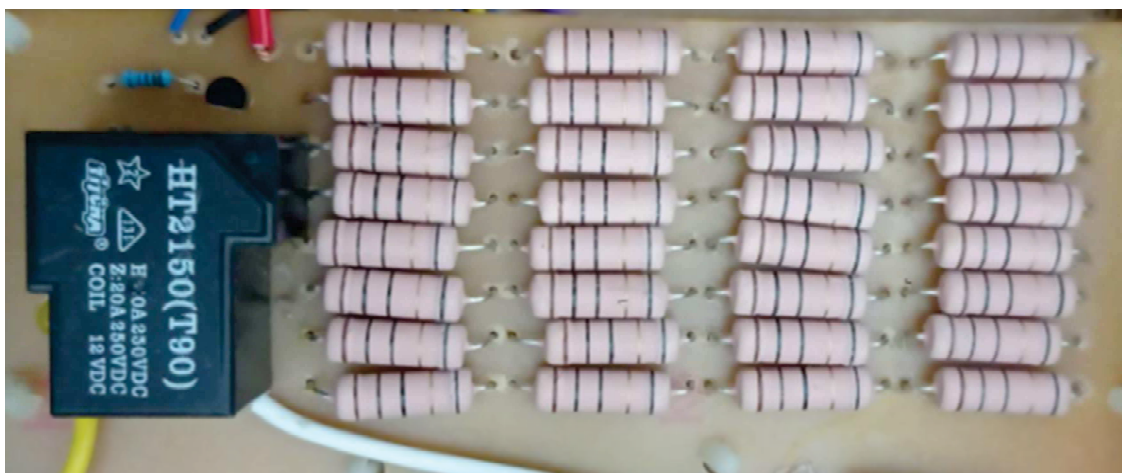
Figura 27 – Circuito por unidade de Carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Foram impressas as quatro placas de fenolite e em seguida fixados os componentes nas placas. As placas então foram testadas para confirmação de valores de resistência por placa. A Figura 28 apresenta o circuito de unidade de carga a ser aplicado no protótipo.

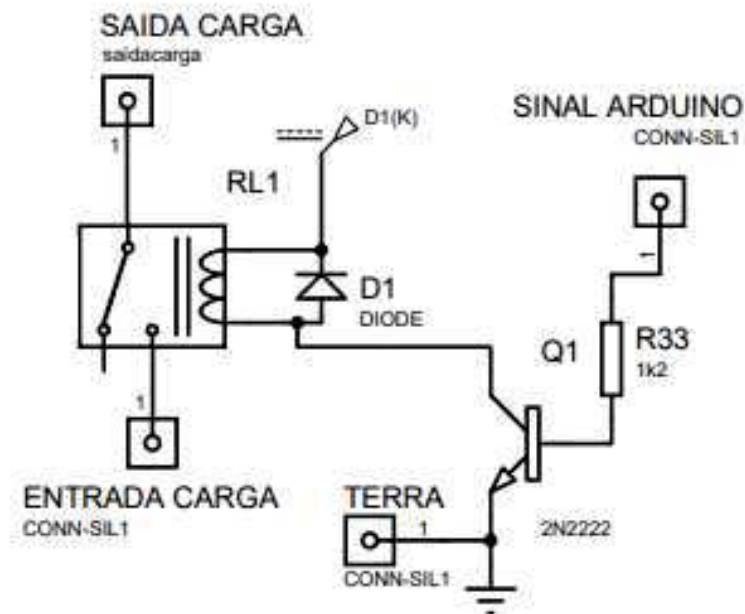
Figura 28 – Unidade de carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Após a elaboração das unidades de carga foi desenvolvido um circuito semelhante, criado exclusivamente para acionamento e desligamento da máquina, no qual os terminais do relé variam entre aberto e fechado para o circuito de armadura. A Figura 29 apresenta o circuito de acionamento da máquina.

Figura 29 – Circuito de acionamento da máquina.



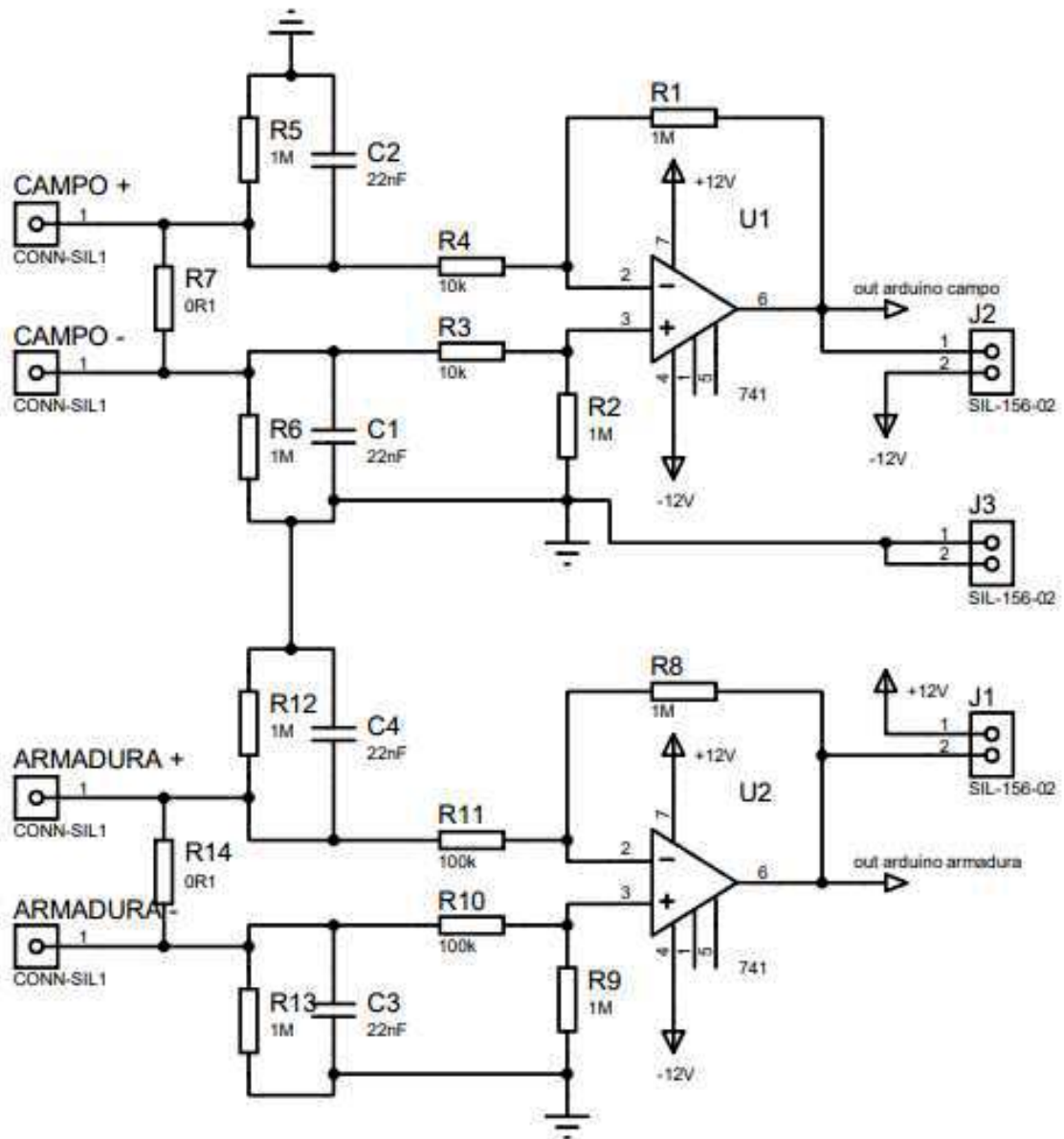
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Após imprimir as placas de fenolite, e definido que os chaveamentos destas placas partiriam de um sinal emitido pelo arduino, iniciou-se a elaboração do algoritmo que atuaria na automação do demarrador. O próximo passo então foi medir a corrente de armadura em tempo real através do arduino.

3.4 MEDIÇÕES DE CORRENTE

Dentre as possibilidades para realização da medição de corrente, definiu-se pela aplicação de um resistor em série com os circuitos de armadura e campo. A leitura da corrente é realizada de maneira indireta, por meio do valor de tensão enviado ao arduino. Para realização destas medições foram adquiridos quatro resistores 0.1Ω e $10W$. Para adequação dos níveis de tensões medidas para o processamento no arduino, foram elaborados circuitos amplificadores de tensão. Estes circuitos se encontram dispostos na Figura 30.

Figura 30 – Circuito amplificador de tensão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A Figura 31 apresenta os testes realizados em laboratório com os circuitos de amplificação de tensão.

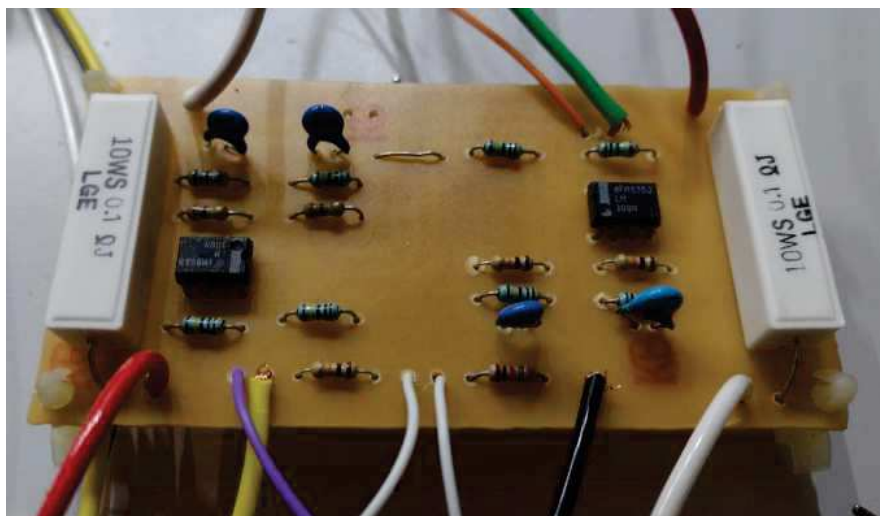
Figura 31 – Teste em circuitos amplificadores de tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Após a realização dos testes, foi construída uma placa para fixação dos componentes que foi agregada ao protótipo. A Figura 32 apresenta a placa de medição de corrente de armadura e campo.

Figura 32 – Placa de medição de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

De posse das unidades de carga, unidade de acionamento e unidade de medição de corrente, iniciou-se a elaboração do algoritmo de controle, onde estes foram levados a testes junto a máquina CC.

Como o intuito de um demarrador de partida é garantir que a corrente da máquina permaneça dentro de valores ideais, definiu-se que a remoção de uma unidade de carga deveria ocorrer quando a sua ausência não resultasse em uma elevada corrente na armadura da máquina. Portanto, enquanto a impedância da máquina aumenta durante o transitório de partida as cargas serão removidas gradativamente.

Observando que cada uma das quatro unidades de carga possui o valor de 20Ω , após a remoção da primeira unidade de carga, as demais três unidades terão o montante de 60Ω , se aplicarmos somente este valor de resistência à Equação (23) a corrente resultante seria de aproximadamente $3,66A$, valor este superior à corrente nominal da máquina. Então definiu-se que o momento ideal para se retirar uma unidade de carga seria aquele que resultasse em uma corrente máxima de $2,2A$.

Utilizando-se ainda da Equação (23), para que a corrente respeite o limite de $2,2A$, a resistência total logo após a saída da primeira unidade de carga (máquina e três unidades de carga) deve ser de 100Ω , este se trata então do momento ideal para o primeiro chaveamento.

Um instante de tempo antes deste momento ideal, ainda estará conectado ao circuito a primeira unidade de carga, e para este instante de tempo, estarão presentes no circuito os 100Ω ditos anteriormente mais os 20Ω da primeira unidade de carga. Este montante de 120Ω aplicados à Equação (23) resultam em uma corrente I_A de $1,83A$.

Com o arduino fazendo a leitura de corrente em tempo real, e este também efetuando o chaveamento das unidades de carga, foi aplicado ao algoritmo que o momento em que a corrente I_A atingir $1,83A$ será removida uma unidade de carga, garantindo assim que a corrente do circuito permaneça dentro do valor nominal.

Considerando-se o valor de $1,83 A$ como sendo ideal, a programação do algoritmo foi realizada de modo que, cada vez que a corrente cair e atingir o valor de $1,83 A$, uma unidade de carga é removida. A Tabela 1 apresenta os valores aplicados na Equação (23) durante o transitório da máquina.

Tabela 1 – Corrente resultante em função da variação da impedância.

V_F [V]	Z_A [Ω]	R_A [Ω]	I_A [A]
220	0	80	2,75
220	10	80	2,44
220	20	80	2,20
220	30	80	2,00
220	40	80	1,83
220	40	60	2,20
220	50	60	2,00
220	60	60	1,83
220	60	40	2,20
220	70	40	2,00
220	80	40	1,83
220	80	20	2,20
220	90	20	2,00
220	100	20	1,83
220	100	0	2,20
220	110	0	2,00

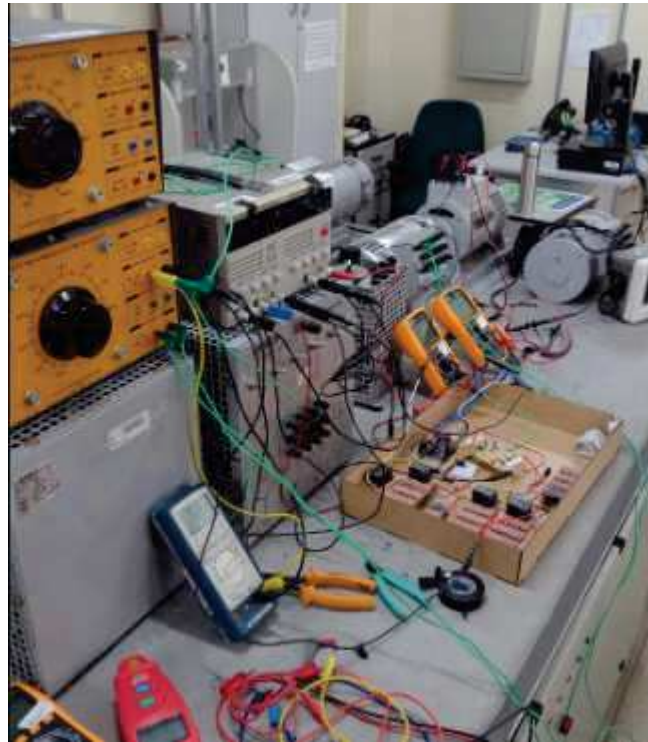
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Além disso, foram incluídos no projeto, por questões de segurança e operação, um botão para o usuário iniciar e encerrar o processo de operação da máquina e um controle para atuação em casos de valores de corrente de campo muito baixos, “perda de campo”, que possam levar a disparada da máquina. Neste caso, o controle interrompe a alimentação da armadura, desligando o motor.

Finalizada a etapa de desenvolvimento do algoritmo, foram realizados testes para verificar se todas as funcionalidades operavam conforme esperado. A Figura 33 mostra o protótipo sendo aplicado a máquina para testes. Durante os testes foi constatado que a fonte utilizada para acionamento das máquinas de corrente contínua era uma fonte retificadora de onda completa, fazendo com que o circuito criado operasse de forma irregular.

Visto que tratar o sinal desta fonte, ou até mesmo ajustar o dispositivo até o momento criado traria um aumento de custo ao projeto, ou até mesmo um reajuste construtivo, definiu-se então por deixar de utilizar o sistema de medição de corrente, visto a possibilidade de se realizar um chaveamento de forma temporal.

Figura 33 – Teste do protótipo aplicado a máquina CC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.5 CHAVEAMENTO TEMPORAL DAS UNIDADES DE CARGA

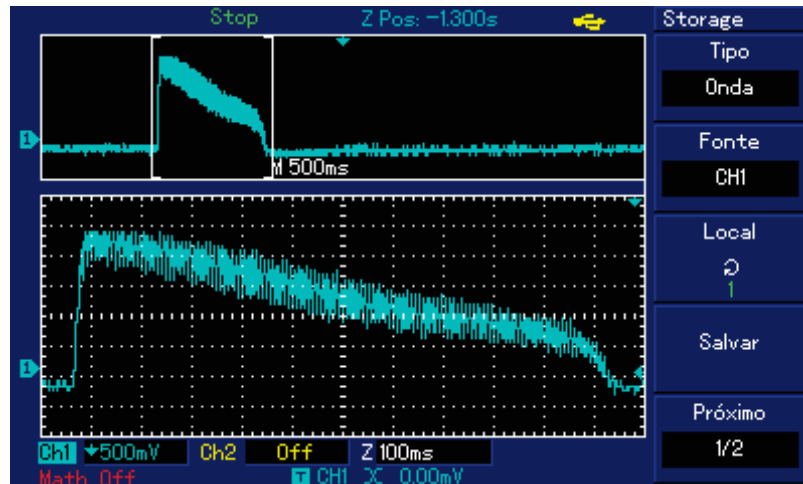
Na fase de testes anterior foi verificado que não seria possível o chaveamento utilizando-se como referência a corrente de armadura. Sendo assim, a abordagem utilizada foi a verificação dos instantes de tempo ideais para realizar o chaveamento, garantindo valores de corrente dentro dos limites de projeto. Além disso, o fato de não ser possível aferir a corrente de armadura, pelos motivos já supracitados, o sistema de interrupção devido à falta de corrente de campo, também foi excluído do projeto. Para garantia da segurança da operação da máquina, contra disparo, a armadura e o campo foram alimentados utilizando-se uma mesma fonte, de modo que, faltando corrente para o campo, faltará para armadura também, provocando o desligamento imediato da máquina.

Para identificação dos instantes de partida ideais, foram realizadas medições de tensões e correntes com auxílio de um osciloscópio e utilizando um dispositivo que possui um sensor de corrente interno.

Este sensor foi aplicado em série com o circuito de armadura da máquina e o mesmo apresenta valores de tensão em seus terminais de saída conforme a variação de corrente do circuito. Medidas as variações de tensão, deve-se realizar uma conversão do valor de tensão em

corrente, esta conversão é de aproximadamente 8,7882A para cada 1V medido. Para registrar esta variação de tensão foi aplicado um osciloscópio na saída do dispositivo, cuja curva pode ser visualizada na Figura 34.

Figura 34 – Curva de tensão medida por sensor de corrente na partida da máquina.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Foi realizado o acionamento da máquina, sem a presença de um método de partida, e observou-se após passados aproximadamente um segundo, os valores de corrente ainda não se estabeleceram próximos ao valor nominal. A Tabela 2 registra as tensões medidas em função do tempo, e também o valor de corrente aplicando a conversão do dispositivo de medição.

Tabela 2 – Dados de partida da máquina sem carga.

V_M [V]	t [s]	I_A [A]
2,50	0	21,97
2,34	0,1	20,56
2,17	0,2	19,07
2,00	0,3	17,58
1,83	0,4	16,08
1,67	0,5	14,68
1,50	0,6	13,18
1,33	0,7	11,72
1,17	0,8	10,25
1,00	0,9	8,79
0,83	1,0	7,32

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

De posse dos dados e sem identificar o momento em que a máquina entraria em regime permanente, foram realizados testes de partida de forma a variar o tempo de chaveamento, iniciou-se com 1,0s por estágio e este se mostrou excessivo.

Então foi reduzido o tempo em 0,1s e refeito o teste, processo este que se repetiu até encontrar o tempo de chaveamento de 0,5s por estágio, resultando em um total de 2,0s até a remoção das quatro unidades de carga.

Aplicado estes dados ao algoritmo o mesmo foi levado a um novo teste, neste foram registrados os dados de forma semelhante ao teste a vazio, porém com a presença do protótipo demarrador de partida. Estes resultados serão apresentados na seção de resultados e discussões. Registrados seus resultados seguiu-se para o processo de interação com o usuário.

3.6 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Como o projeto do demarrador trata-se de um protótipo o ser utilizado por futuros alunos do IFMG, é necessário que o mesmo seja de simples compreensão e fácil execução. Desta forma, todo o protótipo foi alocado em uma caixa de madeira que possui um trecho da tampa em acrílico, permitindo ao aluno enxergar os componentes em seu interior, e no outro trecho da tampa componentes com orientações de uso.

Como forma de apresentar o projeto e ao mesmo tempo passar segurança ao usuário, foi adicionado ao projeto um display LCD 16x2, que apresenta mensagens durante todo o processo de utilização do protótipo. A Figura 35 apresenta um exemplo destas mensagens inseridas no algoritmo.

Figura 35– Display LCD em operação.



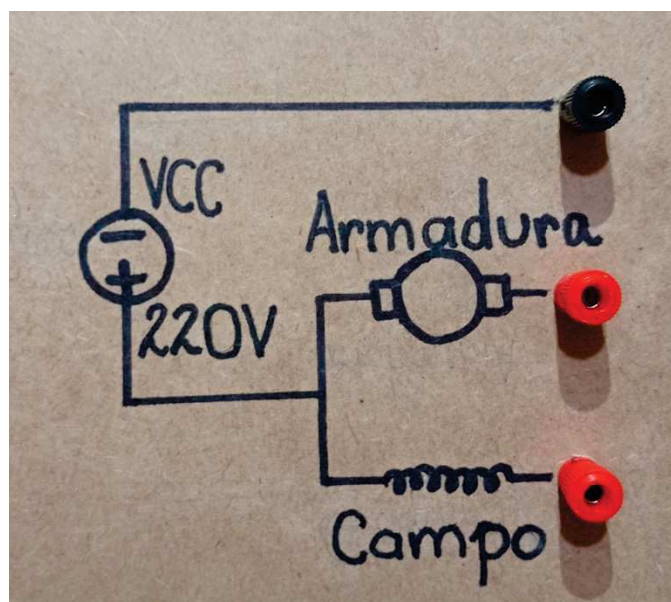
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A mensagem exibida no exemplo traz o trecho de apresentação do protótipo, em seguida é apresentado ao usuário uma mensagem que o sistema está pronto para iniciar e solicita que o usuário dê a partida no motor. Desta forma, mesmo que os circuitos se encontrem energizados, o protótipo aguardará a ordem do usuário para permitir a passagem de corrente pela armadura.

Quando o usuário aciona o botão, o processo de chaveamento se inicia, e para permitir que o processo seja encerrado foi adicionado ao algoritmo a condição de que, se o botão for pressionado novamente, o circuito de armadura se abrirá, causando o encerramento da operação da máquina. Caso as cargas sejam removidas o display irá apresentar uma mensagem de que o motor se encontra em plena operação e orientar ao usuário que aperte o botão para encerrar.

Além dos botões de acionamento e segurança, foram fixados à tampa, bornes para a conexão entre o motor e a fonte. Para garantir que as conexões sejam realizadas de forma correta existe um circuito desenhado sobre a tampa indicando como cada terminal deve ser ligado. A Figura 36 apresenta o circuito sobre a tampa.

Figura 36 – Circuito para conexão entre fonte, máquina e protótipo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.7 DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO

Para utilizar do arduino como dispositivo de automação, foi necessário compreender um pouco mais sobre seu funcionamento, sobre a sua linguagem em C++ e itens que acompanham seu kit. Durante a elaboração do algoritmo, foram utilizados trechos de diversos códigos já

criados anteriormente pelo autor, e também de trechos e bibliotecas que acompanham o próprio menu de exemplos do arduino.

O algoritmo desenvolvido é apresentado no Anexo – A. A programação foi dividida em três segmentos, sendo o seguimento inicial aquele que define as bibliotecas, as variáveis, apresenta as mensagens no display LCD e em seguida aguarda o acionamento do botão.

O segundo segmento trata do momento transitório da máquina, no qual, após pressionar o botão, é acionado o circuito de armadura, a contagem de tempo e o chaveamento das unidades de carga. Paralelo a estes processos, o algoritmo faz leituras e verificações se ocorreu um novo acionamento do botão, e em caso sim encerra a operação da máquina.

O último seguimento trata da operação da máquina após o período transitório, no qual ele informa ao usuário que as unidades de carga do sistema de controle de partida foram removidas e o motor segue em plena operação. Em seguida o programa fica aguardando o acionamento do botão para encerrar a operação. Após encerramento o sistema é reiniciado e volta ao segmento inicial.

O capítulo seguinte apresentará o protótipo construído e os resultados a partir de sua aplicação, permitindo assim a validação do mesmo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como o objetivo deste trabalho trata da construção de um dispositivo, se fez necessária a aquisição de alguns componentes, e assim foram registrados os custos dos mesmos. Além dos itens adquiridos, alguns outros foram doados pelo autor e tiveram seus valores de mercado estimados. A Tabela 3 apresenta uma relação destes itens citados.

Tabela 3 – Custo estimado do protótipo.

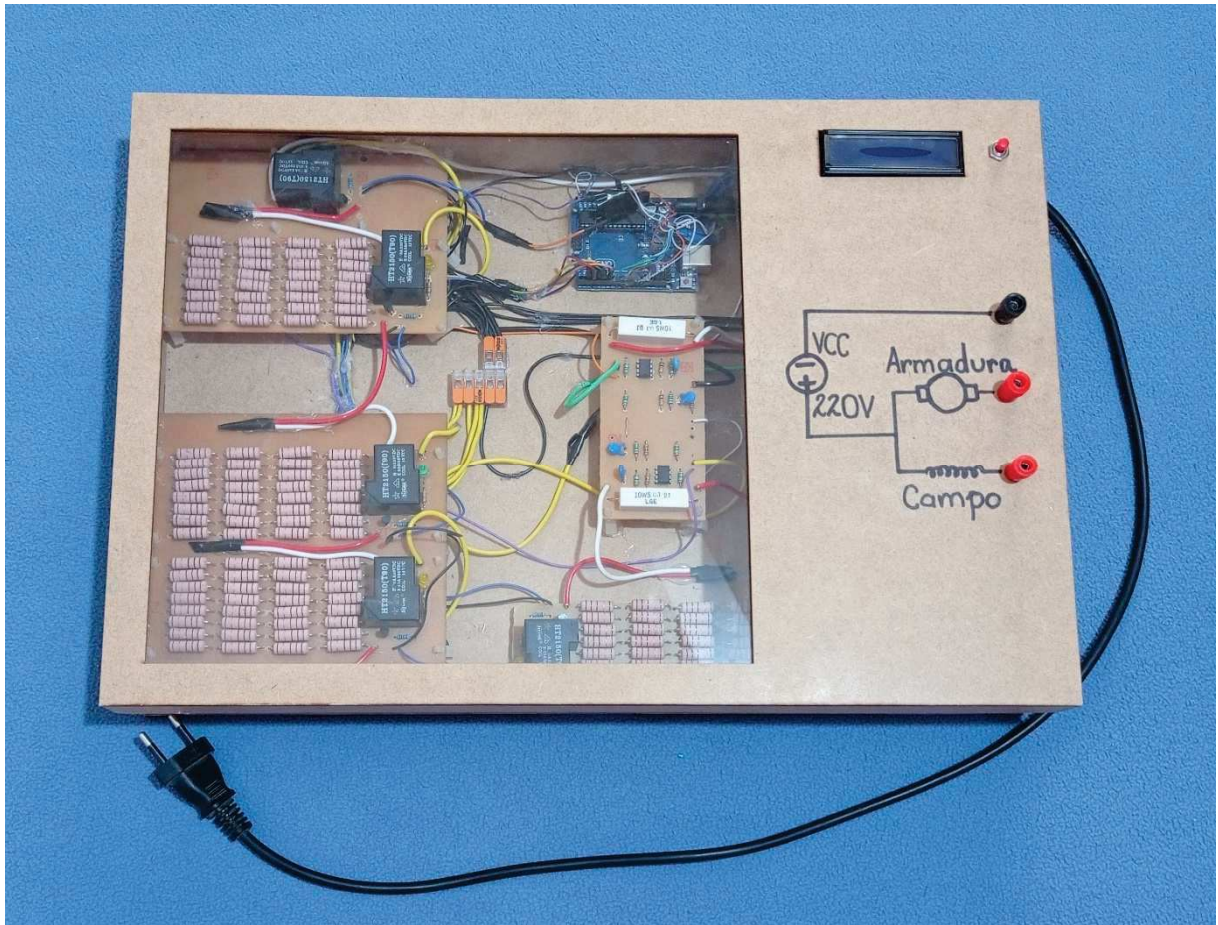
Componente	Valor estimado
1 Caixa de madeira	R\$ 45,00
1 Kit Arduino	R\$ 100,00
140 Resistores 10Ω 5W	R\$ 114,83
4 Resistores 0.1 Ω 10W	R\$ 20,00
5 Relés Ht2150(t90) 12v	R\$ 62,40
1 Botão pulsador	R\$ 3,50
7 Bournes	R\$ 35,00
6 Amp. Operacional LM741	R\$ 21,00
2 Conectores Wago	R\$ 8,00
Total estimado	R\$ 409,73

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Além dos componentes listados foram utilizados: cabos, soldas, adesivos, fontes de tensão 12V, cabo de alimentação e placas de circuito impresso. Estes itens tiveram sua origem a partir de doações e não possuíam quantidades similares no mercado para realização de estimativa de valores.

Após testadas as frações do projeto e ajustados os métodos de operação, o protótipo foi concluído e o mesmo pode ser observado na Figura 37.

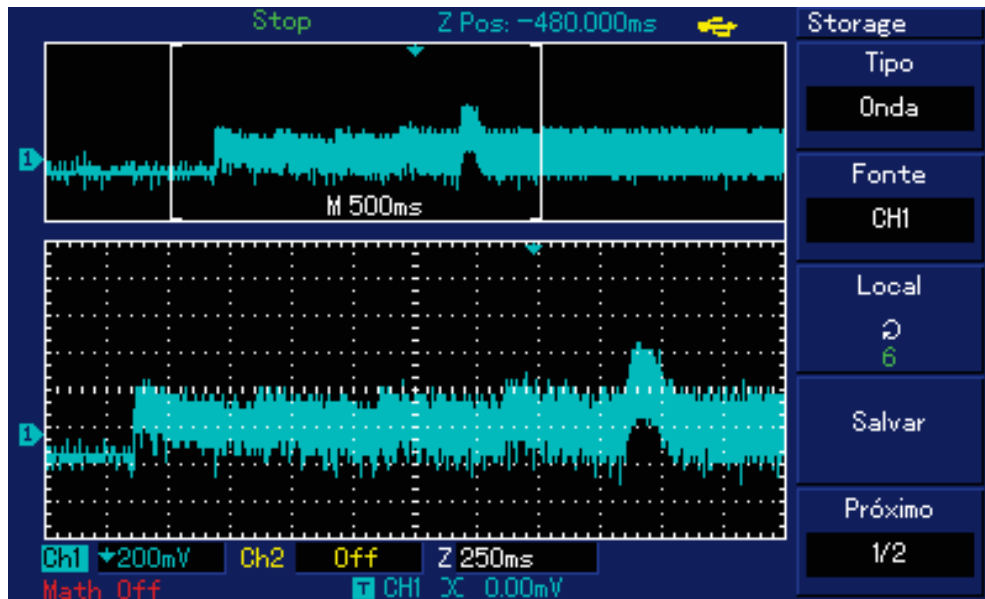
Figura 37 – Protótipo de demarrador de partida.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O processo de validação do protótipo desenvolvido foi realizado por meio de testes no laboratório de máquinas do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Formiga. Para tal, o mesmo foi ligado a máquina CC e foram realizadas partidas a vazio e posteriormente com carga. Foram realizadas medições de corrente de operação da máquina com amperímetros e também com o sensor de corrente anteriormente utilizado para obtenção de dados da máquina. Adicionalmente, foi utilizado um osciloscópio na saída do sensor para registro da curva de saída. A Figura 38 apresenta a curva de corrente da máquina com a aplicação do protótipo.

Figura 38 – Curva de tensão medida por sensor de corrente na partida da máquina com demarrador de partida.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Realizando a conversão do sensor aplicado (tensão medida para corrente de operação), foi elaborada a Tabela 4 para auxiliar na compreensão dos dados obtidos.

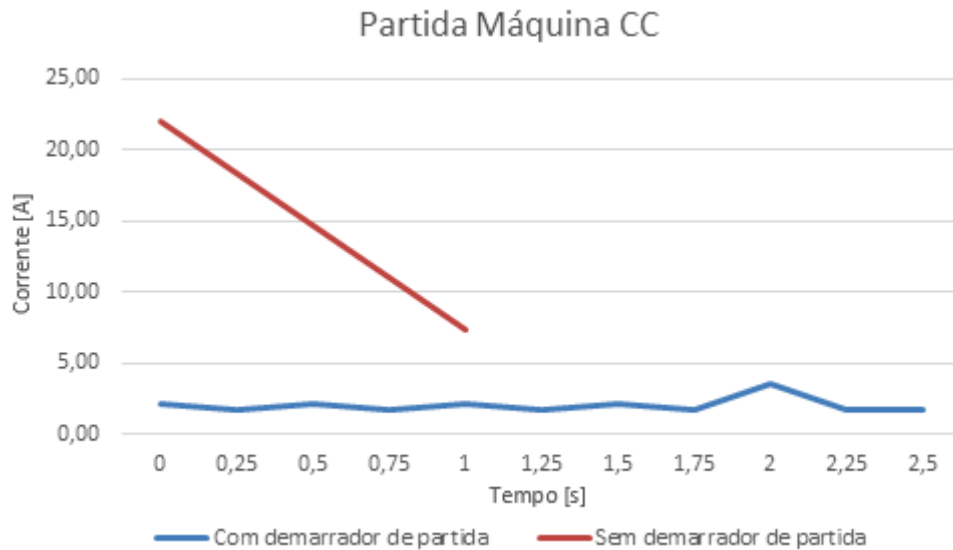
Tabela 4 – Dados de partida da máquina com carga e demarrador de partida.

V [V]	t [s]	I _A [A]
0	0	0
0,25	0	2,20
0,20	0,25	1,76
0,25	0,50	2,20
0,20	0,75	1,76
0,25	1,00	2,20
0,20	1,25	1,76
0,25	1,50	2,20
0,20	1,75	1,76
0,40	2,00	3,52
0,20	2,25	1,76
0,20	2,50	1,76

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Com intuito de comparar os resultados da partida da máquina com e sem a aplicação do demarrador de partida, foram resgatados os dados registrados na Tabela 2 e na Tabela 4, e então elaborado o gráfico que se encontra disposto na Figura 39.

Figura 39 – Gráfico de corrente de partida da máquina com e sem demarrador de partida.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Observando-se a Figura 4.3 é possível perceber que, ao acionar a máquina sem um método de partida, a mesma inicia sua operação com a corrente de aproximadamente dez vezes seu valor nominal e esta permanece acima do valor nominal de trabalho por mais de um segundo. No entanto, quando se utiliza o demarrador para realizar a partida, é possível notar que durante os dois segundos em que o demarrador permaneceu operando, a partida da máquina possuía valores de corrente de armadura próximos de ser valor nominal. Então, após os dois segundos o demarrador deixa de atuar no circuito, a corrente sofre oscilações de valores menores que duas vezes o valor nominal e em aproximadamente 250 milissegundos a máquina se encontra em ponto de operação ideal.

Os resultados mostram que o demarrador desenvolvido neste projeto consegue limitar a corrente de partida do motor CC com carga, considerando os valores estabelecidos em projeto. Vale ressaltar que, para definir novos valores de corrente de partida de projeto, seria necessário calcular um novo conjunto de bancos de resistências. Além disso, existe a possibilidade de alterar no programa, os tempos para atuação dos bancos de acordo com a aplicação ou com a quantidade de carga que o motor estiver acionando. Análises com relação ao torque na partida não foram realizadas devido a dificuldades de medição desta grandeza no laboratório. Apesar disso, observa-se que o demarrador foi capaz de atuar, limitando a corrente de partida, para uma situação de carga próxima à nominal.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste trabalho evidenciaram que o dispositivo desenvolvido conseguiu cumprir de maneira adequada com o seu propósito. Foi possível realizar a partida do motor de corrente contínua do laboratório de máquinas, com carga, e garantindo durante toda a partida, valores de corrente estipulados no projeto.

No que diz respeito ao monitoramento de operação da máquina, o fato de utilizarmos fontes de tensão retificadoras em 220V, impediu a aplicação dos circuitos de medição já construídos. Para que a utilização deste fosse possível seriam necessárias grandes alterações nos circuitos, o que não pode ser implementado em função do tempo de desenvolvimento deste TCC. Tais aspectos podem ser desenvolvidos em trabalhos futuros.

Vale ressaltar que, a montagem física do dispositivo foi desenvolvida de modo a torná-lo didático podendo ser utilizado durante as aulas de Máquinas 1 quando for abordado o assunto de métodos de partida de motores de corrente contínua. Com este propósito, o projeto foi montado considerando-se também os custos das peças e facilidade de obtenção das mesmas, permitindo que outros dispositivos deste possam ser montados para atendimento ao número de bancadas disponíveis no laboratório.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como forma de acrescentar funcionalidades e aumentar a eficiência do protótipo elaborado neste trabalho, seguem sugestões de pesquisa:

- Elaboração de um circuito de medição de corrente que opere com fontes retificadoras de onda completa, permitindo trazer informação em tempo real para o protótipo.
- Elaborar mais um circuito para fazer a estabilização de sinal emitido pela placa de medição de corrente, instalando este entre a placa e o Arduino. Isso permitirá uma leitura eficaz que pode ser utilizada para ajuste do algoritmo.
- Uma vez que a informação de corrente for implantada, elaborar um algoritmo que forneça informações ao usuário e realize interrupções ao circuito, caso este siga operando fora dos valores de placa da máquina CC. Este fato também permitiria a elaboração de práticas com fontes independentes.

Ajuste do protótipo a novas fontes de alimentação, caso o laboratório de máquinas elétricas venha a adquirir novas fontes, e estas possuam sinal contínuo.

6 REFERÊNCIAS

AFONSO, Joao Manuel Parada. **Ensaio de motores elétricos**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra.

BOSA, Jefferson Luiz. **Sistema embarcado para a manutenção inteligente de atuadores elétricos**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/L10295.htm. Acesso em: 03 ago. 2022.

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Brasília, DF: Palácio do Planalto, 2001. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/L10295.htm. Acesso em: 02 ago. 2022.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. AMGH Editora, 2013.

CUNHA, Alessandro F. O que são sistemas embarcados. **Saber eletrônica**, v. 43, n. 414, p. 1-6, 2007.

DA SILVA, Rogério Oliveira; ARAUJO, Warley Monteiro; CAVALCANTE, Maxwell Machado. Visão Geral Sobre Microcontroladores e Prototipagem com Arduino. **Tecnologias Em Projeção**, v. 10, n. 1, p. 36-46, 2019.

DIAS, Bryan Souza. **Análise comparativa do desempenho de um controlador pi e pid aplicado em um motor de corrente contínua**. 2018.

El-Sharkawi, MA (2007). **Primeiro Curso de Energia: Além das Máquinas Elétricas**. Reunião Geral da Sociedade de Engenharia de Energia IEEE de 2007. doi: 10.1109 / pes.2007.385752.

Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-46/topico-81/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf. Acesso em 02 ago. 2022.

Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em:

<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/balanco-energetico-nacional/5-edicoes-anteriores/ben-2018-ab-2017.pdf/view>. Acesso em 02 ago.2022.

Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2019: Ano base 2018 / Empresa de Pesquisa Energética.** – Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>. Acesso em 02 ago.2022.

FRANCISCO, Antônio. **Motores Elétricos.** 5°. ed. Lisboa: ETEP, 2013. 196 p. ISBN 9728480342.

FUENTES, Rodrigo Cardozo. **Automação Industrial.** Santa Maria, 2005. Disponível em: http://w3.ufsm.br/fuentes/index_arquivos/CA05.pdf. Acesso em: 7 mai. 2020.

GRAND VIEW RESEARCH. Relatório de análise de mercado de vendas de motores elétricos por aplicação (veículos automotores, HVAC), por potência (saída HP integrada, saída HP fracionária), por tipo de motor (hermético, CA, CC) e previsões de segmento. São Francisco, Grand View Research 2019. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/electric-motor-market>. Acesso em: 30 abr. 2020.

KOSOW, Irving L. **Máquinas elétricas e transformadores.** Globo, 1985.

LEÃO, Fábio Bertequini. **Introdução a Medidas Elétricas.** Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/capitulo-1_medidas-eletricas_fabiobleao.pdf. Acesso em: 05 ago. 2022.

MAMEDE FILHO, João. **Partida de motores elétricos de indução.** Revista Tecnologia, v. 7, n. 1, 1986

MATAS, Alexandre Luiz. **Sintonia de controladores PID com controle adaptativo por modelo de referência (MRAC) aplicado a um motor de corrente contínua.** São Carlos, 2012. 50 f. Dissertação de Conclusão de curso (Graduação) – Universidade de São Paulo (USP). Disponível em: <http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-07112012-155526/?&lang=br>. Acesso em: 12 abr. 2018.

MAUSBACH, Lucas Baraldi. **Método para monitoramento de motores de corrente contínua integrados a redes de IoT.** Disponível em <http://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/xmlui/handle/123456789/15058> . Acesso em: 04 ago. 2022.

MCROBERTS, Michael. **Arduino básico**. Disponível em https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4287597/mod_resource/content/2/Ardu%C3%ADno%20B%C3%A1sico%20-%20Michael%20McRoberts.pdf. Acesso em: 05 ago. 2022.

MORAES, Fillipe Alexandre. **ESTUDO EM VAZIO SOBRE MOTORES CC COM ÍMÃ PERMANENTE COM APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**. Orientador: Marcelo Barcik. 2015. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Industrial Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12015/1/CT_COELE_2015_2_03.pdf. Acesso em: 29 abr. 2020.

NEVES, E. G. C; MÜNCHOW, R. Caderno Didático – Eletrotécnica –Capítulo 06 - Medidas Elétricas. Vol. 1. Universidade Federal de Pelotas (UFPEL).

SEIXAS, Falcondes José Mendes de. **Máquinas Elétricas II**. 2. ed. II: Ilha Solteira SP, 2012. 74 p.

VILLAR, GILENO JOSÉ DE VASCONCELOS. **Geradores e Motores CC**. 2006.

WEG S.A. **Motores de Corrente Contínua**. Jaraguá do Sul, 2012. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h19/h74/WEG-motores-de-corrente-continua-50005370-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2020.

WOLFF, Joca. **O motor Elétrico: Uma história de energia inteligência e trabalho**. 1. Editora UNERJ, Jaraguá do Sul, 2004. ISBN 85-88535-03-3.

7 ANEXO A – ALGORITMO APLICADO AO PROTÓTIPO

```

#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd ( 12, 11, 10, 9, 8, 7);

int bot = 0;      //variavel para botao de controle
int onbot = 0;    //variavel para botao acionado
int rele1 = 0;    //variavel para acionar rele 1
int rele2 = 0;    //variavel para acionar rele 2
int rele3 = 0;    //variavel para acionar rele 3
int rele4 = 0;    //variavel para acionar rele 4
int desliga = 0;  //variavel para desligar motor

void setup() {

    // definindo portas entrada e saida
    pinMode (A0, INPUT);
    pinMode (A2, INPUT);
    pinMode (A4, OUTPUT);
    pinMode (A5, OUTPUT);
    pinMode (2, OUTPUT);
    pinMode (3, OUTPUT);
    pinMode (4, OUTPUT);
    pinMode (5, OUTPUT);
    pinMode (6, OUTPUT);

    //garantir circuito aberto ate acao do usuario
    digitalWrite (2, HIGH);
    digitalWrite (A4, HIGH);
    Serial.begin(9600);
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.clear();

    abertura();
}

void loop() {

    bot = analogRead(A5);

    if (onbot == 1){
        if (bot > 1){
            desliga = 1;
        }
    }
}

```

```

    if (bot > 1){
        if (desliga == 1){
            digitalWrite (2, HIGH);
        }
        desliga = 0;
        desligar();
    }
    else{
        onbot = 1;
    }
}

if (onbot == 1){
    digitalWrite (2, LOW);
    rele1 = 1;
    if (desliga == 0){
        delay(500);
    }
}

if (rele4 == 1){
    digitalWrite (6, HIGH);
    ativo();
}

if (rele3 == 1){
    rele4 = 1;
    digitalWrite (5, HIGH);
}

if (rele2 == 1){
    rele3 = 1;
    digitalWrite (4, HIGH);
}

if (rele1 == 1){
    rele2 = 1;
    digitalWrite (3, HIGH);
}

void abertura() {

```

//confere botao
//abre circuito de armadura, desligando a
//aciona o circuito de armadura, desligando rele
//aciona se o estagio 3 esta acionado para acionamento
//verificar se o estagio 2 esta acionado para
//verificar se o estagio 1 esta acionado para
//verificar se o estagio 1 foi acionado


```

lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(" BEM VINDO! ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("          ");

delay(2000);

lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("PROTOTIPO DE TCC");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("ANDRE L EUFRASIO");
delay(5000);

lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("ACIONAR O MOTOR ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("APERTE O BOTAO ");
}

void ativo() {

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("CARGAS REMOVIDAS");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(" PLENA OPERACAO ");
  delay(2000);

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(" PARA DESLIGAR ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(" APERTE O BOTAO ");
  delay(2000);

  desliga = 1;
}

void desligar() {

  digitalWrite (2, HIGH);           //abre circuito de armadura, desligando a maquina
  digitalWrite (3, LOW);
  digitalWrite (4, LOW);
  digitalWrite (5, LOW);
  digitalWrite (6, LOW);
  rele1 = 0;    //variavel para acionar rele 1
  rele2 = 0;    //variavel para acionar rele 2
  rele3 = 0;    //variavel para acionar rele 3
  rele4 = 0;    //variavel para acionar rele 4
  onbot = 0;

```

```
desliga = 0;
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(" FIM DA ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(" OPERACAO ");
delay(5000);
abertura();
}
```