



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO  
TOCANTINS  
CAMPUS PALMAS  
CURSO SUPERIOR ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SAULO DAVI MAIRESSE RAMOS  
LEONARDO FRANCISCO DUTRA**

**CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA PELA  
TENSÃO DE ARMADURA**

**PALMAS  
2025**

**SAULO DAVI MAIRESSE RAMOS  
LEONARDO FRANCISCO DUTRA**

**CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA PELA  
TENSÃO DE ARMADURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenação do Curso de Bacharelado em  
Engenharia Elétrica do Instituto Federal do  
Tocantins Campus Palmas, como exigência à  
obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia  
Elétrica.

Orientador: Mestre Mateus Lima Peduzzi

Palmas  
2026

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins**

---

R175c Ramos, Saulo Davi Mairesse Ramos  
CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR DE CORRENTE  
CONTÍNUA PELA TENSÃO DE ARMADURA / Saulo Davi Mairesse  
Ramos Ramos, Leonardo Francisco Dutra Dutra. – Palmas, TO,  
2026.

61 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia  
Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do  
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2026.

Orientador: Me. Mateus Lima Peduzzi Peduzzi

Coorientador: Me. Kaison Teodoro de Souza Souza

1. Controle de velocidade. 2. Motor de Corrente Continua. 3.  
Conversor CC-CC. I. Dutra, Leonardo Francisco Dutra. II. Peduzzi,  
Mateus Lima Peduzzi III. Souza, Kaison Teodoro de Souza. IV.  
Título.

**CDD 621**

---

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins  
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a).

**SAULO DAVI MAIRESSE RAMOS**  
**LEONARDO FRANCISCO DUTRA**

**CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA PELA  
TENSÃO DE ARMADURA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação do Curso de  
Bacharelado em Engenharia Elétrica do  
Instituto Federal do Tocantins Campus  
Palmas, como exigência à obtenção do  
título de Bacharel(a) em Engenharia  
Elétrica.

Aprovado em: 05/02/2026

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **MATEUS LIMA PEDUZZI**  
Data: 27/02/2026 19:36:53-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Mestre Mateus Lima Peduzzi (Orientador)**  
**IFTO - Campus Palmas**

Documento assinado digitalmente  
 **KAISSON TEODORO DE SOUZA**  
Data: 19/02/2026 04:19:00-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Mestre Kaison Teodoro de Souza**  
**IFTO - Campus Palmas**

Documento assinado digitalmente  
 **WALLYSONN ALVES DE SOUZA**  
Data: 19/02/2026 09:50:45-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Doutor Wallysonn Alves de Souza**  
**IFTO - Campus Palmas**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de sabedoria e fortaleza, por me sustentar e iluminar em cada etapa desta caminhada acadêmica.

À minha família, pelo amor incondicional, apoio constante e incentivo diário, fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Aos que contribuíram de maneira significativa para a realização deste trabalho: ao professor Mestre Mateus Peduzzi, pela responsabilidade e dedicação na orientação; ao professor Mestre Kaisson Teodoro, pelo apoio; e aos professores Marcos Balduino, Marcos André e Maxwell Moura, pela disponibilidade em esclarecer dúvidas e tornar mais clara a visualização do projeto e ao professor Valci Victor, por instigar e fortalecer nosso pensamento crítico ao longo do curso.

Aos engenheiros eletricitas Mathauss de Oliveira, Jackson Lewandowski e Matheus Gomes, pela generosidade em compartilhar seu tempo e conhecimento, esclarecendo questões técnicas essenciais e contribuindo para que os objetivos deste projeto fossem alcançados.

A cada um que, de alguma forma, fez parte desta jornada, deixo minha sincera gratidão.

*"Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes."* – Isaac Newton

## RESUMO

Este projeto apresenta o desenvolvimento de um sistema experimental para o controle de velocidade de um motor de corrente contínua (CC) com excitação independente. A regulação da velocidade é realizada através da variação da tensão de armadura, utilizando um protótipo de chaveamento baseado em um conversor CC-CC do tipo Buck operando de forma simplificada sem estágios de filtragem LC. O trabalho descreve detalhadamente o processo de extração dos parâmetros elétricos e mecânicos do motor real em laboratório para a obtenção de sua modelagem matemática (Função de Transferência). A partir dessa planta, foi implementado um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) em um microcontrolador Arduino. Os resultados experimentais, obtidos com o motor operando em vazio, demonstram a eficácia da malha de controle na manutenção das referências de velocidade, validando a integração entre hardware, teoria de controle e sistemas embarcados.

**Palavras-chave:** Motor de Corrente Contínua. Controle de Velocidade. Conversor CC-CC. Modulação PWM. Teoria de Controle.

## **ABSTRACT**

This project presents the development of an experimental system for controlling the speed of an independently excited direct current (DC) motor. Speed regulation is achieved by varying the armature voltage using a prototype switch based on a Buck-type DC-DC converter operating in a simplified manner without LC filtering stages. The work describes in detail the process of extracting the electrical and mechanical parameters of the actual motor in the laboratory to obtain its mathematical model (Transfer Function). Based on this model, a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller was implemented on an ARDUINO microcontroller. The experimental results, obtained with the motor operating at no load, demonstrate the effectiveness of the control loop in maintaining speed references, validating the integration between hardware, control theory, and embedded systems.

**Keywords:** Direct Current Motor. Speed Control. Buck DC-DC Converter. PWM Modulation. Control Theory.

## SUMÁRIO

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                                    | <b>9</b>  |
| <b>2 JUSTIFICATIVA</b>                                                 | <b>10</b> |
| <b>3 OBJETIVOS</b>                                                     | <b>11</b> |
| 3.1 Objetivo geral                                                     | 11        |
| 3.2 Objetivos específicos                                              | 11        |
| <b>4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                                         | <b>12</b> |
| 4.1 Contextualização histórica dos motores elétricos                   | 12        |
| 4.2 Contextualização Teoria de controle                                | 12        |
| 4.3 Aspectos construtivos do motor CC com escovas                      | 13        |
| 4.3.1 Estator do motor                                                 | 13        |
| 4.3.2 Rotor do motor                                                   | 14        |
| 4.4 Funcionamento do motor de CC                                       | 15        |
| 4.4.1 Geração de torque e sentido de giro                              | 16        |
| 4.4.2 Funcionamento da comutação                                       | 17        |
| 4.5 Método de excitação da máquina CC e resposta à velocidade x torque | 18        |
| 4.5.1 Excitação independente                                           | 18        |
| 4.5.2 Excitação shunt, paralelo ou derivação                           | 20        |
| 4.5.3 Excitação série                                                  | 21        |
| 4.6 Métodos de controle de velocidade para máquinas CC                 | 22        |
| 4.6.1 Variação da resistência de campo                                 | 22        |
| 4.6.2 Métodos de variação da tensão de armadura                        | 24        |
| 4.6.2.1 Ponte retificadora controlada                                  | 25        |
| 4.6.2.2 Retificadora com Transformador variável de Tensão              | 25        |
| 4.6.2.3 Variação da resistência de armadura                            | 26        |
| 4.6.2.4 Conversores CC-CC abaixadores de tensão                        | 27        |
| 4.7 Encoder                                                            | 28        |
| 4.8 Teoria de controle                                                 | 28        |
| 4.8.1 Função de transferência                                          | 29        |
| 4.8.1.1 Função de transferência do motor de corrente contínua          | 29        |
| 4.8.2 Compensador proporcional, integral e derivativo                  | 30        |

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| <b>5 METODOLOGIA</b>                                                 | 32 |
| 5.1 Coleta de Dados de Placa do Motor                                | 32 |
| 5.2 Instalação do Encoder e Circuitos de Medição                     | 32 |
| 5.3 Ensaios para Extração dos Parâmetros do Motor                    | 32 |
| 5.4 Análise das Curvas de Operação                                   | 33 |
| 5.5 Ensaios com Fontes de Tensão e Definição de Limites Operacionais | 33 |
| 5.6 Construção da interface de plotar o gráfico.                     | 33 |
| <b>6 MATERIAIS</b>                                                   | 34 |
| 6.1 Programas utilizados                                             | 34 |
| 6.2 Componentes eletrônicos                                          | 34 |
| 6.3 Componentes de controle e interface                              | 35 |
| 6.4 Materiais de bancada e conexão                                   | 35 |
| 6.5 Equipamentos de laboratório                                      | 36 |
| <b>7 DESENVOLVIMENTO</b>                                             | 37 |
| 7.1 O motor de corrente contínua Composto                            | 37 |
| 7.2 Ensaios do Motor CC                                              | 39 |
| 7.2.1 Constante elétrica e torque                                    | 40 |
| 7.2.2 Constante de atrito viscoso e momento de inércia               | 40 |
| 7.2.3 Resistência e indutância de armadura                           | 43 |
| 7.3 Função de Transferência do motor CC                              | 44 |
| 7.4 Projeto Placa PCB                                                | 47 |
| 7.4.1 Ponte retificadora + filtro capacitivo                         | 48 |
| 7.4.2 Circuito Bootstrap                                             | 48 |
| 7.4.2 Sensor de Velocidade e sinal PWM                               | 48 |
| 7.4.2.1 Disco encoder e Módulo do Sensor                             | 49 |
| 7.5 Desenvolvimento dos programas                                    | 50 |
| <b>8 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                                     | 51 |
| 8.1 Circuito chaveador feito na placa PCB                            | 51 |
| 8.2 Sensor de Velocidade                                             | 52 |
| 8.3 Resposta ao degrau na prática                                    | 55 |
| 8.4 Implementação e resultados do controle PID                       | 56 |
| <b>9 CONCLUSÕES</b>                                                  | 59 |
| <b>REFERÊNCIAS</b>                                                   | 60 |

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da engenharia iniciou-se de forma empírica, baseando-se em conhecimentos práticos transmitidos por gerações. Esse modelo evoluiu até o século XVII, quando o pensamento científico do Renascimento deu origem à engenharia moderna, caracterizada pelo uso de métodos científicos, modelagem matemática e experimentação controlada para compreender e aplicar as leis da natureza em projetos técnicos (Bazzo; Pereira, 2017).

Com o avanço da ciência e da complexidade crescente dos sistemas, a engenharia foi se especializando em diferentes áreas. Nesse sentido, o surgimento e a consolidação da engenharia elétrica trouxeram inúmeras inovações, como as máquinas elétricas que passaram a ser elementos indispensáveis nos sistemas modernos de produção, transporte e automação. Dentre os diversos tipos de máquinas elétricas, os motores de corrente contínua (CC) se destacam por sua simplicidade construtiva e facilidade de controle de velocidade, e mesmo que em muitas aplicações os motores de corrente contínua tenham sido substituídos pelos motores de corrente alternada, ainda sim, permanecem relevantes tanto em aplicações específicas quanto no contexto acadêmico das universidades (UMANS, 2014).

Paralelamente, o amadurecimento das teorias de controle, fruto da sistematização do pensamento metodológico decorrente da popularização do método científico e desenvolvimento de ferramentas matemáticas para modelagem de sistemas dinâmicos, tornou possível melhor compreender processos quanto manipular o comportamento de tais máquinas diante de variações de carga, tensão ou demanda (NISE, 2002).

## **2 JUSTIFICATIVA**

No decorrer do curso há um gradativo acúmulo de conhecimentos interdependentes, mas que nos projetos das disciplinas nem sempre há a oportunidade de envolvê-los de forma vasta. Nesse sentido, a primeira razão na qual motiva a realização deste trabalho é encontrar nele uma oportunidade de aplicação prática dos conhecimentos adquiridos no decorrer do curso como um todo.

Além disso, a segunda razão que orienta este trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta prática que ilustra a aplicação da teoria de controle no comportamento dinâmico de motores de corrente contínua. Atualmente os estudos laboratoriais em máquinas elétricas utilizam instrumentos como fontes, multímetros, amperímetros, tacômetro, que se limitam apenas à leitura de valores médios. A justificativa deste trabalho é, além de permitir o controle do motor, visualizar de forma gráfica as variações elétricas e mecânicas do motor, proporcionando um recurso mais rico para o aprendizado.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivos gerais**

Este trabalho visa implementar um módulo de leitura e controle de velocidade do motor CC através do controle de Tensão de Armadura via chaveamento PWM de uma fonte retificadora e visualização do comportamento da máquina em diferentes ciclos de chaveamento.

#### **3.2 Objetivos específicos**

1. Levantar os dados de placa e operação do motor de corrente contínua, através de pesquisa e ensaios.
2. Modelar o circuito equivalente de Armadura do Motor CC com seus respectivos valores de armadura e indutância.
3. Equacionar Matematicamente o Motor CC para a planta de controle.
4. Elaborar a Planta de Controle.
5. Levantar a disponibilidade de fontes de tensão contínua presentes nos laboratórios do instituto federal.
6. Dado os parâmetros de operação do motor e as fontes disponíveis de alimentação, elaborar as faixas de tensão de alimentação a serem trabalhadas e a faixa de velocidade a ser controlado pela nossa planta de controle.
7. Implementar um mecanismo de leitura de velocidade do eixo do motor para captação de dados e leitura das grandezas elétricas do motor para a planta de controle.
8. Implementar o sistema de Controle no ESP, que vai controlar o PWM da fonte chaveada.
9. Construir uma interface para a amostragem dos valores de velocidade do eixo, e ciclo de trabalho do alimentador.
10. Rodar testes de controle e documentar os resultados.

## **4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **4.1 Contextualização histórica dos motores elétricos**

No processo de industrialização moderna, pós 2ª Revolução Industrial, o mundo como um todo passou a ter maior entendimento dos fenômenos eletromagnéticos e a partir de experimentos iniciais feitos por Michael Faraday começou-se a desenvolver os projetos de Motores Elétricos, mas foi principalmente com Thomas Davenport, em 1837, com seu projeto de teste utilizando-se de eletroímãs e um comutador que o mundo viu pela primeira vez a criação de um motor elétrico, um motor de corrente contínua. Através deste experimento que se desenvolveram as bases teóricas para os motores elétricos modernos que hoje são indispensáveis desde a geração de energia, processos fabris e vida cotidiana (Cloix, 2025a).

Concomitantemente com o avanço das ciências e engenharia, as indústrias de maneira geral buscam recorrentemente automatizar processos, ou realizar transformação de energia, controlar posição de pás ou asas, controlar velocidade de hélices ou turbinas e para isto, recorrentemente são utilizados motores elétricos. (NISE, 2002).

### **4.2 Contextualização teórica de controle**

Com o avanço das técnicas de controle e automação de processos, o uso de motores CC permitiu o aperfeiçoamento de soluções mecânicas com a implementação de sistemas eletrônicos, agregando precisão e maior eficiência operacional. Por suas boas características dinâmicas, simplicidade construtiva, e facilidade na implementação de controle, os motores cc popularizaram-se como elementos para aplicações que demandam precisão no controle de velocidade variável, torque e posição. Em ambientes educacionais é recorrente a utilização do mesmo para estudo da conversão eletromecânica de energia e aplicações práticas de controle (Chapman, 2013).

No entanto, vale observar que apesar das vantagens, esses motores também possuem limitações construtivas, como a necessidade de manutenção regular devido ao desgaste de escovas e comutadores, e o risco de faiscamento, o que os torna inadequados para ambientes com atmosfera explosivas ou contaminadas (UMANS, 2014). Ainda assim, pelo seu comportamento previsível e controlável, continuam sendo amplamente utilizados em módulos de ensino, como em bancadas didáticas,

sistemas embarcados, robótica ou em aplicações industriais que exigem controle refinado, e resposta rápida a variações de carga e regime de operação.

### **4.3 Aspectos construtivos do motor CC com escova**

Sua construção típica envolve dois subsistemas principais: o estator, parte fixa do motor responsável por gerar o campo magnético necessário à operação, também chamado de circuito de campo, e o rotor, parte rotativa, onde ocorre a indução da força contra eletromotriz, também conhecido como circuito de armadura. Além dessas estruturas fundamentais, o motor CC com escovas possui um sistema de comutação mecânica composto pelo comutador e pelas escovas, que asseguram a condução da corrente e a reversão do sentido de fluxo elétrico nas bobinas da armadura, mantendo a continuidade do torque (Siemens, 2006).

#### **4.3.1 Estator Motor**

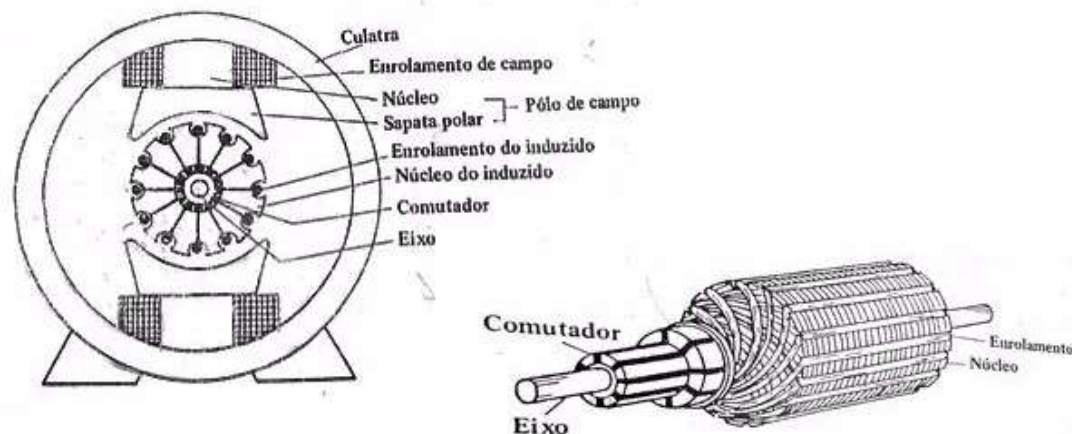
A primeira parte do estator é a carcaça, estrutura que serve de suporte e de proteção do conjunto estator + rotor, frequentemente fabricado com ferro fundido ou laminado, no qual também serve de retorno do fluxo magnético induzido pelas bobinas de campo. A próxima parte do estator é chamado de pólo ou núcleo, este é constituído de lâminas ferromagnéticas parafusadas ou fundidas na carcaça do motor, e servem como meio de propagação de baixa relutância para o campo magnético gerado pelas bobinas de campo (Chapman, 2013; Fitzgerald; UMANS, 2014; Del Toro, 1999).

Junto aos pólos encontra-se os enrolamentos de campo, nestes percorrem uma corrente denominada corrente de campo no qual cumpre o papel de gerar os pólos magnéticos e fluxo de campo que interage com o campo gerado no rotor a fim de produzir torque no eixo, frequentemente o valor da intensidade do campo magnético do estator é fixo. Estes enrolamentos são encontrados em torno dos pólos ferromagnéticos mencionados, eles existem para serem meio de propagação do fluxo eletromagnético de baixa relutância (Chapman, 2013; Fitzgerald; UMANS, 2014; Del Toro, 1999).



também encontra-se um conjunto de bobinas, enrolamentos de campo, que envolvem o núcleo ferromagnético do rotor, a fim de gerar os pólos eletromagnéticos e servir de meio para o fluxo magnético. É a partir da interação entre os campos gerados no circuito de campo no estator e no circuito de armadura no rotor que será gerado torque no eixo livre do motor e por conseguinte movimento rotativo do eixo.

**Figura 2.** Corte Transversal motor CC, com foco no rotor.



Fonte: [Motor de corrente contínua, características e aplicações!](#).

Na parte central de todo o conjunto, encontra-se o eixo para acoplamento da carga, e do conjunto dos núcleos e enrolamentos de armaduras. Por fim é instalado o comutador, um anel constituído por segmentos de cobre eletricamente isolados entre si e do eixo, mas eletricamente conectados às bobinas do enrolamento de armadura, que devido à rotação do eixo, providencia o necessário chaveamento entre as escovas fixadas no estator com as bobinas de armadura que rotacionam junto ao eixo. Quando uma escova toca uma lâmina específica, ela fornece ou retira a corrente de uma bobina (Chapman, 2013; UMANS, 2014).

#### 4.4 Funcionamento do motor CC

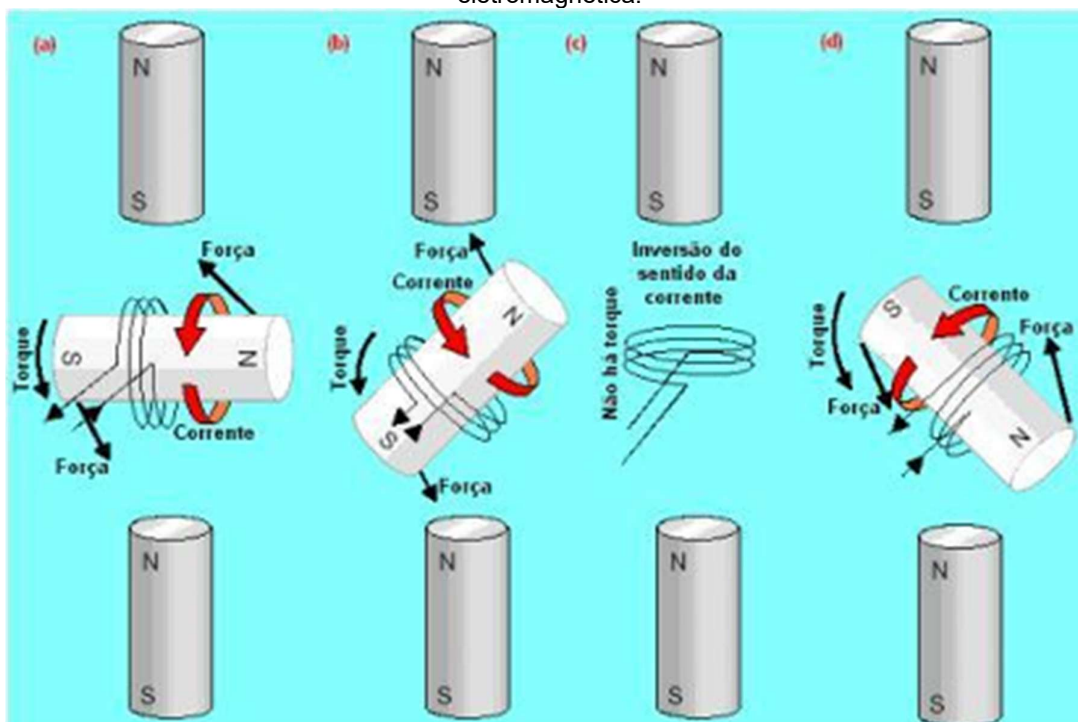
A interação entre os campos gerados nos circuitos de armadura e campo do motor produz uma força que resulta no movimento rotativo do rotor. A compreensão completa desse funcionamento requer o estudo da orientação dos campos gerados nas bobinas que definem o sentido do torque; o processo de comutação, que assegura a continuidade da rotação sob corrente unidirecional; e a força contra eletromotriz (f.c.e.m.), que influencia diretamente o equilíbrio dinâmico entre tensão aplicada e

velocidade de rotação. Cada um desses aspectos será explorado nos subtópicos a seguir.

#### 4.4.1 Geração de torque e sentido de giro

Para melhor compreensão do princípio de funcionamento do motor de corrente contínua, será feita algumas abstrações a fim de melhor ilustrar o funcionamento. O motor CC como visto no tópico anterior, possui 2 conjuntos de enrolamentos, estes ao serem alimentados por uma corrente elétrica geram pólos eletromagnéticos que se propagam no núcleo ferromagnético no circuito de armadura e de campo, o grupo de bobinas do estator (circuito de campo) é posto junto ao núcleo do estator e permanece estático, o campo eletromagnético destas bobinas são representados pelo cilindros mais escuros que permanecem estáticos, já o grupo de bobinas do rotor (circuito de armadura) é instalado ao eixo e seus pólos eletromagnéticos estão representados pelos cilindros que ilustram a rotação ao decorrer da imagem (Siemens, 2006).

**Figura 3.** Imagem Ilustrativa funcionamento do motor, geração de torque através da atração eletromagnética.



Fonte: [Motor de corrente contínua, características e aplicações!](#).

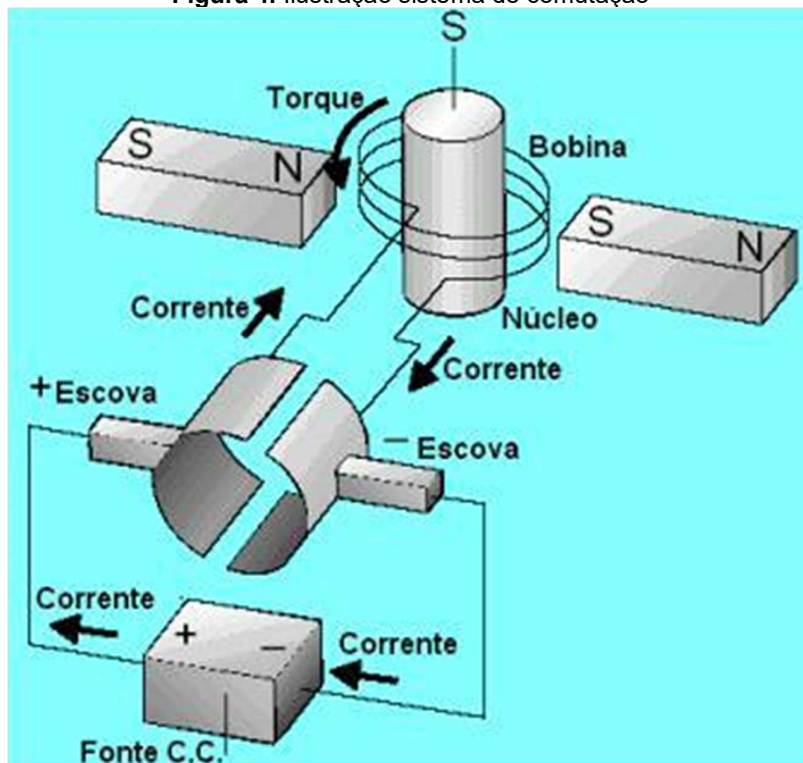
Devido a força de atração entre os pólos magnéticos nos núcleos do estator e rotor surge uma força de atração que inicia o movimento giratório do eixo, o momento angular cresce em um sentido e à medida que os pólos se aproximam, progressivamente o torque no eixo tende a diminuir, até o momento em que a bobina

gira 90 e não há mais torque, neste ponto o momento de inércia se mantém mas torna-se necessário inverter os pólos do núcleo do rotor a fim de gerar, agora, uma força de repulsão, que manterá o torque e a aceleração angular em um mesmo sentido no eixo. Este processo de coordenação dos momentos de atração e repulsão para geração de torque “favoráveis” ao sentido de rotação é o que faz o motor funcionar (Siemens, 2006).

#### 4.4.2 Funcionamento da comutação

O sistema de comutação dos motores CC é o dispositivo mecânico responsável pela inversão dos polos no núcleo do rotor. A partir da lei de Lenz a orientação do campo magnético é dada pelo sentido da corrente que percorre as bobinas de armadura, logo, invertendo-se o sentido da corrente, inverte-se também a orientação do fluxo magnético no núcleo do rotor.

**Figura 4.** Ilustração sistema de comutação



Fonte: [Motor de corrente contínua, características e aplicações!](#)

Esta inversão ocorre através da mudança do arranjo das conexões de energização dos enrolamentos de armadura feito pelo comutador. Por meio das trocas do contato entre os anéis de cobre conectados ao eixo do rotor com as escovas no estator, inverte-se o sentido da corrente nos enrolamentos, por conseguinte os pólos do campo magnético também, (Siemens, 2006).

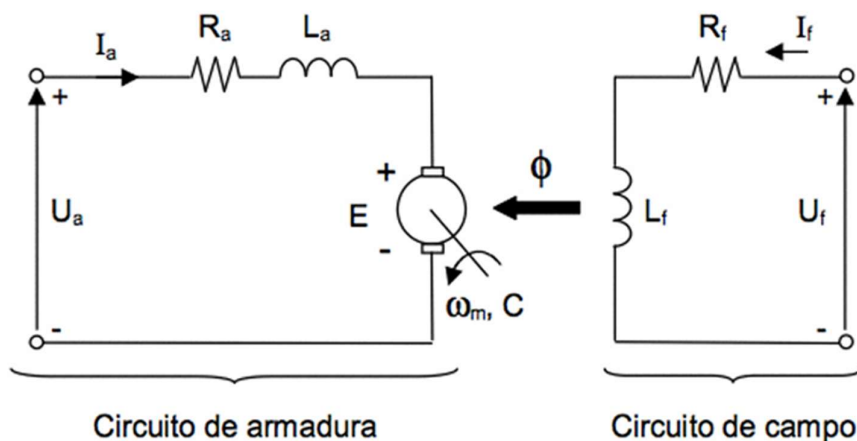
#### 4.5 Método de excitação da máquina CC e resposta à velocidade x torque

A alimentação das bobinas de campo e armadura podem ser feitas por 3 principais formas: excitação independente, shunt e série. O desempenho e o comportamento dinâmico estão diretamente relacionados à forma como os arranjos dos terminais elétricos das bobinas estão conectados, que por sua vez alteram diretamente a resposta em velocidade à variação de carga no eixo da máquina. (UMANS, 2014).

##### 4.5.1 Excitação independente

A figura abaixo representa o circuito equivalente do motor de corrente contínua no modo de excitação independente, no qual os circuitos de armadura e de campo são alimentados de forma separada por fontes distintas. Nessa configuração, a tensão aplicada ao campo pode ser ajustada de maneira independente da armadura, o que oferece maior flexibilidade no controle da velocidade e do torque. Esse tipo de excitação é frequentemente utilizado em aplicações que exigem regulação ou controle externo mais preciso, como em bancadas de ensaio e laboratórios permitindo variação ampla e controlada das condições de operação da máquina (Chapman, 2013).

**Figura 5.** Ilustração circuito equivalente motora excitação independente.



Fonte: [Motor de corrente contínua, características e aplicações!](#).

A partir do estudo deste circuito equivalente do Motor CC de excitação independente é feito as análises e equacionamentos gerais aplicáveis a todos os outros arranjos a seguir, considerando os valores médios e em regime permanente.

Segundo Chapman:

$$E_a = K \cdot \phi \cdot \omega \quad (1)$$

$$V_a = E_a + R_a \cdot I_a \quad (2)$$

$$T_a = K \cdot \phi \cdot I_a \quad (3)$$

Onde:

$E_a$  = Força Contra Eletromotriz (V)

$K$  = Constante de Construção do Motor

$\phi$  = Fluxo magnético no núcleo do Estator (Wb)

$w$  = Velocidade Angular (rad/s)

$T_{ind}$  = Torque induzido no eixo do motor (Kg\*m<sup>2</sup>/s)

A tensão induzida nos enrolamentos da armadura do motor surge devido à rotação em meio ao campo magnético do estator. Essa tensão tem sentido oposto à tensão de alimentação aplicada à armadura e é proporcional à velocidade do rotor e ao fluxo magnético de campo. Já o torque induzido no eixo é proporcional à corrente de armadura (Chapman, 2013).

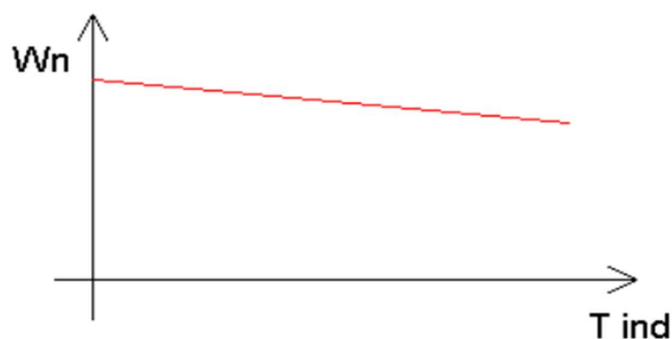
Aplicando as equações (1) e (2) na equação (3), pode-se compreender melhor a dinâmica entre a velocidade e o torque do motor:

$$I_a = \frac{(V_t - E_a)}{R_a} \quad (4)$$

$$T_{ind} = \frac{K \cdot \phi \cdot (V_t - E_a)}{R_a} \quad (5)$$

A medida em que se adiciona carga ao eixo do motor, a velocidade tende a cair, diminuindo a tensão induzida nas bobinas que por sua vez eleva a corrente de armadura gerando mais torque, este torque acelera o eixo do motor, elevando a tensão induzida na armadura, reduzindo o torque e reduzindo a aceleração do eixo. Este processo ocorre até que o motor alcance o equilíbrio eletromecânico com a carga, quando a aceleração tende a zero estabilizando a velocidade do motor (Chapman, 2013).

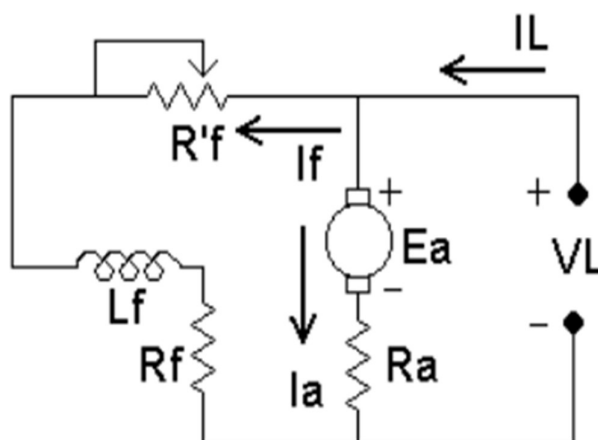
**Figura 6.** Gráfico Velocidade por torque induzido motor excitação independente



#### 4.5.2 Excitação Shunt, paralelo ou derivação

Na ligação do tipo derivação, também conhecida como ligação shunt, os terminais de alimentação do circuito de campo são conectados diretamente aos terminais do circuito de armadura, ficando ambos conectados em paralelo à mesma fonte de alimentação. Nesse arranjo, o campo de excitação permanece praticamente constante, uma vez que a tensão de alimentação é mantida estável e a resistência do enrolamento de campo é elevada. Como resultado, a velocidade do motor tende a se manter aproximadamente constante mesmo sob variações moderadas de carga (Del Toro, 1999).

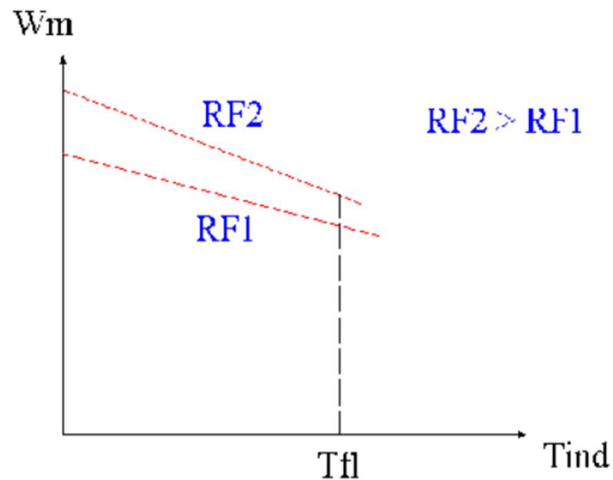
**Figura 7.** Ilustração circuito equivalente motora excitação shunt.



Fonte: Del Toro, 1999.

Devido à impossibilidade de controle individual da tensão de alimentação dos enrolamentos, frequentemente é instalado junto ao enrolamento de campo uma resistência variável, a fim de possibilitar o ajuste do fluxo de campo, através da variação da corrente, sem que tenham que alterar a tensão de alimentação da armadura. Uma das consequências da variação do conjunto de resistências de campo é a alteração na curva de velocidade por torque induzido.

**Figura 8.** Gráfico velocidade por torque induzido motor excitação shunt.

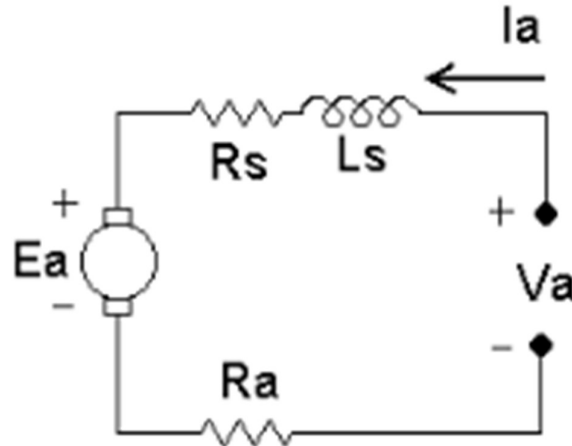


Fonte: [shuntmcc](#)

#### 4.5.3 Excitação série

Já no motor de corrente contínua em série, o enrolamento de campo é conectado em série com a armadura, de modo que a corrente que circula na armadura também percorre o campo.

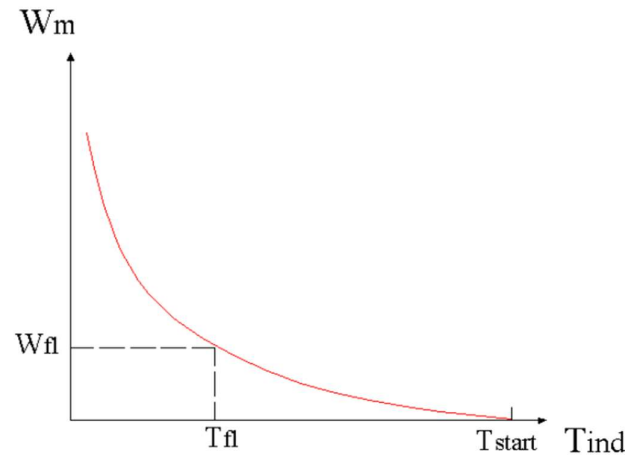
**Figura 9.** Ilustração circuito equivalente motora excitação série.



Fonte: Del Toro, 1999

Isso implica que o fluxo magnético é diretamente proporcional à carga aplicada: à medida que a carga no eixo aumenta, a corrente de armadura aumenta, intensificando o fluxo de campo e, conseqüentemente, elevando o torque, entretanto para manter o equilíbrio entre tensão aplicada e a força contraeletromotriz há uma redução acentuada da velocidade de rotação do motor, o que lhe confere uma característica de velocidade variável com taxa de inclinação acentuada (Del Toro, 1999).

**Figura 10.** Gráfico velocidade por torque induzido motor excitação shunt.



Fonte: [shuntmcc](#)

#### 4.6 Métodos de controle de velocidade para máquinas CC

Uma das características já citadas, e mais relevantes para a escolha da utilização dos motores de corrente contínua sobre outros tipos de motores, é a relativa facilidade com a qual o controle de velocidade pode ser obtido ao longo de toda a faixa de operação. As abordagens de controle do Motor CC podem ser deduzidas das equações gerais expressas nas equações anteriores. A partir da fórmula para tensão de armadura induzida e da lei de Kirchhoff sobre os circuitos de armadura e campo.

Substituindo a equação (1) da Tensão Induzida, na equação (2) da malha do circuito de armadura e isolando a velocidade angular temos que:

$$\omega = \frac{E_a}{K \cdot \phi} = \frac{(V_t - I_a \cdot R_a)}{K \cdot \phi} \quad (6)$$

Esta equação minúcia que a velocidade do eixo do motor pode ser controlada por três fatores distintos: a tensão de alimentação de armadura ( $V_t$ ), a resistência de armadura ( $R_a$ ) e o fluxo de campo do motor ( $\phi$ ). Cada método de controle explicado a seguir aborda alguma dessas variáveis. (Del Toro, 1999).

##### 4.6.1 Variação da resistência de campo

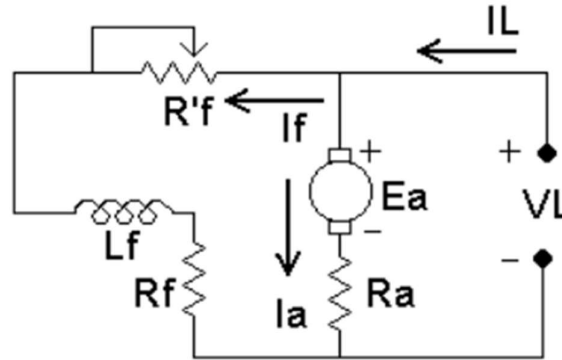
O controle da velocidade através da variação da resistência de campo tem como objetivo controlar o fluxo magnético nos pólos do estator através da intensidade da corrente elétrica nas bobinas de campo. Este processo ocorre através do incremento de uma resistência variável em série com os enrolamentos de campo. Um aumento na resistência de campo reduz o fluxo, produzindo uma queda instantânea

na tensão interna gerada, o que leva a um grande aumento de corrente de armadura na máquina, aumentando o torque induzido. Nesta relação destaca-se que o aumento da corrente de armadura predomina sobre a redução do fluxo magnético para geração de torque (Chapman, 2013).

$$\phi = K \cdot I_f \quad (7)$$

$$I_f = \frac{V_t}{R_f + R'_f} \quad (8)$$

**Figura 11.** Circuito equivalente motora excitação shunt com resistência de campo variável.



Fonte: Del Toro, 1999.

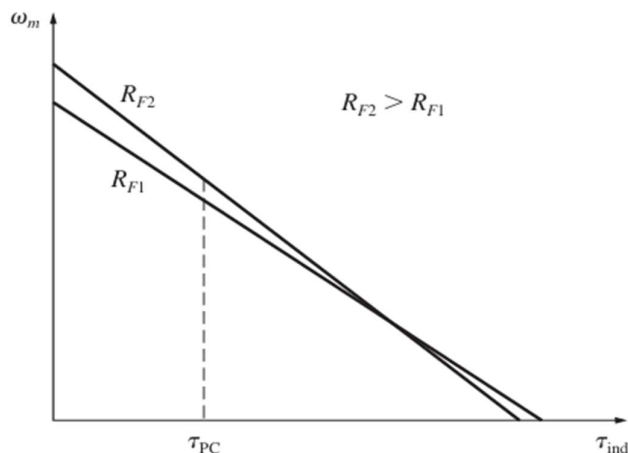
Substituindo a equação (3) na (6) encontramos uma relação mais clara entre a velocidade e o fluxo de campo.

$$\omega = \frac{V_t}{K \cdot \phi} - \frac{(R_a \cdot T_{ind})}{(K \cdot \phi)^2} \quad (9)$$

Com isto, observa-se que a velocidade do motor é proporcional ao inverso do fluxo do motor, e a taxa de variação da curva é proporcional ao inverso do quadrado do fluxo sendo que a variação da resistência de campo altera diretamente a taxa de inclinação da curva velocidade versus Torque induzido no motor. (Chapman, 2013).

Neste tipo de controle, o aumento da resistência diminui a corrente de campo ( $I_f$ ), diminuindo conseqüentemente o fluxo no núcleo de campo ( $\phi$ ), reduzindo a força contra eletromotriz induzida ( $E_a$ ) nos terminais de armadura e elevando a corrente que circula na armadura ( $I_a$ ).

**Figura 12.** Efeito do controle de velocidade por resistência de campo sobre característica de conjugado versus velocidade de um motor CC em derivação.



Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

Neste tipo de controle, o aumento da resistência diminui a corrente de campo ( $I_f$ ), diminuindo consequentemente o fluxo no núcleo de campo ( $\phi$ ), reduzindo a força contra eletromotriz induzida ( $E_a$ ) nos terminais de armadura e elevando a corrente que circula na armadura ( $I_a$ ).

Neste momento se observou a equação de torque ( $T_{ind} = K \cdot \phi \cdot I_a$ ), temos que o fluxo diminui, mas o aumento da  $I_a$  se sobressai à redução de fluxo, elevando o torque e acelerando o eixo do motor, esta aceleração torna a aumentar a força contra eletromotriz induzida reduzindo progressivamente o torque até o momento em que o torque no eixo se iguala ao torque da carga acoplada, mas agora à uma velocidade angular maior. Com a diminuição da resistência de campo inverte-se os processos, e à uma velocidade menor iguala-se o torque induzido no eixo à carga. (Chapman, 2013).

#### 4.6.2 Métodos de variação da tensão de armadura

O processo de controle de velocidade do motor através da variação da tensão de armadura visa criar um mecanismo no qual através do controle da tensão controla-se também a corrente  $I_a$ . Este método é frequentemente aplicado à motores de excitação independente e de alimentação de campo constante.

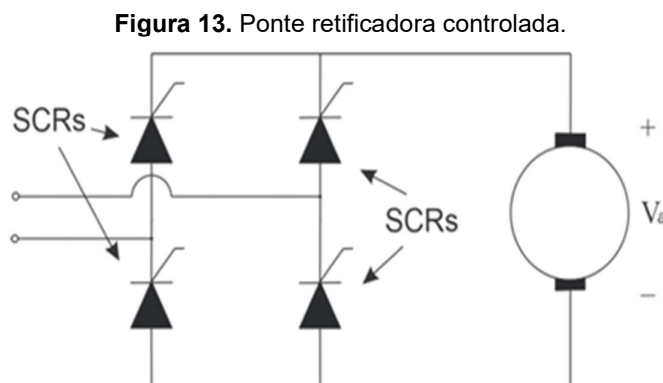
Vale observar também que o método de controle que utilizam chaveamento de fontes de tensão, oferecem uma vantagem significativa em relação aos métodos tradicionais com resistências variáveis devido a redução das perdas por efeito Joule pois durante o tempo de condução do dispositivo a dissipação de potência ocorre majoritariamente nos instantes de chaveamento. Como resultado, a maior parte da

energia fornecida pela fonte é convertida em potência mecânica útil no motor, tornando o sistema mais eficiente, compacto e com menor geração de calor residual (Rashid, 2014).

Sobre as técnicas de Chaveamento há 4 principais maneiras de se criar esta fonte variável de tensão.

#### 4.6.2.1 Ponte retificadora controlada

A primeira técnica é através da ponte retificadora controlada, que funciona através de um dispositivo retificador controlado de silício (SCR) que recebe um sinal de disparo que abre ou fecha o circuito conversor CA-CC, controlando os tempos de disparo do SCR, que por sua vez controla a potência média entregue à armadura (Rashid, 2014).

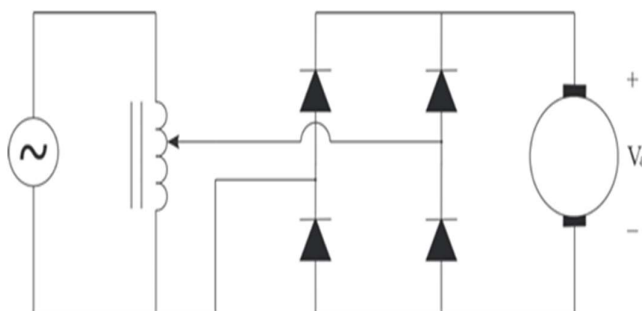


Fonte: Adaptado de Fitzgerald, Kingsley Umans (2006).

#### 4.6.2.2 Retificadora com Transformador variável de Tensão

A segunda técnica é a implementação de um Variac (Variador de Tensão), que consiste em um autotransformador acoplado à uma ponte retificadora, no qual o controle do valor de amplitude da tensão se dá pela variação do enrolamento do transformador, alterando a tensão alternada entregue ao retificador.

**Figura 14.** Circuito retificador monofásico alimentado por variac e conectado aos terminais de armadura de um motor CC.



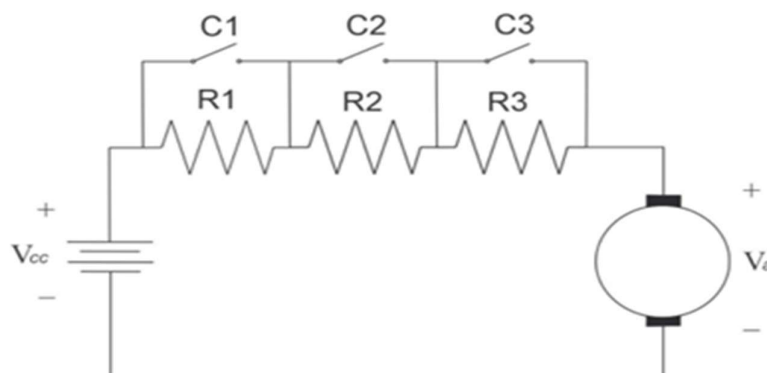
Fonte: Adaptado de Rashid (2014).

#### 4.6.2.3 Variação da resistência de armadura.

Outra técnica clássica de controle de velocidade para motores de corrente contínua é a introdução de uma resistência adicional em série com a armadura, modificando assim a queda de tensão efetiva na malha. Essa estratégia atua diretamente sobre a equação da malha de armadura, conforme estabelecido por:

$$V_t = E_a + I_a \cdot (R_a + R'_a) \quad (11)$$

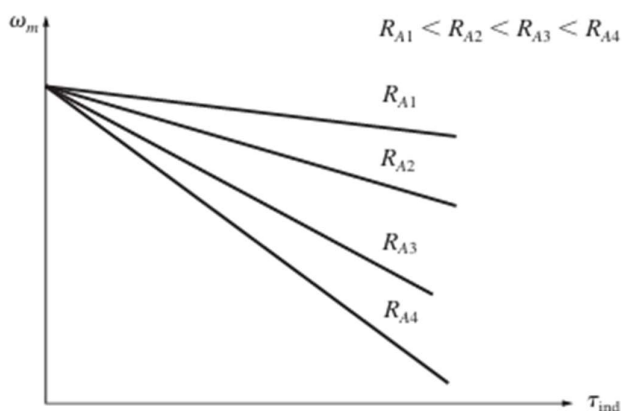
**Figura 15.** Controlador de velocidade pela variação da resistência de armadura.



Fonte: Adaptado de Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006).

Ao se aumentar  $R'_a$  uma parcela da tensão total aplicada é dissipada nessa resistência adicional, resultando em uma redução da tensão efetiva sobre a armadura e, portanto, uma diminuição da velocidade do motor. De forma análoga a redução de  $R'_a$  aumenta a velocidade. Do ponto de vista da característica torque versus velocidade, este tipo de controle aumenta significativamente a inclinação da curva, resultando em uma velocidade sensivelmente menor à medida que o torque requerido se eleva (Chapman, 2013).

**Figura 17.** Gráfico do efeito de velocidade por torque induzido via variação da resistência de armadura.



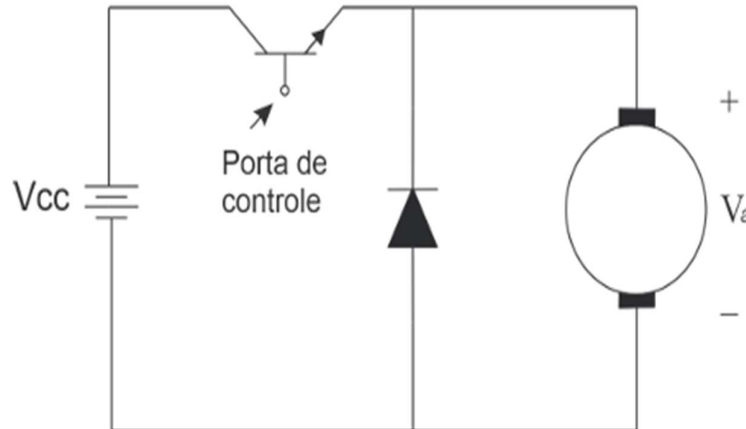
Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

#### 4.6.2.4 Conversores CC-CC abaixadores de tensão

São circuitos que utilizam transistores como MOSFET ou IGBT que podem ser chaveados rapidamente através da tensão de gate, conectando e desconectando a fonte, variando a tensão de saída entre 0 a tensão de entrada, alterando a tensão média entregue.

Ao serem conectados aos motores, estes dispositivos podem operar em dois regimes distintos: condução contínua ou descontínua, no modo descontínua a tensão e corrente são sinais pulsantes, já na condução contínua, devido aos componentes capacitivos e indutivos, a energia armazenada neles mantêm os terminais da fonte energizada durante o intervalo de tempo de abertura da chave.

**Figura 18.** Conversor abaixador de tensão simplificado.



Fonte: Eletrônica de Potência, Pomilio - UNICAMP 2014

Devido à variedade de tipos de conversores CC-CC, este trabalho será limitado apenas à utilização do conversor CC-CC do tipo abaixador de tensão, mercadologicamente conhecido como conversor Buck, operando em regime de descontinuidade.

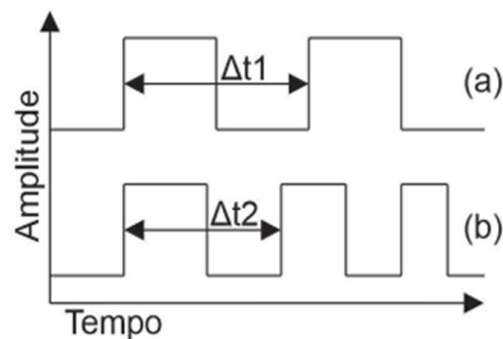
O controle das chaves é feito através da modulação de pulso PWM (Pulse Width Modulation), um sinal feito através da alternância entre os níveis lógicos alto e baixo dentro de um período constante, no qual é possível controlar o tempo de duração do nível alto ( $T_{on}$ ) e o tempo em nível baixo ( $T_{off}$ ) dentro do período de operação. A relação entre esses tempos é denominada razão cíclica, ciclo de trabalho, ou *duty cycle*, como citado anteriormente.

$$V_o = V_{cc} \cdot \frac{T_{on}}{(T_{on} + T_{off})} \quad (10)$$

## 4.7 ENCODER

O encoder óptico é um dispositivo que contém consigo um transdutor eletro-óptico, convertendo o deslocamento angular do eixo em uma sequência de pulsos elétricos digitais. Seu princípio de operação consiste num feixe luminoso — gerado por um emissor (LED) e captado por um receptor (fototransistor) — que interage com a superfície de um disco com vãos. Dessa maneira quando o eixo gira, o sensor gera pulsos espaçados no tempo, e em situações de aceleração ou desaceleração, o período entre os pulsos diminui ou aumenta, permitindo o cálculo da frequência do sinal e permitindo a leitura direta do comportamento dinâmico da máquina.

**Figura 19.** Sinal do encoder. (a) com velocidade contínua, (b) com aceleração.



Fonte: Adaptado de (JOSHI; SHRESTHA; CHAUDHAR, 2014).

Matematicamente, a velocidade é extraída a partir da medição desse período entre as bordas de sinal. Sendo a velocidade em RPM dada pelo inverso do produto entre a resolução e o período medido.

$$V_{rpm} = \frac{60}{n \cdot \Delta t} \quad (10)$$

## 4.8 TEORIA DE CONTROLE

O objetivo fundamental da teoria de controle é garantir que a saída de um sistema siga uma referência desejada, mesmo na presença de distúrbios ou incertezas. Neste trabalho é estudado o controle de velocidade do motor de corrente contínua a partir da teoria de controle aplicada à sistemas dinâmicos linearizados.

A definição de um sistema dinâmico é aquele no qual a saída depende do tempo das entradas aplicadas, podendo ser representado por modelos matemáticos que descrevem seu comportamento. Uma das principais ferramentas matemáticas aplicada a esses sistemas é a função de transferência, que relaciona no domínio da

frequência (em Laplace), o comportamento da saída de um sistema em função de sua entrada (Ogata, 1995).

A planta de controle deste trabalho consiste na associação de um motor de corrente contínua com excitação independente associado à um regulador de tensão conversor CC-CC do tipo Buck regidos por modulação por largura de pulso (PWM), sendo a velocidade a variável saída do sistema, a fim de regular a velocidade no eixo do motor, sendo a tensão a variável de entrada da planta de controle.

#### 4.8.1 Função de transferência

A função de transferência é a descrição matemática do comportamento da planta através da relação entre o comportamento do sinal de entrada com o sinal de saída ao longo do período de tempo, ou no domínio da frequência (Laplace). A construção desta função permite fazer as análises de estabilidade do sistema, e de respostas a transitórios (Ogata, 1995).

##### 4.8.1.1 Função de transferência do motor de corrente contínua

Neste trabalho, a função de transferência a ser construída é aquela no qual relaciona a velocidade do motor à tensão de armadura aplicada, com alimentação de campo constante. A construção da função de transferência parte das equações do circuito equivalente do motor, e das equações de sistemas mecânicos aplicados à motores, o desenvolvimento matemático está demonstrada na secção de desenvolvimento deste trabalho.

Segundo Del Toro:

$$\frac{\omega(s)}{V_t(s)} = H(s) = \frac{K_t}{K_t \cdot K_w + R_a \cdot F} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T_m} \quad (12)$$

$$T_m = \frac{J \cdot R_a}{R \cdot F + K_t \cdot K_m} \quad (13)$$

Onde:

J = Inércia total da carga e do rotor do motor.

F = Fricção viscosa total do motor e da carga.

T<sub>m</sub> = Constante de tempo mecânica.

K<sub>t</sub> = Constante de torque.

K<sub>w</sub> = Constante de tensão de velocidade (equivalente à E<sub>a</sub>) (V/rad/s).

$R_a$  = Resistência de armadura (ohm).

#### 4.8.2 Compensador proporcional, integral e derivado

O controlador, ou compensador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é uma das técnicas de controle mais utilizadas para sistemas de controle automático, além disso, é comum que a saída de uma planta não siga perfeitamente a referência desejada, principalmente diante de distúrbios, incertezas ou erros de linearização na modelagem da planta ou variação dos parâmetros do sistema e para compensar essas limitações da planta e garantir que a saída do sistema acompanhe o sinal de referência, utiliza-se neste trabalho o compensador PID, onde combina três ações de controle, proporcional, integral e derivativa (Ogata, 2011).

Segundo Ogata, o controlador PID pode eliminar o erro em regime permanente, melhorar o tempo de resposta e aumentar a estabilidade de sistemas de controle, ajustando os parâmetros do sistema para obter o comportamento desejado.

A ação de controle PID combina três componentes fundamentais:

- Ação proporcional (P): gera uma saída proporcional ao erro instantâneo entre o valor de referência e a variável controlada.
- Ação integral (I): considera o acúmulo do erro ao longo do tempo, contribuindo para eliminar o erro em regime permanente.
- Ação derivativa (D): responde à taxa de variação do erro, antecipando mudanças e aumentando a estabilidade do sistema.

A equação geral do controlador PID no domínio do tempo contínuo é dada por:

$$U(t) = k_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) \cdot dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (16)$$

Onde:

$K_p$  = Ganho proporcional

$K_i$  = Ganho Integral

$K_d$  = Ganho derivativo

$e(t)$  = Erro entre a referência e a saída do sistema

$U(t)$  = Sinal de controle aplicado à planta

Já no domínio da frequência (Laplace), temos:

$$U(s) = \left[ K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \right] \cdot E(s) \quad (17)$$

Em sistemas embarcados ou de controle por microcontroladores, utiliza-se a versão discreta do controlador PID. A forma apresentada a seguir, é sugerida por somatórios cumulativos e facilita a execução do algoritmo em ambientes com recursos computacionais limitados, além de minimizar o risco de saturação.

$$u[k] = K_p \cdot e[k] + K_i \cdot T \cdot \sum e[k] + K_d \cdot [e[k] - e[k-1]] \quad (18)$$

$$u[k] = u[k-1] + a_0 \cdot e[k] + a_1 \cdot e[k-1] + a_2 \cdot e[k-2] \quad (19)$$

Onde:

$a_0 = K_p + K_i \cdot T + K_d$ ; Influência do erro atual  $e[k]$ .

$a_1 = -K_p - 2 \cdot \frac{K_d}{T}$ ; Influência do erro anterior  $e[k-1]$ .

$a_2 = \frac{K_d}{T}$ ; Influência do erro dois passos anteriores  $e[k-2]$ .

$u[k-1]$  = Valor anterior do sinal de controle, memória da ação passada.

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Coleta de Dados de Placa do Motor

Inicialmente, serão coletados os dados de placa do motor a ser utilizado nos ensaios. Serão anotadas as seguintes informações:

- Potência nominal.
- Tensão de armadura.
- Velocidade Nominal.

Entre outros dados relevantes para caracterização da máquina. Esses parâmetros servirão como base para análise do comportamento real do motor e para definição dos limites operacionais do sistema de controle.

### 5.2 Instalação do Encoder e Circuitos de Medição

Será realizada a montagem do sistema de medição da velocidade utilizando um módulo de encoder óptico, e junto ao eixo do motor será acoplado um disco impresso em 3D para gerar as leituras no encoder. O sinal gerado será lido pelo ARDUINO e enviado para o computador via comunicação serial.

### 5.3 Ensaios para Extração dos Parâmetros do Motor

Na sequência, serão realizados ensaios experimentais para determinação dos principais parâmetros elétricos e mecânicos do motor, essenciais para a modelagem da planta de controle:

- **Resistência da Armadura ( $R_a$ ):** será obtida com o motor parado, aplicando uma tensão CC conhecida e medindo a corrente resultante;
- **Indutância da Armadura ( $L_a$ ):** determinada via resposta transitória a um degrau de tensão aplicada;
- **Constante de Força Contra-Eletromotriz ( $K_e$ ):** obtida com o motor girando em vazio e medindo a tensão de armadura;
- **Constante de Torque ( $K_t$ ):** será considerada igual a  $K_e$ , conforme motores lineares;
- **Coeficiente de Atrito Viscoso ( $b$ ) e Momento de Inércia ( $J$ ):** extraídos a partir da curva de aceleração e desaceleração da máquina;

#### **5.4 Análise das Curvas de Operação**

Com base nos dados coletados, serão feitos os ensaios para obter a curva de tensão versus velocidade com o motor operando em vazio, bem como os parâmetros de operação do motor quanto a corrente, tensão e rotação. Essas informações servirão como base para a modelagem matemática do motor e o projeto do compensador PID.

#### **5.5 Ensaios com Fontes de Tensão e Definição de Limites Operacionais**

Será testado diferentes fontes de alimentação CC disponíveis no laboratório, com o objetivo de verificar a faixa de tensões disponíveis e seu comportamento. Com isso definirá o valor máximo e mínimo de tensão ou ciclo de trabalho que será utilizado na alimentação do motor, respeitando os limites de estabelecidos da máquina e pelas características do conversor CC-CC rebaixador.

#### **5.6 Construção da interface de geração de gráfico.**

A interface de plotagem será implementada para receber e exibir, os dados de velocidade e tensão de armadura provenientes do motor. Para isso, o microcontrolador ARDUINO enviará as medições ao computador via comunicação serial USB, no formato de pacotes estruturados contendo timestamp, valor de velocidade e valor de tensão. No computador, será utilizada a linguagem Python em conjunto com as bibliotecas PySerial (para leitura da porta serial) e Matplotlib (para plotagem gráfica dinâmica).

## 6 MATERIAIS

Os materiais utilizados são apresentados nas subseções a seguir.

### 6.1 Programas utilizados

Os programas utilizados neste trabalho são todos gratuitos e estão listados com o nome e finalidade de uso.

- **Visual Studio Code (Microsoft) com a extensão ESP-IDF:** utilizado para edição, compilação e carregamento do firmware do microcontrolador ARDUINO, devido à sua compatibilidade com sistemas embarcados e ampla documentação da Espressif.
- **Arduino IDE:** ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) que oferece ferramentas para facilitar a criação e implementação de projetos eletrônicos.
- **EasyEDA(online):** Software utilizado para montar diagramas esquemáticos do circuito e desenvolver o design da PCB. Permite o uso de verificação de regras de projeto, ou do inglês design rule checking (DRC), facilitando assim o desenvolvimento da placa;
- **GNU Octave:** alternativa gratuita ao MATLAB, foi usada para validações numéricas simples e resolução de equações relacionadas ao modelo matemático do sistema.
- **LTspice:** simulador de circuitos analógicos, utilizado na análise do conversor Buck e verificação do comportamento dinâmico do circuito de potência em diferentes condições de chaveamento.

### 6.2 Componentes eletrônicos

Os componentes utilizados para a montagem dos circuitos utilizados no projeto Estão listados abaixo.

- **Amplificador Operacional** – Utilizado para condicionamento de sinais, podendo atuar como comparador, somador ou filtro ativo.
- **Mosfet: 2SK2837** – Transistor de efeito de campo aplicado em chaveamento de potência e controle de cargas.
- **Diodo Ultrarrápido: UF4007 & STTH1004fp** – Empregado na retificação em alta frequência e na proteção contra transientes.
- **Reguladores de Tensão: Hlk-12m05** – Responsáveis por fornecer tensões fixas estáveis aos circuitos lógicos e analógicos.

- **Reguladores de Tensão: Hlk-12m12** – Responsáveis por fornecer tensões fixas estáveis aos circuitos lógicos e analógicos.
- **Termistor NTC** – Utilizado para comutação de sinais ou polarização de etapas específicas do circuito.
- **Optoacoplador P817** - Utilizado para separação elétrica dos sinais PWM e de Leitura do sensor Optico.
- **Ponte Retificadora: KBJ3510**: Retificação do sinal AC para geração do sinal de tensão CC.
- **Capacitores e Resistores Diversos** – Elementos passivos com múltiplas funções, como filtragem, temporização, divisores de tensão e polarização.
- **Dissipador de Calor de Alumínio** – Componente de resfriamento passivo utilizado para manter a temperatura operacional segura dos dispositivos semicondutores.

### 6.3 Componentes de controle e interface

- **Microcontrolador**– Unidade de processamento central do sistema, responsável por executar o algoritmo de controle e comunicação com os sensores e atuadores.
- **Placa de Desenvolvimento ARDUINO** – Facilita a prototipagem, alimentação e programação do microcontrolador, integrando conversores, pinos de expansão e interface USB.
- **Disco Encode**: Projetado e confeccionado por softwares de modelagem 3D.
- **Sensor de Velocidade com Chave Óptica (com LM393)** – Dispositivo optoeletrônico utilizado para a leitura da rotação do eixo via encoder, essencial para o controle em malha fechada.

### 6.4 Materiais de bancada e conexões

- **Computador** – Utilizado para a programação do microcontrolador, análise dos dados e simulação dos circuitos eletrônicos.
- **Protoboard** – Plataforma para montagem de circuitos eletrônicos de forma temporária e sem solda, utilizada nas fases de teste e prototipagem.
- **Fios para Protoboard (macho-macho, macho-fêmea e fêmea-fêmea)** – Utilizados para interconexão de componentes na protoboard.

- **Cabos Tipo Banana** – Empregados para conexões seguras entre instrumentos de bancada, fontes de alimentação e o circuito de teste.

### 6.5 Equipamentos de laboratório

- **Bancada Didática de Eletrônica: Feedback System 91-200** – Estrutura física para montagem, alimentação e análise dos circuitos.
- **Variac (Autotransformador Variável)** – Ajuste gradual de tensão alternada para testes com diferentes condições de entrada.
- **Fonte de Alimentação CC até 110 V** – Fornecimento de energia estável para o motor e circuitos de potência.
- **Motor de Corrente Contínua de 200 W** – Atuador a ser controlado no experimento, com características adequadas para testes de controle de velocidade.
- **Multímetro Digital** – Medições de tensão, corrente e resistência.
- **Amperímetro e Voltímetro Analógico/Digital** – Monitoramento contínuo de parâmetros elétricos.
- **Osciloscópio** – Análise de formas de onda e sinais em tempo real.
- **Gerador de Sinais** – Injeção de sinais de teste (senoide, quadrado etc.) para análise do comportamento do circuito.
- **Tacômetro Digital** – Medição direta da rotação do motor para validação do sistema de controle.

Para a escolha destes componentes foi levantada uma relação de suas disponibilidades no mercado brasileiro e dos valores de custo de cada componente.

## 7 DESENVOLVIMENTO

Nesta etapa do trabalho compreende o detalhamento dos ensaios de bancada afim de encontrar as grandezas e características físicas motor e às condições reais de operação, o desenvolvimento dos modelos teóricos da função de transferência de motores CC e sua transposição prática com um motor real, a especificação dos componentes a serem utilizados para elaboração da PCB de controle e chaveamento da alimentação do circuito de armadura, a implementação dos algoritmos de controle no microcontrolador ESP3 e registro das curvas entre a resposta simulada e o comportamento dinâmico observado em laboratório.

### 7.1 O motor de corrente contínua composto

Devido à falta de informações disponíveis sobre o motor a ser estudado, entrou-se em contato com o fabricante para obtenção das informações de operação da máquina. A mesma se trata de um Motor de Corrente Contínua Composto (*DC Compound Wound Machine*), modelo 63-120 da série didática Powerframes. Projetado para fins acadêmicos, o motor opera em regime contínuo com uma velocidade nominal de 2000 rpm, suportando rotações máximas de até 6000 rpm. Sua construção dispõe de um eixo duplo de 12 mm e acesso independente aos terminais dos enrolamentos de armadura, campo série e campo *shunt*, característica que permite a configuração da máquina em diferentes topologias de excitação (independente, série ou composta). Para este trabalho, consideram-se os parâmetros nominais de 250 W de potência e tensão de alimentação de 220 V, conforme especificações de placa do fabricante.

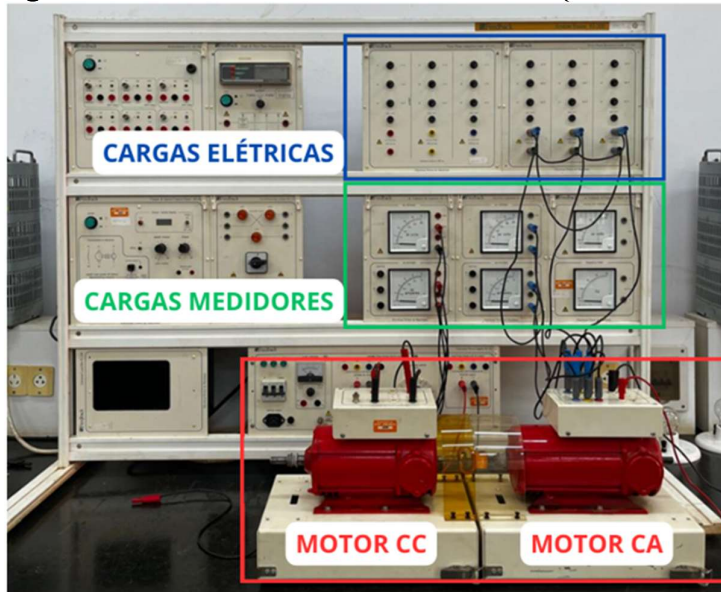
**Quadro 01:** Informações Motor CC.

| INFORMAÇÕES MOTOR CC |          |
|----------------------|----------|
| POT. NOMINAL         | 200 W    |
| TENSÃO NOMINAL       | 220 V    |
| VEL. NOMINAL         | 2000 RPM |

Fonte: Própria

Os ensaios foram conduzidos em uma bancada didática equipada com infraestrutura específica para o estudo de máquinas elétricas, dispondo de cargas resistivas e indutivas, além de medidores analógicos de tensão e corrente que auxiliam no monitoramento visual durante a operação.

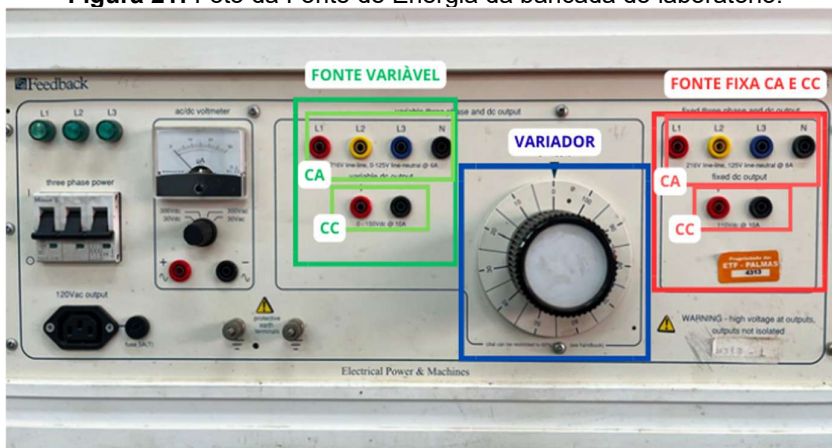
**Figura 20.** Foto da Bancada do laboratório de máquinas elétricas.



Fonte: Própria.

A bancada possui fontes de tensão CA e CC, tanto fixas quanto variáveis; entretanto, observou-se que a fonte CC variável opera com retificação de onda completa sem dispositivos de filtragem capacitiva, resultando em um sinal com elevado fator de ondulação (ripple). Além disso testes preliminares indicaram que o fornecimento de corrente desta fonte apresentava um comportamento não linear, o que interferia diretamente na estabilidade do chaveamento PWM realizado pelo protótipo.

**Figura 21:** Foto da Fonte de Energia da bancada do laboratório.

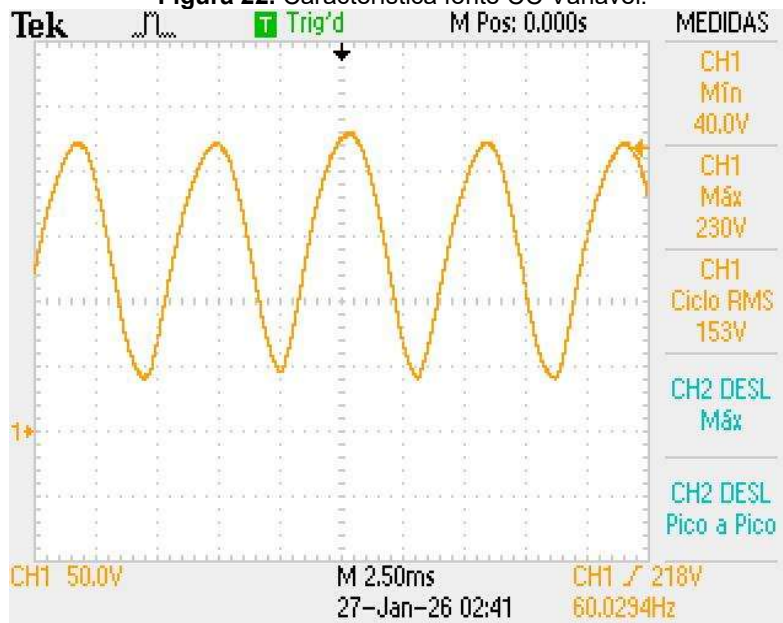


Fonte: Própria.

Diante dessa limitação técnica, a fonte CC variável da bancada foi destinada exclusivamente à alimentação do circuito de campo do motor, onde apesar do ripple a corrente permanece estável e a ausência de filtragem não comprometeu os testes. Já a alimentação do circuito de armadura será alimentada pelo protótipo deste

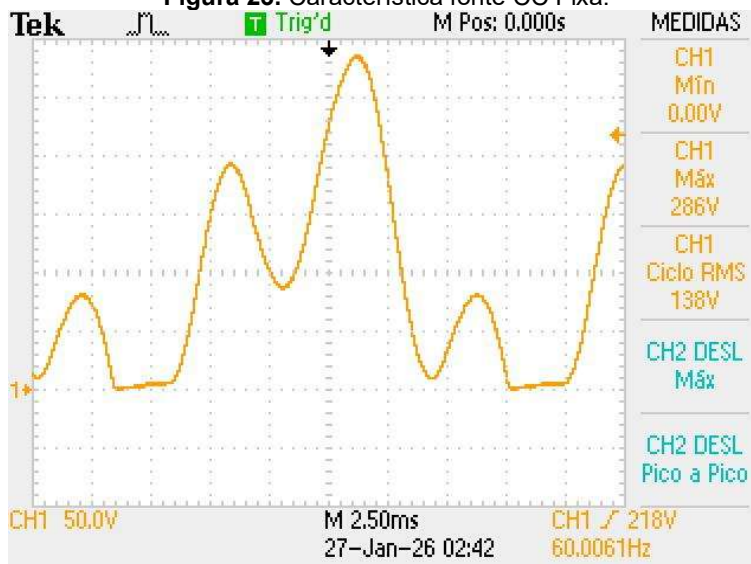
trabalho, sendo este conectado a um variac seguido de uma ponte retificadora com filtragem própria, permitindo que o sistema de controle operasse dentro das faixas de linearidade esperadas para a planta.

**Figura 22.** Característica fonte CC Variável.



Fonte: Própria.

**Figura 23.** Característica fonte CC Fixa.



Fonte: Própria.

## 7.2 Ensaios do motor CC

Com a infraestrutura laboratorial devidamente estudada, procedeu-se à execução dos ensaios experimentais no motor, visando levantar as variáveis físicas e elétricas para o modelo matemático.

### 7.2.1 Constante elétrica e torque.

Para a determinação experimental da constante de força contra eletromotriz ( $K_e$ ), adotou-se um método de aferição direta em regime permanente, utilizando-se um multímetro digital para o monitoramento da tensão de armadura e um tacômetro para a leitura da velocidade angular no eixo.

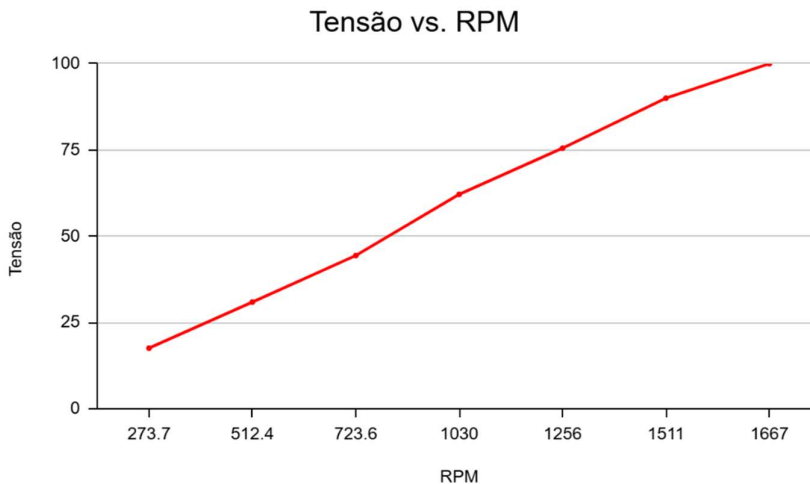
**Quadro 02:** Constante Elétrica.

| CONSTANTE ELETRICA ( $K_e$ ) |             |        |             |             |
|------------------------------|-------------|--------|-------------|-------------|
| RPM                          | W           | Tensão | $K_e W$     | $K_e$ Médio |
| 273.7                        | 28.66179698 | 17.55  | 0.612313318 | 0.575924567 |
| 512.4                        | 53.65840252 | 30.91  | 0.576051439 |             |
| 723.6                        | 75.7752148  | 44.37  | 0.585547664 |             |
| 1030                         | 107.8613478 | 62.12  | 0.575924567 |             |
| 1256                         | 131.5280124 | 75.5   | 0.574022207 |             |
| 1511                         | 158.23155   | 90     | 0.568786693 |             |
| 1667                         | 174.5678318 | 100    | 0.572843226 |             |

Fonte: Própria

A partir do coeficiente angular da curva obtida, determinou-se o valor da constante elétrica  $K_e$ , e em o mesmo valor foi considerado para  $K_t$ .

**Figura 24.** Tensão de Armadura por Velocidade em RPM.



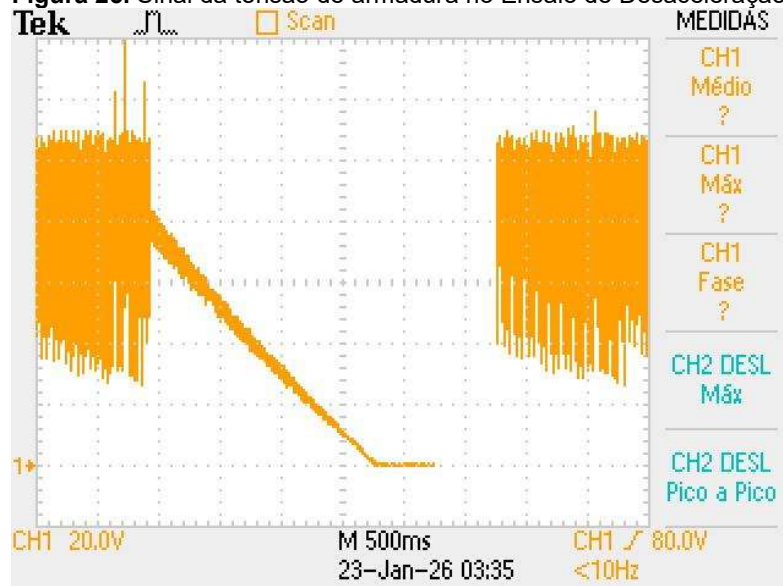
Fonte: Própria.

### 7.2.2 Constante de atrito viscoso e momento de inércia.

Para determinar os valores da constante de atrito viscoso e momento de inércia do motor, foi realizado o ensaio de *coasting-down* (desaceleração livre) no qual durante a desaceleração do motor foi registrado via osciloscópio as tensões nos

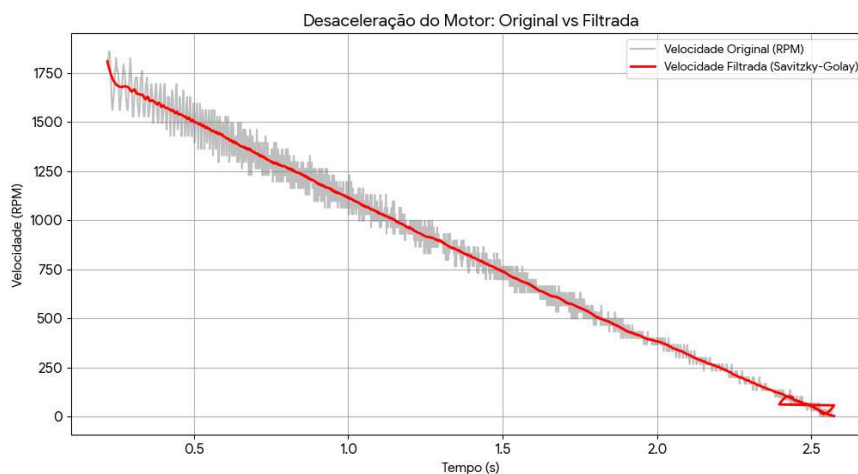
terminais de armadura do motor, em seguida através da relação fundamental foi estimado os valores de velocidade em RPM e W.

**Figura 25.** Sinal da tensão de armadura no Ensaio de Desaceleração.



Vale observar também que os dados de tensão obtidos via osciloscópio durante o ensaio apresentavam ruídos de alta frequência inerentes ao processo de aquisição do sinal devido à própria natureza da máquina CC e dos sinais elétricos da bancada de trabalho do laboratório de máquinas elétricas. Para mitigar essas variações sem distorcer a resposta dinâmica do sistema, aplicou-se um tratamento estatístico aos dados brutos através de filtros digitais para suavizar e preservar a curva de desaceleração permitindo calcular o coeficiente de atrito e momento de inércia.

**Figura 26.** Gráfico da Velocidade estimada pelo Valor da Tensão de armadura feita durante o ensaio do motor.



A partir da análise da equação diferencial do equilíbrio de torques (OGATA, 2010), temos que:

$$Te(t) = J \cdot \frac{\partial \omega(t)}{\partial t} + b \cdot \omega(t) + Tl(t) \quad (20)$$

- $Te(t) = K_t \cdot i(t)$  : É o torque eletromagnético produzido pela interação entre a corrente da armadura e o fluxo do campo.
- $J \cdot \frac{\partial \omega(t)}{\partial t}$  : Representa o torque inercial necessário para acelerar ou desacelerar a massa do rotor.
- $b \cdot \omega(t)$  : É o torque de oposição causado pelo atrito viscoso (proporcional à velocidade).
- $Tl(t)$  : É o torque resistente aplicado por qualquer carga mecânica conectada ao eixo.

Considerando que o ensaio é feito com o motor a vazio a partir de uma velocidade constante, podemos considerar que o torque neste ensaio é apenas o gerado pela força de atrito.

$$\begin{aligned} Te(t) &= b \cdot \omega(t) \\ Kt \cdot I_{vazio} &= b \cdot \omega_{vazio} \\ b &= \frac{Kt \cdot I_{vazio}}{\omega_{vazio}} \end{aligned} \quad (21)$$

Substituindo os valores temos que:

**Quadro 03:** Constante de Atrito Viscoso.

| CONTANTE DE ATRITO VISCOSO |             |
|----------------------------|-------------|
| <b>Ivazio</b>              | 0.148       |
| <b>RPM vazio</b>           | 1730        |
| <b>w vazio</b>             | 181.1651764 |
| <b>Kt</b>                  | 0.575924567 |
| <b>b</b>                   | 0.000470492 |

Fonte: Própria

Ainda dentro das condições deste ensaio temos que ao desligar a fonte de alimentação da armadura o torque elétrico passa a ser zero, e levando em consideração a literatura, podemos estimar o valor do momento de inercia pelo desenvolvimento da expressão:

$$\begin{aligned}
0 &= J \cdot \frac{\partial \omega}{\partial t} + b \cdot \omega + 0 \\
-b \cdot \omega &= J \cdot \frac{\partial \omega}{\partial t} \\
-\frac{b}{J} \cdot \partial t &= \frac{\partial \omega}{\omega} \\
\int_{t1}^{t2} -\frac{b}{J} \cdot \partial t &= \int_{w(t1)}^{w(t2)} \frac{1}{\omega} \cdot \partial \omega \\
[\ln(\omega)]_{w(t1)}^{w(t2)} &= -\frac{b}{J} \cdot (t2 - t1) \\
\ln(\omega(t2)) - \ln(\omega(t1)) &= -\frac{b}{J} \cdot (t2 - t1) \\
\ln\left(\frac{\omega(t2)}{\omega(t1)}\right) &= -\frac{b}{J} \cdot (t2 - t1) \\
\ln\left(\frac{\omega(t1)}{\omega(t2)}\right) &= \frac{b}{J} \cdot (t2 - t1) \\
J &= \frac{b \cdot (t2 - t1)}{\ln\left(\frac{\omega(t1)}{\omega(t2)}\right)} \quad (22)
\end{aligned}$$

Considerando que a alimentação da armadura foi retirada no instante  $t_0 = 0,24s$  a uma velocidade de 1730 RPM e que a velocidade de rotação alcançou 36,8% de seu valor inicial em  $t_{36,8\%} = 1.624s$ , o momento de inércia J substituindo os valores é:

**Quadro 04:** Momento de Inercia.

| MOMENTO DE INERCIA |             |
|--------------------|-------------|
| <b>b</b>           | 0.000470492 |
| <b>t1</b>          | 0.24        |
| <b>t2</b>          | 1.624       |
| <b>w(t1)</b>       | 1730        |
| <b>w(t2)</b>       | 636.64      |
| <b>J</b>           | 0.000651375 |

Fonte: Própria

### 7.2.3 Resistência e indutância de armadura

Para a determinação da indutância da armadura  $L_a$ , realizou-se um ensaio de impedância com o rotor bloqueado, aplicando-se uma tensão alternada de baixa amplitude nos terminais da máquina. Através da medição simultânea da tensão eficaz  $V_{rms}$ , da corrente eficaz  $I_{rms}$  e da resistência de armadura ( $R_a$ ) previamente obtida, calculou-se a impedância total pelo seguinte desenvolvimento matemático.

$$|Z_a| = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} \quad (23)$$

$$|Z_a| = \sqrt{R_a^2 + (\omega \cdot L_a)^2} \quad (24)$$

$$L_a = \frac{\sqrt{Z_a^2 - R_a^2}}{\omega}$$

$$L_a = \frac{\sqrt{\left(\left(\frac{V_{rms}}{I_{rms}}\right)^2 - R_a^2\right)}}{2\pi \cdot 60} \quad (23)$$

**Quadro 05:**Dados medição impedância.

|           |          |
|-----------|----------|
| <b>Za</b> | 54.32787 |
| <b>Ra</b> | 10.3     |
| <b>La</b> | 0.141496 |
| <b>Va</b> | 3.314    |
| <b>Ia</b> | 0.061    |

Fonte: Própria

Com a finalização deste ensaio encontra-se todos os parâmetros necessários para a construção do circuito equivalente do motor, e respectivamente a obtenção da função de transferência do motor.

**Quadro 06:**Dados Gerais Motor CC.

|           |             |
|-----------|-------------|
| <b>J</b>  | 0.000651375 |
| <b>B</b>  | 0.000470492 |
| <b>Ke</b> | 0.575924567 |
| <b>Kt</b> | 0.575924567 |
| <b>R</b>  | 10.3        |
| <b>L</b>  | 0.141495501 |

Fonte: Própria

### 7.3 Função de transferência do motor CC

A partir das equações (20) e da Lei de Kirchhoff na malha do circuito de armadura do motor, aplicamos a transformada de Laplace e obtemos as seguintes expressões.

$$T_e(s) = J \cdot \Omega(s) \cdot s + b \cdot \Omega(s) - T_l(s) \quad (24)$$

$$V_a(s) = E + R_a \cdot I(s) + L_a \cdot I(s) \cdot s \quad (25)$$

E sabendo que:

$$E = K_v \cdot \Omega(s)$$

$$T_e(s) = K_m \cdot I(s)$$

$$I(s) = \frac{V_a(s) - K_v \cdot \Omega(s)}{R_a + L_a \cdot s} \quad (26)$$

Substitui-se a equações (26) acima na equação em (24).

$$\begin{aligned}
 K_m \cdot I(s) &= J \cdot \Omega(s) \cdot s + b \cdot \Omega(s) - T_l(s) \\
 K_m \cdot \left( \frac{V_a(s) - K_v \cdot \Omega(s)}{R_a + L_a \cdot s} \right) &= \Omega(s) \cdot (J \cdot s) + \Omega(s) \cdot b - T_l(s) \\
 \frac{V_a(s) \cdot K_m}{(R_a + L_a \cdot s)} + \frac{\Omega(s) \cdot (K_v \cdot K_m)}{(R_a + L_a \cdot s)} &= \Omega(s) \cdot (J \cdot s + b) - T_l(s)
 \end{aligned}$$

Agora isolando no lado esquerdo da equação a velocidade angular no domínio da frequência:

$$\begin{aligned}
 \Omega(s) \cdot \left( \frac{(K_v \cdot K_m)}{R_a + L_a \cdot s} + (J \cdot s + b) \right) &= \frac{V_a(s) \cdot K_m}{(R_a + L_a \cdot s)} - T_l(s) \\
 \Omega(s) \cdot \left( \frac{K_v \cdot K_m + R_a \cdot J \cdot s + R_a \cdot b + J \cdot s^2 \cdot L_a + b \cdot L_a \cdot s}{R_a + L_a \cdot s} \right) &= \frac{V_a(s) \cdot K_m}{(R_a + L_a \cdot s)} - T_l(s) \\
 \Omega(s) \cdot \left( \frac{s^2 \cdot (J \cdot L_a) + s \cdot (J \cdot R_a + L_a \cdot b) + (R_a \cdot b + K_v \cdot K_m)}{R_a + L_a \cdot s} \right) &= \frac{V_a(s) \cdot K_m}{(R_a + L_a \cdot s)} - T_l(s) \\
 \Omega(s) = V_a(s) \left\{ \frac{K_m}{s^2 \cdot (J \cdot L_a) + s \cdot (J \cdot R_a + L_a \cdot b) + (R_a \cdot b + K_v \cdot K_m)} \right\} &- T_l(s) \left\{ \frac{(R_a + L_a \cdot s)}{s^2 \cdot (J \cdot L_a) + s \cdot (J \cdot R_a + L_a \cdot b) + (R_a \cdot b + K_v \cdot K_m)} \right\}
 \end{aligned}$$

Neste ponto, podemos observar que a equação da velocidade do motor é dada, pela primeira parte, à tensão de alimentação, e a segunda parte, como a carga mercância acoplada ao eixo do motor. No caso deste trabalho o motor opera à vazio nos levando à seguinte função de transferência.

$$\frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{s^2 \cdot (J \cdot L_a) + s \cdot (J \cdot R_a + L_a \cdot b) + (R_a \cdot b + K_v \cdot K_m)} \quad (27)$$

É comum também que na literatura façamos algumas considerações a fim de simplificar a função de transferência do motor, como por exemplo:

1. Desprezar o atrito e considerar que  $K_m$  é igual a  $K_v$  que é igual a  $K$ :

$$\frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{s^2 \cdot (J \cdot L_a) + s \cdot (J \cdot R_a) + K^2} \quad (28)$$

2. Caso o valor de  $L_a$  seja muito baixo, pode-se aproximá-lo à 0:

$$\frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{s \cdot (J \cdot R_a) + K^2}$$

Ou

$$\frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{\frac{K}{(J \cdot R_a)}}{s + \frac{K^2}{(J \cdot R_a)}}$$

Onde o Polo é igual a:

$$\frac{A}{s+P} = \frac{\frac{K}{(J \cdot R_a)}}{s + \frac{K^2}{(J \cdot R_a)}}$$

$$P = \left( \frac{K^2}{J \cdot R} \right) \quad (29)$$

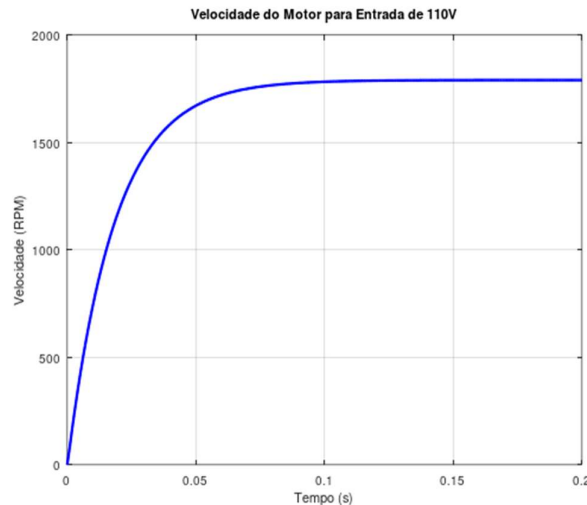
Como podemos observar, apesar da natureza da função de transferência da velocidade angular do eixo do motor pela tensão de armadura do motor de corrente contínua ser uma equação de segunda ordem, a mesma pode ser simplificada para a primeira ordem. Vale observar também a possibilidade de encontrar os valores do pólo e zero da função.

Substituindo os valores do motor na equação temos que:

$$\frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{s^2 \cdot (9.22 \cdot 10^{-5}) + s \cdot (6.78 \cdot 10^{-3}) + (3.32 \cdot 10^{-3})^2} \quad (29)$$

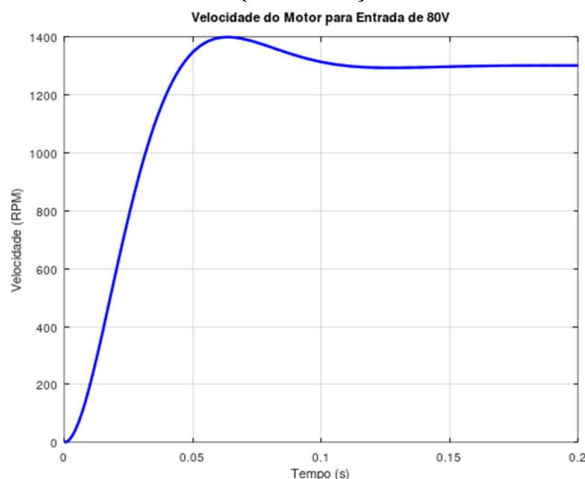
Plotando os dados no código do OCTAVE, temos o gráfico do comportamento dinâmico do motor.

**Figura 27.** Resposta no domínio do tempo da Função de Transferência Simplificada do Motor.



Fonte: Própria.

**Figura 28.** Resposta no domínio do tempo da Função de Transferência Completa do Motor.



Fonte: Própria.

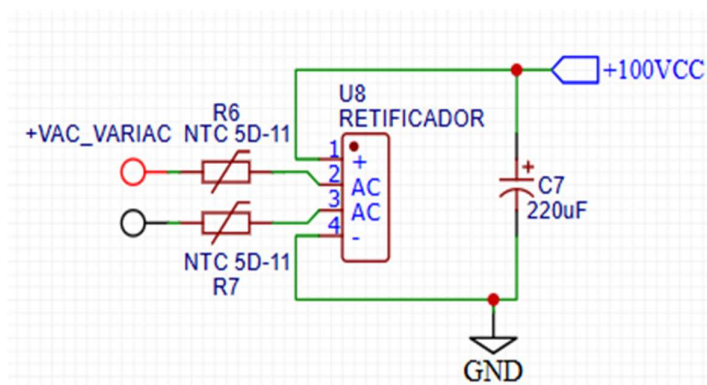
## 7.4 Projeto placa PCB

O desenvolvimento do hardware consistiu na projeção e confecção de uma placa de circuito impresso dedicada, integrando os estágios de retificação, conversão de potência e interface de controle em um único módulo compacto.

### 7.4.1 Ponte retificadora + filtro capacitado

A etapa de entrada do circuito é composta por uma ponte retificadora de onda completa, responsável por converter a tensão alternada proveniente do variac. Logo em seguida, um filtro capacitivo posicionado para atenuar a ondulação de tensão. Adicionalmente, inseriu-se um termistor NTC em série para limitar a corrente de partida (*inrush*) ocasionada por capacitores, estabelecendo assim um barramento de corrente contínua seguro e estável para a alimentação do estágio de potência subsequente.

**Figura 29:** Circuito conversor CA-CC

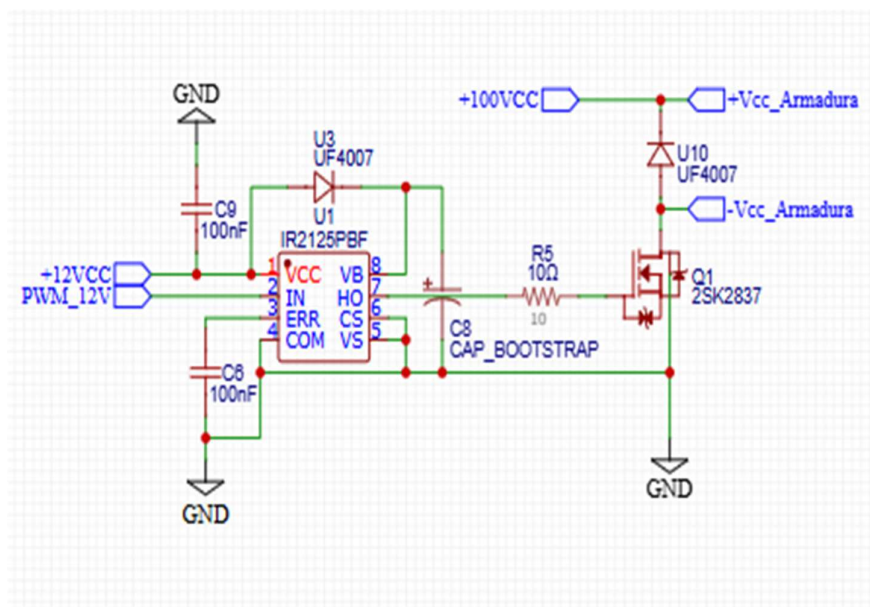


Fonte: Própria.

#### 7.4.1 Circuito mosfet + circuito bootstrap

O estágio de comutação foi estruturado em torno do driver IR2125, responsável pelo acionamento do MOSFET de potência 2SK2837. Para viabilizar a operação em high-side, implementou-se um circuito de bootstrap com um capacitor de  $4,7\mu\text{F}$ , associado a filtros capacitivos para estabilização do sinal.

**Figura 30:** Circuito BootStrap.



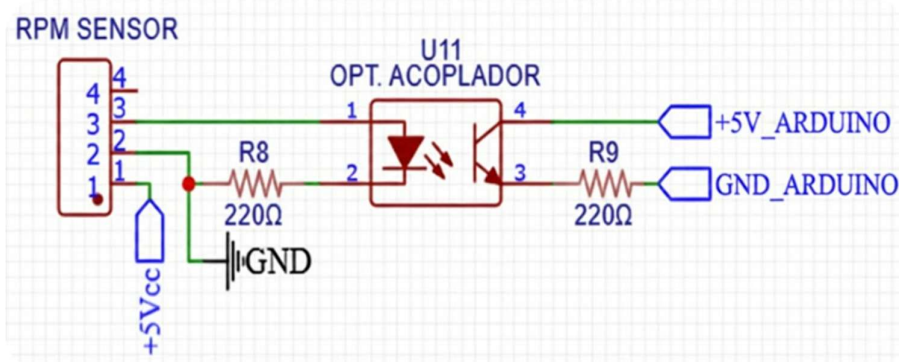
Fonte: Própria.

Além de realizar o controle do gate, o driver atua como elemento de interface entre o circuito de controle e a etapa de potência. Sua alimentação de 12 Vcc é fornecida por um módulo conversor isolado (110 Vac / 12 Vcc), garantindo a independência energética e protegendo a lógica de controle contra instabilidades da rede de potência.

#### 7.4.2 Sensor de velocidade e sinal PWM

Para a medição da velocidade no eixo, utilizou-se inicialmente um módulo de sensor óptico comercial. Contudo, durante os testes com a placa, o projeto enfrentou um problema crítico de ruído elétrico gerada pelo chaveamento do MOSFET de alta frequência, corrompendo os pulsos digitais e dificultando a leitura direta pelo microcontrolador. Para solucionar essa instabilidade, projetou-se um circuito auxiliar contendo um optoacoplador entre a saída do sensor e o ARDUINO.

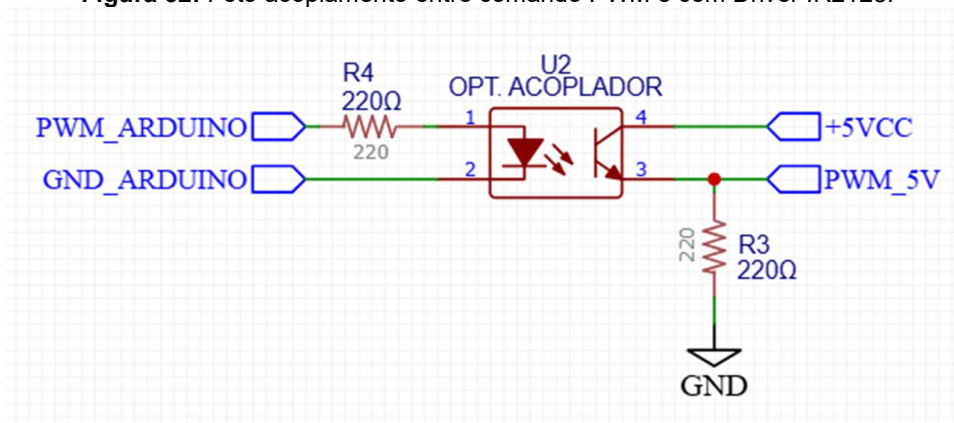
**Figura 31:** Foto acoplamento entre sensor de velocidade com ARDUINO.



Fonte: Própria.

De maneira similar foi feito com a transmissão do sinal de controle PWM entre o ARDUINO e a entrada lógica do driver IR2125. Essa configuração teve por objetivo proteger o microcontrolador de eventuais curtos ou picos de tensão possíveis de acontecer na parte de potência, além dos ruídos também. Entretanto, observou-se uma limitação no optoacoplador utilizado, os testes feitos com o dispositivo demonstraram que o componente conseguia reproduzir os pulsos até o limite de 10kHz, restringindo a frequência de chaveamento do sistema para evitar distorções que comprometessem o ciclo de trabalho e saturando quais quer outros ruídos acima dessa frequência.

**Figura 32:** Foto acoplamento entre comando PWM e com Driver IR2125.

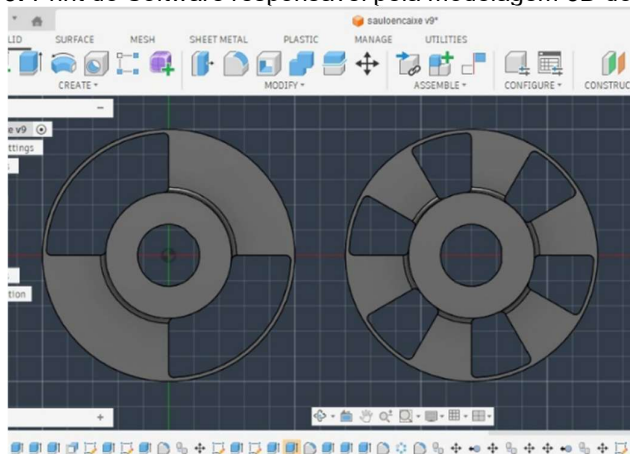


Fonte: Própria.

#### 7.4.2.1 Disco encoder e Módulo do Sensor.

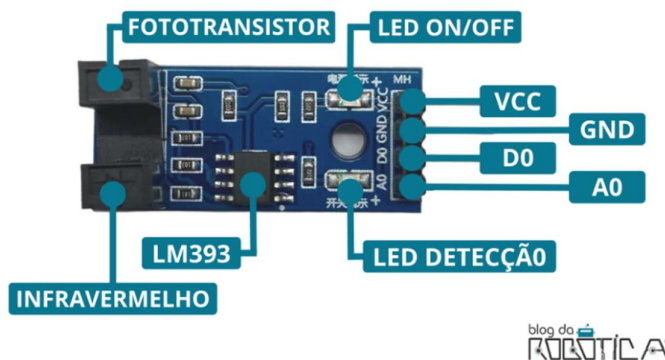
O sensor de velocidade baseado no encoder consiste no circuito responsável pela geração do feixe de luz infravermelho convertido em pulso elétrico, junto ao disco com fissuras. O módulo do circuito foi adquirido pronto, porém o disco foi feito sobre medida para o eixo do motor.

**Figura 33:** Print do Software responsável pela modelagem 3D do encoder.



Fonte: Própria.

**Figura 34:** Módulo sensor óptico.



blog do  
ROBÓTICA

Fonte: <https://www.blogdarobotica.com/2024/03/27/como-utilizar-o-sensor-de-velocidade-encoder-com-o-arduino/>.

## 7.5 Desenvolvimento dos programas.

Neste trabalho foi desenvolvido 3 códigos, o primeiro deles e o mais simples, foi desenvolvido no OCTAVE destinado a plotagem dos gráficos da função de transferência teórica encontrada com base nos dados do motor.

O segundo, feito no ARDUINO IDE, está destinado a leitura da velocidade do eixo do motor, implementação do PID, regulação do DutyCycle e comunicação com o próximo programa, feito no VSCode, que tem por objetivo a plotagem em tempo real da velocidade de referência e a resposta no domínio do tempo da velocidade em relação ao DutyCycle. Eles estão disponíveis no link:

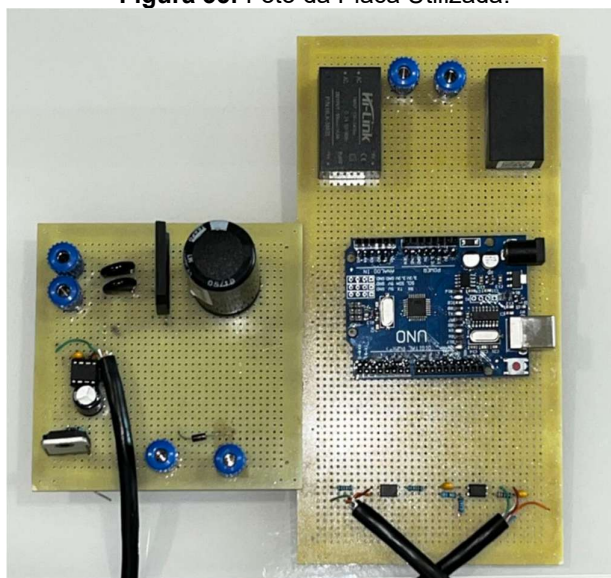
[https://github.com/SauloMairesse/TCC\\_SAULO-E-LEO](https://github.com/SauloMairesse/TCC_SAULO-E-LEO).

## 8 RESULTADOS E DISCUSSÕES.

### 8.1 Circuito chaveador feito na placa PCB.

Com os circuitos projetados e simulados, fora feito o confeccionamento da PCB e a análise do sinal de saída da alimentação do motor e os testes em cada faixa de operação.

**Figura 35:** Foto da Placa Utilizada.



Fonte: Própria.

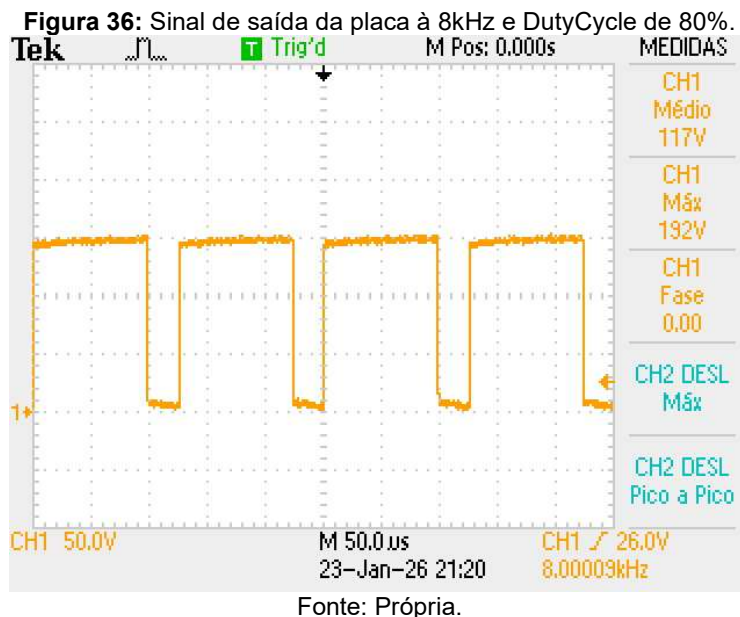
Neste ponto há uma observação sobre a instabilidade do chaveamento presente nos ciclos de trabalho acima de 80% e abaixo de 20%. Tendo isso em consideração estabeleceu-se os limites de operação do DutyCycle como 20% o mínimo e 80% o máximo.

**Quadro 07:** Medições teste Ciclos de Trabalho.

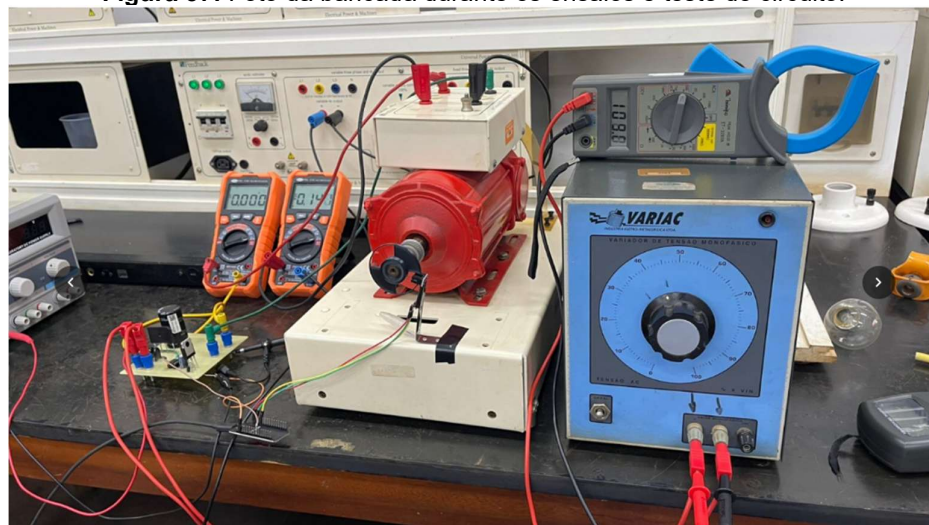
| DutyCyle | Ia    | Va Médio | If    | RPM  |
|----------|-------|----------|-------|------|
| 80%      | 0.159 | 114      | 0.148 | 1720 |
| 75%      | 0.153 | 103      | 0.15  | 1632 |
| 70%      | 0.154 | 101      | 0.144 | 1589 |
| 65%      | 0.153 | 93.1     | 0.141 | 1419 |
| 60%      | 0.149 | 87.3     | 0.142 | 1397 |
| 55%      | 0.148 | 79.7     | 0.14  | 1280 |
| 50%      | 0.143 | 72.6     | 0.139 | 1166 |
| 45%      | 0.139 | 65.3     | 0.138 | 1048 |
| 40%      | 0.134 | 59.4     | 0.139 | 944  |
| 35%      | 0.132 | 51.7     | 0.139 | 820  |
| 30%      | 0.128 | 44.2     | 0.137 | 696  |
| 25%      | 0.124 | 37.1     | 0.136 | 571  |
| 20%      | 0.121 | 30.6     | 0.137 | 467  |

Fonte: Própria

Abaixo está o sinal de alimentação do circuito de armadura no osciloscópio.



**Figura 37:** Foto da bancada durante os ensaios e teste do circuito.



Fonte: Própria.

## 8.2 Sensor de velocidade.

Na implementação do sensor de velocidade, uma das características mais importante a ser considerada neste tópico diz respeito à resolução do encoder em relação à velocidade máxima. Para este trabalho foram elaborados 2 encoder's. O primeiro com 2 ranhuras, o segundo com 12 ranhuras, porém devido a problemas relacionados à erros de medição, devido a causas diversas como desalinhamento com o eixo, trepidação e irregularidades na largura entre os feixes causados durante a

impressão do disco, devido a isso os ensaios foram feitos com o disco de 2 ranhuras no já proporcionavam 4 estados digitais por giro.

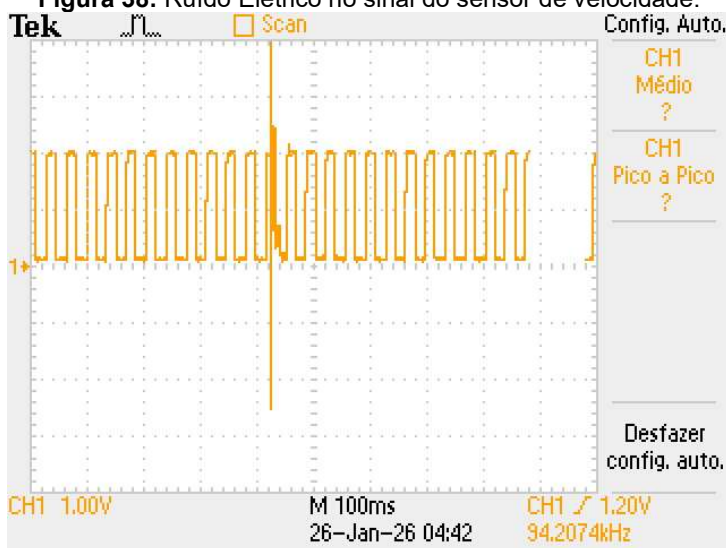
**Quadro 08:** Medições Sensor de Velocidade.

| TACOMETRO | ENCODER | DIFERENÇA |
|-----------|---------|-----------|
| 163       | 161     | -1.23%    |
| 346       | 352     | 1.73%     |
| 419       | 425     | 1.43%     |
| 575       | 554     | -3.65%    |
| 686       | 694     | 1.17%     |
| 742       | 746     | 0.54%     |
| 895       | 904     | 1.01%     |
| 1031      | 1069    | 3.69%     |
| 1152      | 1173    | 1.82%     |
| 1282      | 1307    | 1.95%     |
| 1386      | 1391    | 0.36%     |
| 1552      | 1587    | 2.26%     |
| 1675      | 1682    | 0.42%     |
| 1807      | 1819    | 0.66%     |

Fonte: Própria

Ainda no sensor de velocidade, notou-se que durante o chaveamento da fonte de alimentação de tensão havia a presença de distúrbios de alta frequência no sinal da leitura de velocidade. Como medida de tratamento desse sinal além da implementação do opto acoplador citado anteriormente, utilizou-se cabos de rede blindados, a fim de atenuar o “efeito antena” presente nos terminais das conexões e cabos próximos à carcaça do motor e a implementação de um filtro RC na entrada e saída do PC817.

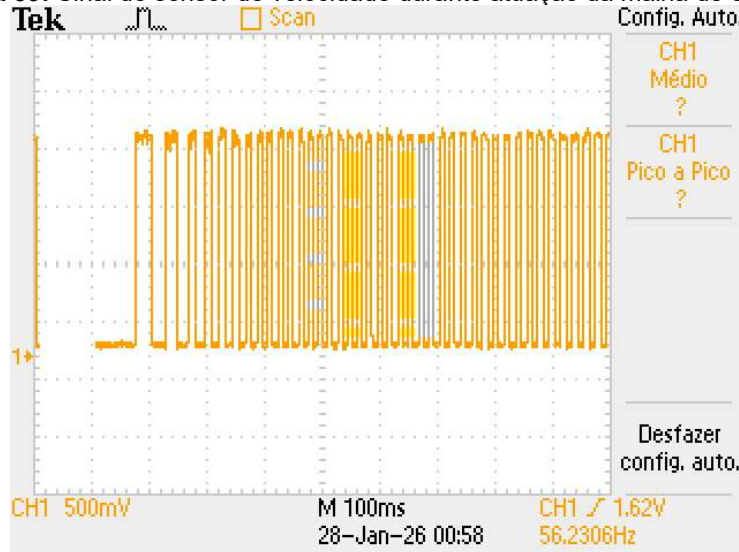
**Figura 38:** Ruído Elétrico no sinal do sensor de velocidade.



Fonte: Própria.

Os resultados da implementação destas medidas podem ser vistos na amostra do sinal do sensor encoder durante a atuação da planta de controle retirada do osciloscópio.

**Figura 39:** Sinal do sensor de velocidade durante atuação da malha de controle.



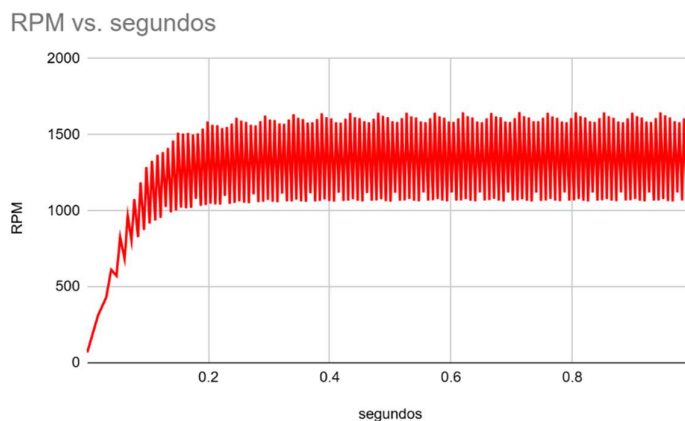
Fonte: Própria.

Nela mostra o sinal durante a partida do motor, onde no começo o espaçamento entre os pulsos do encoder decresce com o passar do tempo, sinalizando a aceleração do eixo, tendo seu pico de velocidade ao centro do gráfico, seguido de uma estabilização indicando o regime permanente já com velocidade constante.

### 8.3 Resposta ao degrau na prática.

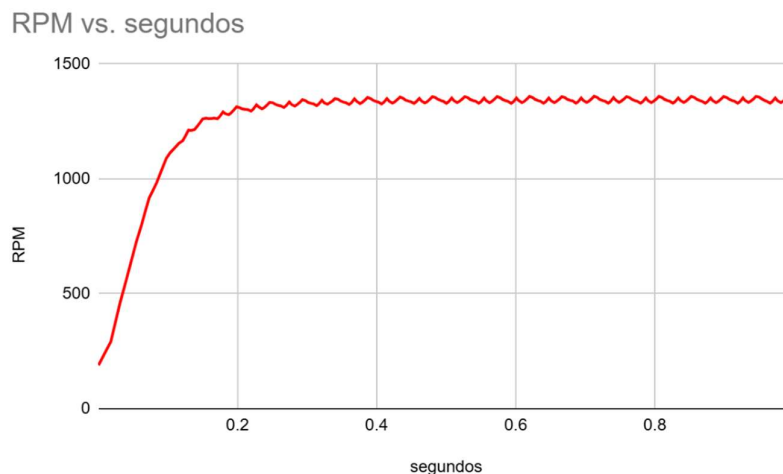
Disposto a placa PCB junto ao sensor de velocidade, foi realizado o ensaio da resposta ao degrau da partida do motor.

**Figura 40:** Valor da velocidade em RPM a cada mudança de feixe no encoder à 50% de DutyCycle e Tensão média de 80V.



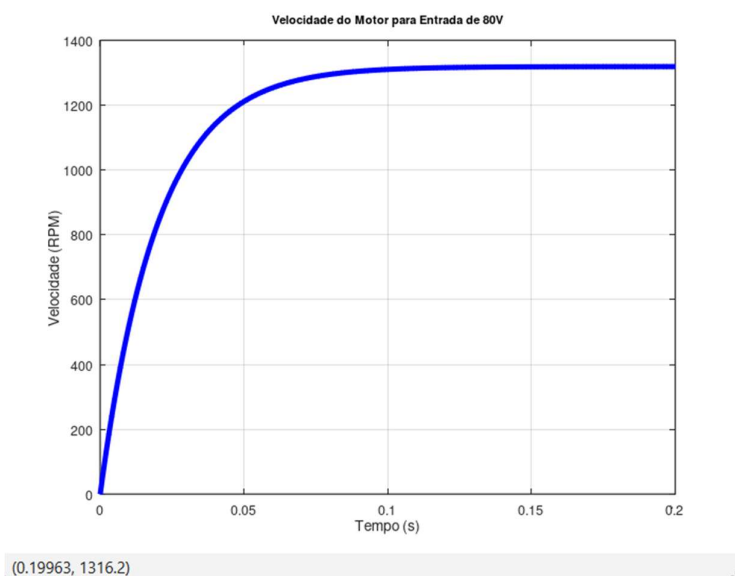
Fonte: Própria.

**Figura 41:** Resposta ao Degrau em RPM médio, com estabilização à 1341 RPM.



Fonte: Própria.

**Figura 42:** Resposta ao Degrau na função de transferência simplificada à 80V, com estabilização à 1316 RPM.



Fonte: Própria.

Na comparação entre os gráficos do ensaio real e simulado, é possível observar uma pequena diferença na velocidade em regime permanente, porém esta mesma diferença está dentro dos limites do erro de leitura da velocidade.

Outro ponto relevante a se pontuar está na comparação do tempo no qual o sistema leva para atingir 63.2% da velocidade, considerando os dados obtidos acima foram de 54.4ms e 19.4ms, essa diferença pode ser atribuída à imprecisão da leitura de velocidade, dada as limitações implicadas à resolução do encoder no qual durante a partida do motor, a variação de velocidade dentro de cada um dos 4 intervalos do

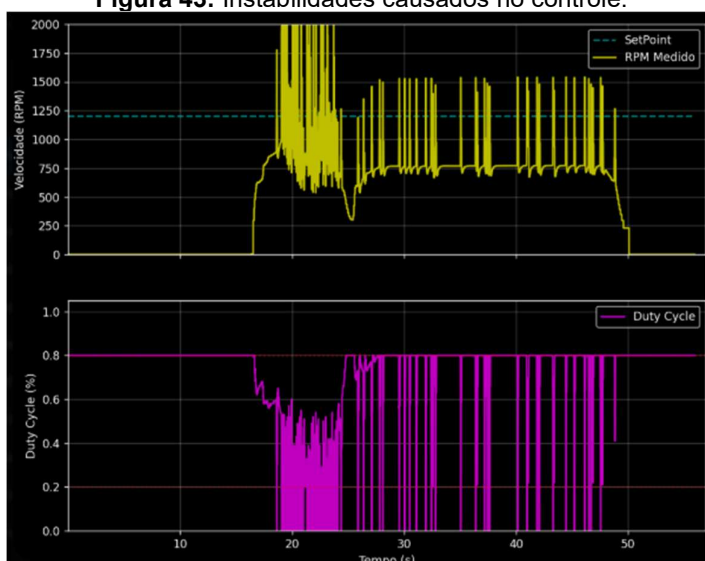
disco faz-se perder dados, à vibração observada nas bobinas do motor, e a irregularidade da fonte de alimentação do circuito de Campo do motor constatada durante os testes da placa e outros ensaios com a bancada.

#### 8.4 Implementação e resultados do controle PID.

Para a programação do controlador PID proposto nesse projeto, foi estabelecido alguns outros parâmetros além dos limites do dutycycle. A tensão de alimentação CA na entrada do retificador será de 110V. A velocidade máxima estabelecida será de 2000 RPM. O cálculo da velocidade para a planta de controle será dado pela média móvel entre os pulsos HIGH vindos do sensor, a razão disto se dá pelo fato de ter sido observado que o código operou de forma mais estável com a medida da média móvel.

Levando em consideração essas métricas de operação e a inda possíveis erros de leitura da velocidade foi estabelecido um filtro digital no código, visto que a velocidade máxima é 2000 RPM e que temos 2 pulsos HIGH por volta, o tempo máximo plausível entre os sinais deve ser de 15ms. Ressalva-se que foi estabelecido limites para a parcela do erro Integrativo prevenindo o acúmulo de infinito, e estabelecidos critérios de amortização da variação do Duty evitando variações abruptas.

**Figura 43:** Instabilidades causados no controle.



Fonte: Própria.

**Figura 43:** Reposta da malha de controle com: (A)  $K_p=0.2$ ,  $K_i=2$ ,  $K_d=0.04$ , RPM referência de 1000. (B)  $K_p=0.4$ ,  $K_i=2$ ,  $K_d=0.02$  RPM referência de 1400.

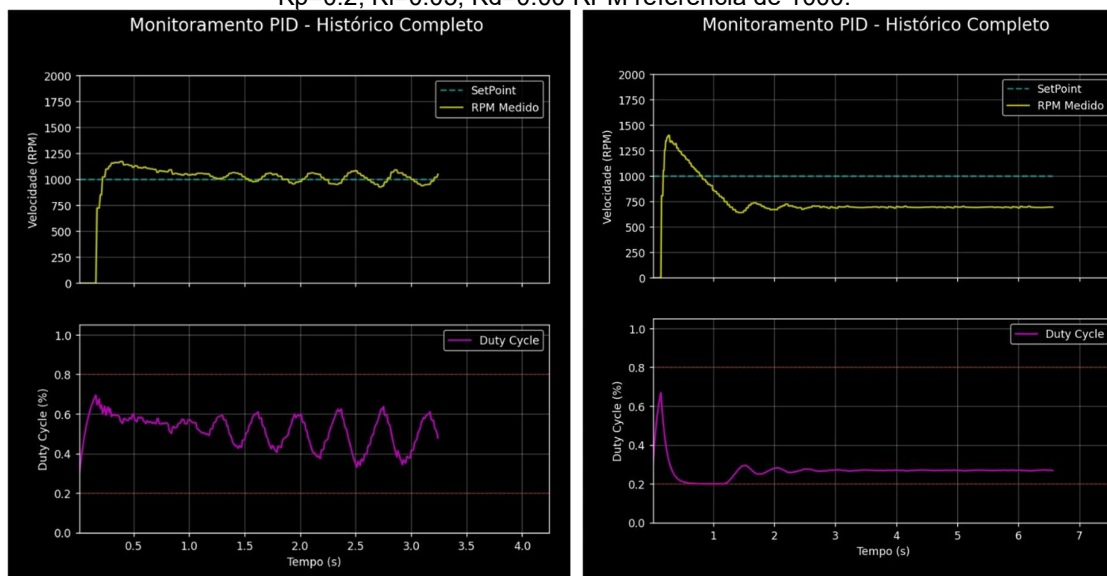


(A)

(B)

Fonte: Própria.

**Figura 44:** Reposta da malha de controle com: (A)  $K_p=1$ ,  $K_i=2$ ,  $K_d=0.04$ , RPM referência de 1000. (B)  $K_p=0.2$ ,  $K_i=0.05$ ,  $K_d=0.00$  RPM referência de 1000.



(A)

(B)

Fonte: Própria.

Cada curva apresentada acima consegue demonstrar vários cenários possíveis da resposta a um degrau de um sistema de Segunda Ordem Geral. Na figura 43(A) com os ganhos  $K_p=0.2$ ,  $K_i=2$ ,  $K_d=0.04$ , observa-se a curva característica de sistemas subamortecidos entrando em regime permanente próximo à 2 segundos. Já (B) com a velocidade de referência á 1400 RPM, e com os ganhos em  $K_p=0.4$ ,  $K_i=2$ ,  $K_d=0.02$ , o

sistema se comporta de maneira próxima a de sistemas criticamente amortecidos, apresentando pouquíssimo overshooting durante os intervalos de tempo entre 0.5s e 1.3s e logo estabilizando a velocidade próximo a 1.4s.

Na Figura 44:(B), com valores mais baixos dos ganhos, e sem a parcela diferencial do erro verifica-se uma resposta aguda e rápida no começo, no entanto em regime permanente a velocidade nunca alcança o valor de referência, devido ao baixo coeficiente  $K_i$  que multiplica o somatório dos erros acumulados no tempo e as limitações impostas à este somatório. Já na (A), é possível simular situações no qual os valores dos ganhos  $K_p=1$ ,  $K_i=2$  e  $K_d=0.04$  entreguem uma resposta típica de um controle não amortecido, fazendo com que a oscilação do erro cresça no decorrer do tempo não estabilizando.

## 9 CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu a integração multidisciplinar entre Eletrônica de Potência, Sistemas Embarcados e Teoria de Controle. A abordagem adotada permitiu transpor os conceitos vários dos conceitos teóricos vistos no decorrer da formação de Eng. Elétrica para uma aplicação física real, evidenciando também seus desafios.

A topologia de acionamento escolhida, baseada em um conversor CC-CC do tipo Buck em configuração simplificada (desprovida de estágio de filtragem LC na saída), impôs desafios técnicos significativos, majoritariamente relacionados à qualidade da energia entregue à armadura e à geração de ruídos eletromagnéticos (EMI). A análise dos resultados demonstrou que, embora a operação em regime de condução descontínua e sejam fatores críticos, o controle da velocidade média é plenamente viável através da modulação por largura de pulso (PWM), desde que haja um tratamento adequado dos sinais de realimentação do circuito e da alimentação da planta de controle.

Nesse contexto, a parte de sensoriamento revelou-se também uma etapa crucial. A instabilidade na leitura do encoder óptico, MOSFET de potência, foi mitigada com êxito através da implementação de isolamento galvânico (optoacopladores) e filtragem digital no firmware do Arduino.

A modelagem matemática do motor, obtida através dos ensaios, mostrou-se aceitável quanto comparada ao comportamento real do motor operando a vazio. A sintonia do controlador PID resultou em uma resposta dinâmica satisfatória, capaz de anular o erro em regime permanente e apresentar tempos de assentamento toleráveis.

### 9.1 Sugestões de trabalhos futuros

Visando o aprimoramento da plataforma desenvolvida e a expansão das possibilidades de estudo acadêmico, sugerem-se as seguintes propostas:

- **Adição de Filtro LC na Saída do Conversor:** Projetar e implementar um filtro LC na saída do conversor Buck.
- **Ensaio com Carga Dinâmica:** Montar um sistema que permita a adição de dinâmica de carga ao eixo do motor afim de adicionar perturbações e analisar a resposta do sistema à estas variações.
- **Integração com IoT:** Expandir a interface Python para uma plataforma IoT (Internet of Things), permitindo o monitoramento e controle remoto.

## REFERÊNCIAS

BACIU, Jonel Horea; CIOCAN, Ionut; LUNGU, Serban. Modeling transfer function for buck power converter. Applied Electronics Department, Faculty of Electronics, Telecommunications and Information Technology, Technical University of Cluj-Napoca, Romania, [s.d.]. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4432915/>. Acesso em: 13 ago. 2025.

BAZZO, Walter Antônio; PEREIRA, Luiz Teixeira do Vale. **Introdução à engenharia: conceitos, ferramentas e comportamentos**. 4. ed. Florianópolis: EDUFSC, 2017.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH/Bookman, 2013.

DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, [s.d.].

DUARTE PASSARELLI, Alan Silva. Levantamento de curvas características do motor de corrente contínua de ímã permanente e escovas. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – **Universidade Tecnológica Federal do Paraná**, Curitiba, 2023.

EEEGUIDE. Types of DC motor. [S. l.], [s.d.]. Disponível em: [https://www.eeeguide.com/types-of-dc-motor/#google\\_vignette](https://www.eeeguide.com/types-of-dc-motor/#google_vignette). Acesso em: 12 ago. 2025.

ELETRÔNICA DE POTÊNCIA. **Análise do conversor buck em MCC**. [S. l.], [s.d.]. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/analise-do-conversor-buck-em-mcc/>. Acesso em: 12 ago. 2025.

ERICKSON, Robert W. **Fundamentals of power electronics**. 2. ed. New York: Springer, 2001.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr., C. **Máquinas elétricas**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH/Bookman, 2014.

HUBERMAN, Leo. **História da riqueza do homem**. 16. ed. Rio de Janeiro: Zahar, 1980.

HUBERT CLOIX. **Contribuição de Michael Faraday**. [S. l.], c2025a. Disponível em: <https://www.hubertcloix.com/pt/invention-premier-moteur-electrique/>. Acesso em: 13 ago. 2025.

HUBERT CLOIX. **Thomas Davenport – primeiro motor de corrente contínua**. [S. l.], c2025b. Disponível em: <https://www.hubertcloix.com/pt/thomas-davenport-premier-moteur-courant-continu-1837/>. Acesso em: 13 ago. 2025.

LOUREIRO, Mario. **Motores CC**. [S. l.], [s.d.]. Disponível em: <http://www.marioloureiro.net/tecnica/electrif/MotoresCC3.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2025.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

O SETOR ELÉTRICO. **Motores elétricos e o consumo setorial de energia**. [S. l.], c2025. Disponível em: <https://www.osetoelettrico.com.br/motores-eletricos-e-o-consumo-setorial-de-energia/>. Acesso em: 13 ago. 2025.

OGATA, Katsuhiko. **Discrete-time control systems**. 2. ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995.

PATRICIO CONCHA. **Accionamientos**. [S. l.], [s.d.]. Disponível em: <http://patricioconcha.ubb.cl/410113/accionamientos/>. Acesso em: 12 ago. 2025.

PATRICIO CONCHA. **Accionamientos – excitsep**. [S. l.], [s.d.]. Disponível em: <http://patricioconcha.ubb.cl/410113/accionamientos/excitsep.htm>. Acesso em: 13 ago. 2025.

POMILIO, José Antenor. Eletrônica de potência. Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, **Universidade Estadual de Campinas**, 2014. Disponível em: [https://www.dsee.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/eletronica\\_potencia.pdf](https://www.dsee.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/eletronica_potencia.pdf). Acesso em: 13 ago. 2025.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2014.

SENAI ESPÍRITO SANTO; COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO. **Materiais e equipamentos em sistemas de baixa tensão**. [S. l.], [s.d.]. Disponível em: <https://drb-assessoria.com.br/pepi/senai/4.MateriaisEquipamentos%20l.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2025.

SIEMENS. **Motores de corrente contínua – guia rápido para especificação precisa**. Ed. 01.2006.

STARR, Gregory P. **Introduction to applied digital control**. 2. ed. New York: Springer, 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. **Basic calculation of a buck converter's power stage**. [S. l.], [s.d.].

TEXAS INSTRUMENTS. **Understanding buck power stages in switch-mode power supplies**. [S. l.], [s.d.].

WEG. **Guia de especificação – motores elétricos**. Jaraguá do Sul, SC: [s.n.], 2024.