



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU



Lucas Costa Brunelli

**Desenvolvimento de controlador para motor *brushless* no contexto
de mobilidade urbana**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
Outubro/2024

LUCAS COSTA BRUNELLI

DESENVOLVIMENTO DE CONTROLADOR PARA MOTOR *BRUSHLESS* NO
CONTEXTO DA MOBILIDADE URBANA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Alan Kardek Rêgo Segundo, D.Sc.

Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
Outubro/2024



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Costa Brunelli

Desenvolvimento de Controlador para Motor Brushless no Contexto de Mobilidade Urbana

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 05 de setembro de 2024

Membros da banca

Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Bruno Randazzo Baroni - Convidado (Universidade Federal de Ouro Preto)
Me. João Carlos Vilela de Castro - Convidado (Universidade Federal de Ouro Preto)

Alan Kardek Rêgo Segundo, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 11/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **Alan Kardek Rego Segundo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/10/2024, às 14:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0776562** e o código CRC **1A4D18FF**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.011222/2024-21

SEI nº 0776562

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino de qualidade e pelas inúmeras oportunidades proporcionadas em seus laboratórios. Sou profundamente grato aos meus pais, Genivaldo Brunelli e Suzana Brunelli, por todo o apoio incondicional, sem o qual nada disso seria possível.

Agradeço também ao curso e ao Departamento de Engenharia de Controle e Automação pela excelente formação que estou recebendo, e, em especial, ao professor Alan Kardek pela valiosa orientação e pelo conhecimento compartilhado ao longo desta jornada.

RESUMO

A mobilidade urbana contemporânea está em constante evolução, marcada pela mudança do paradigma anterior dos veículos, que careciam de preocupação ambiental e eficiência energética. Atualmente, há uma crescente conscientização sobre as emissões de gases veiculares e a baixa eficiência energética dos motores a combustão interna. Diante desse cenário, surge a necessidade de promover uma evolução sustentável na mobilidade urbana, impulsionando a adoção de meios de locomoção totalmente elétricos, os quais estão ganhando cada vez mais espaço e viabilidade. No entanto, para viabilizar esses veículos elétricos, foi imprescindível um avanço tecnológico significativo, considerando a alta complexidade no controle desses dispositivos, particularmente dos motores a serem empregados. Nesse contexto, no presente estudo propõe-se analisar e desenvolver um componente crucial na construção dos veículos elétricos: o controlador de motores de corrente contínua e sem escovas. Este controlador possui aplicações diversas, abrangendo desde automóveis, motocicletas e bicicletas até robôs, drones e outros dispositivos. Assim sendo, o trabalho aborda estudos nas áreas de física eletromagnética para compreensão dos motores elétricos, eletrônica de potência e sistemas embarcados, utilizando microcontroladores programáveis para executar todas as funções requeridas por esse dispositivo.

Palavras-chaves: Motor sem escovas. Eletrônica de potência. Microcontroladores.

ABSTRACT

Contemporary urban mobility is constantly evolving, marked by a shift from the previous paradigm of vehicles that lacked environmental concern and energy efficiency. Presently, there is a growing awareness of vehicle emissions and the low energy efficiency of internal combustion engines. In light of this scenario, there is a need to promote sustainable evolution in urban mobility by driving the adoption of fully electric means of transportation, which are increasingly gaining traction and viability. However, to make these electric vehicles viable, significant technological advancement has been imperative, considering the high complexity in controlling these devices, particularly the motors to be employed. In this context, the present study aims to analyze and develop a crucial component in the construction of electric vehicles: the controller for brushless direct current motors. This controller has diverse applications, ranging from automobiles, motorcycles, and bicycles to robots, drones, and other devices. Therefore, the work addresses studies in the areas of electromagnetic physics to understand electric motors, power electronics, and embedded systems, utilizing programmable microcontrollers to execute all the functions required by this device.

Key-words: Brushless motors. Electronic systems. Microcontrollers.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de construção de Motores BLDC	14
Figura 2 - Força contra eletromotriz gerada com a rotação do motor.	16
Figura 3 - Esquema eletrônico de um controlador de motor <i>brushless</i>	17
Figura 4 – Sensor de efeito hall	18
Figura 5 – Mosfet de Potência	19
Figura 6 - Representação de PWM e a relação com a tensão média	21
Figura 7 – Esquema elétrico de Mosfets acionadores	22
Figura 8 – Sinais de acionamento em cada estado do motor	22
Figura 9 – Polarização das bobinas com base no acionamento dos Mosfets	23
Figura 10 – Circuito Driver de acionamento Mosfet.....	25
Figura 11 – Representação do Excel de ondas Trapezoidais.....	28
Figura 12 – Resultado de Torque com acionamento Trapezoidal.	29
Figura 13 – Resultados de Drzymała e Gęca com acionamento senoidal. Fonte: adaptado de Drzymała e Gęca, 2021	30
Figura 14 – Tensões senoidais aplicadas no motor.	31
Figura 15 – Torque resultante com tensões senoidais.	31
Figura 16 – Esquemático da placa eletrônico.....	33
Figura 17 – Placa de circuito impresso antes da soldagem de componentes	34
Figura 18 – Bicicleta finalizada.....	35
Figura 19 – Resultados obtidos de corrente de acionamento das fases do Motor.	36

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Sequência de acionamento das fases do motor <i>brushless</i>	26
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	12
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
3.1	Motores Brushless	14
3.2	Controladores de Motores <i>Brushless</i>	16
3.3	Sensores de Efeito Hall.....	18
3.4	Elementos de comutação	18
3.5	Estudo de acionamento	20
4	DESENVOLVIMENTO	22
4.1	Métodos de acionamento	22
4.2	Dimensionamento de componentes	24
4.3	Controlador com onda Trapezoidal	26
4.4	Controlador com onda Senoidal	29
4.5	Algoritmo para acionamento senoidal.....	32
4.6	Desenvolvimento de Hardware	32
5	RESULTADOS.....	34
6	CONCLUSÃO.....	37
7	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem sido observado um aumento significativo no interesse e na adoção de veículos elétricos (VEs) como uma solução promissora para os desafios de mobilidade urbana. A transição para veículos elétricos representa uma mudança fundamental na forma como as pessoas se deslocam dentro das cidades, oferecendo uma alternativa mais limpa e eficiente aos veículos tradicionais movidos a combustíveis fósseis. A crescente conscientização sobre os impactos ambientais adversos da queima de combustíveis fósseis, juntamente com as preocupações relacionadas à poluição do ar e à mudança climática, tem impulsionado a busca por tecnologias mais sustentáveis no setor de transporte. Nesse contexto, os veículos elétricos emergem como uma solução viável e promissora para transformar a mobilidade urbana, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e melhorando a qualidade do ar nas cidades congestionadas (GERAEE et al., 2017).

A ideia central para o funcionamento eficaz dos veículos elétricos está no desenvolvimento contínuo de tecnologias de controle de motores elétricos, com destaque para os motores sem escovas (*brushless*). Esses motores, que não dependem de escovas para a transferência de energia, oferecem uma série de benefícios significativos, incluindo maior eficiência, menor manutenção e maior vida útil em comparação com os motores de corrente contínua convencionais (GAMAZO-REAL; VAZQUEZ-SANCHEZ; GOMEZ-GIL, 2024). No entanto, apesar de suas vantagens, os motores *brushless* também apresentam desafios únicos em termos de controle e integração, exigindo soluções técnicas avançadas para maximizar seu desempenho e eficiência (WASUNTAPICHAIKUL; SUKVICHAI; TIPSUWAN, 2017).

É nesse contexto que se situa o argumento central deste trabalho acadêmico: a mobilidade elétrica tem o potencial de revolucionar completamente a forma como as pessoas se movem dentro das cidades, oferecendo uma alternativa ambientalmente sustentável e energeticamente eficiente aos sistemas de transporte convencionais. Essa mudança de paradigmática não só reduzirá o impacto ambiental do transporte urbano, mas também abrirá caminho para uma nova era de inovação e desenvolvimento tecnológico (DASANAYAKE; PERERA, 2023).

No presente trabalho propõe-se abordar essa questão por meio do desenvolvimento de uma placa eletrônica especializada capaz de controlar motores *brushless*, com foco específico na aplicação em veículos elétricos de pequeno porte, como as bicicletas elétricas. Ao explorar e desenvolver tecnologias avançadas de controle de motores, o objetivo é tornar a mobilidade elétrica de pequeno porte não apenas possível, mas também viável e atrativa para uma ampla

gama de usuários. Reconhece-se que, para alcançar esse objetivo, é essencial entender e superar os desafios técnicos e práticos associados ao acionamento eficiente de motores *brushless* em um contexto urbano (MOHAMED et al., 2021).

Portanto, o objetivo deste trabalho é contribuir para o avanço da mobilidade elétrica no Brasil, fornecendo uma base sólida de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia para sistemas de propulsão elétrica de pequeno porte. Acredita-se que essa abordagem não apenas beneficiará o meio ambiente e a qualidade de vida nas cidades, mas também abrirá novas oportunidades para a inovação e o progresso tecnológico em um setor crucial para o futuro da mobilidade urbana.

2 REVISÃO DA LITERATURA

No desenvolvimento de controladores para motores *brushless* no contexto de mobilidade urbana, é crucial compreender a evolução e aplicação dos motores elétricos. Os motores de corrente alternada (CA), com destaque em diversas aplicações desde sua concepção, dividem-se em tipos como síncronos e assíncronos (*ou motores de indução*). Os motores de indução de CA são fundamentais para a engenharia elétrica moderna, com sua invenção atribuída a Nikola Tesla no final do século XIX. Esses motores operam com base no princípio do eletromagnetismo descrito por Michael Faraday, onde um campo magnético rotativo no estator induz uma corrente elétrica no rotor, que é livre de conexões físicas diretas com a fonte de alimentação (SMITH, 2001). Esta inovação permitiu uma operação mais segura e eficiente, com menos manutenção devido à ausência de escovas. Os motores de indução são especialmente valorizados em ambientes industriais devido à sua capacidade de operar sob condições severas e variadas cargas sem degradação significativa, tornando-os ideais para aplicações que vão desde grandes máquinas industriais até sistemas de transporte e refrigeração (JONES, 1998).

Os motores síncronos de CA, por outro lado, surgiram como um refinamento dos princípios básicos dos motores de indução, oferecendo sincronia entre a velocidade do rotor e a frequência da corrente do estator, graças à contribuição de cientistas como Charles Proteus Steinmetz, que desenvolveu teorias fundamentais sobre o fluxo magnético e a operação de motores síncronos no início do século XX (TAYLOR, 2005). Estes motores utilizam um campo magnético permanente ou um enrolamento alimentado externamente no rotor, permitindo aplicações onde a precisão da velocidade é crítica, como em geradores de usinas elétricas e em processos industriais que demandam uma velocidade constante, independentemente das variações de carga.

Em relação aos motores de corrente contínua (CC), a evolução começa com os experimentos de Michael Faraday em 1821, que demonstrou pela primeira vez a conversão de energia elétrica em energia mecânica. Os motores CC escovados evoluíram com contribuições de inventores como Thomas Edison e Werner von Siemens, que aprimoraram o design e a aplicação prática desses motores (BROWN, 1999). A natureza dos motores escovados permite um controle muito preciso da velocidade, embora as escovas resultem em maior desgaste e manutenção. Estes motores são frequentemente usados em aplicações onde o custo inicial baixo e o controle preciso são prioritários, como em ferramentas elétricas e automação de fábricas (MILLER, 2003).

Os motores CC *brushless* representam uma modernização significativa, onde as limitações das escovas são eliminadas através do uso de eletrônica para comutar as bobinas do estator. Esta tecnologia surgiu fortemente nos anos 1960 e 1970 com o desenvolvimento de semicondutores mais avançados, que permitiram o controle eletrônico preciso necessário para esses motores (WHITE, 2010). A eficiência e a durabilidade dos motores *brushless*, juntamente com a redução do ruído e da manutenção, os tornam ideais para aplicações de alta tecnologia, como em veículos elétricos e aeronaves não tripuladas, onde a confiabilidade e o desempenho são críticos (NGUYEN, 2017).

Comparando os motores CC *brushless* com seus homólogos escovados, a principal vantagem está na eliminação das escovas, o que reduz a fricção, o calor gerado e o desgaste geral, resultando em uma eficiência operacional superior e uma vida útil mais longa. A capacidade de controle eletrônico também permite uma integração mais eficaz com sistemas digitais modernos, fornecendo uma base para inovações em controle de velocidade e torque, essenciais em muitas aplicações de mobilidade urbana. Portanto, os motores *brushless* são frequentemente escolhidos para projetos que exigem eficiência energética, confiabilidade a longo prazo e operação ambientalmente consciente, atributos essenciais para sustentar o crescimento do transporte urbano sustentável.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Motores Brushless

Nos motores *brushless* existem duas configurações principais: *inrunner* e *outrunner*. Os motores *inrunner* possuem o rotor (que contém os ímãs permanentes) localizado internamente em relação ao estator (que contém as bobinas). Este design é benéfico para aplicações que exigem altas rotações por minuto (RPM), pois o rotor menor tem uma inércia reduzida, o que facilita velocidades rotacionais mais rápidas. Em contraste, os motores *outrunner* apresentam um rotor externo que gira em torno de um estator fixo. Essa configuração proporciona um torque superior devido ao maior diâmetro do rotor, tornando-os ideais para aplicações que exigem mais força de rotação em baixas RPMs (NGUYEN, 2017). Os dois tipos de configuração estão ilustrados na Figura 1.

Ambos os tipos de motores são comutados eletronicamente, mesmo aumentando a complexidade para o funcionamento do motor devido a métodos sofisticados de acionamento que devem ser aplicados pela eletrônica de controle, ainda assim é viável pois com o avanço da tecnologia tornou possível o desenvolvimento desses controladores e utilização de motores *brushless*. Assim eliminando a necessidade de escovas para transferência de energia, reduzindo assim a manutenção e aumentando a vida útil do motor (NGUYEN, 2017).

Esta descrição destaca as vantagens e aplicações específicas de cada tipo de motor *brushless*, ilustrando como a escolha entre um motor *inrunner* ou *outrunner* pode depender significativamente da aplicação pretendida, seja buscando maior torque ou maiores RPMs.

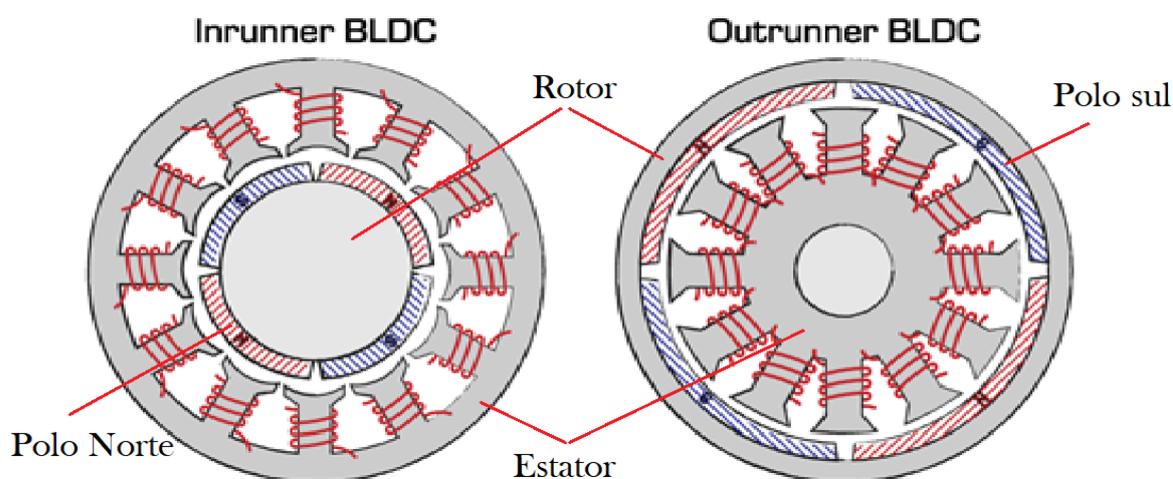


Figura 1 - Tipos de construção de Motores BLDC

Fonte: Nguyen, 2017

Os motores *brushless*, operam com base em princípios fundamentais de magnetismo e a manipulação de correntes elétricas para gerar movimento.

A operação desses motores é essencialmente baseada na interação entre campos magnéticos e correntes elétricas, uma descoberta que remonta aos estudos pioneiros de Alessandro Volta e William Sturgeon no século XIX, que ligaram eletricidade e magnetismo de maneiras que permitiram o desenvolvimento dos primeiros motores elétricos (BAIGRIE, 2006).

Nos motores *brushless* DC (BLDC), correntes elétricas são passadas através de enrolamentos no estator, que interagem com ímãs permanentes no rotor. Essa interação cria um campo eletromagnético rotativo que, por sua vez, faz o rotor girar sem a necessidade de contato físico através de escovas, daí o termo "sem escova". Esse processo é aprimorado pelo uso de controladores eletrônicos que ajustam a entrega de corrente aos enrolamentos do estator para maximizar a eficiência e responder dinamicamente às demandas de carga do motor (ARULKUMAR et al., 2023).

Adicionalmente, a teoria eletrônica do magnetismo de Gill, descrita em 1964, explica como as forças magnéticas têm componentes de torque longitudinais em condutores percorrido por corrente elétrica, assim produzindo as forças necessárias para o funcionamento dos motores. Essa interação entre eletricidade e magnetismo é fundamental para a criação do movimento e a geração de energia nos motores *brushless*, proporcionando uma base para o desenvolvimento e aperfeiçoamento contínuo desses motores em diversas aplicações, desde veículos elétricos até sistemas robóticos avançados (GILL, 1964). Os princípios de magnetismo e as técnicas de controle das correntes elétricas em motores *brushless* não apenas facilitam uma operação eficiente, mas também habilitam avanços significativos em termos de desempenho de torque, eficiência energética e redução do ruído operacional, o que é essencial para aplicações modernas em veículos elétricos e automação industrial (KRISHNAMOORTHY; PARAKKAT KESAVA PANIKKAR, 2022).

Na essência de sua operação, os motores *brushless* utilizam um sistema eletrônico de controle para regular a alimentação de energia nas bobinas do estator. Diferente dos motores com escovas, onde a comutação é mecanicamente sincronizada com a rotação do motor, nos motores *brushless* essa comutação é eletronicamente controlada. Este controle preciso não só aumenta a eficiência energética, como também melhora o desempenho geral do motor (KRISHNAMOORTHY; PARAKKAT KESAVA PANIKKAR, 2022).

Um dos componentes críticos na operação dos motores *brushless* é a força eletromotriz reversa (FCEM), gerada pelo movimento do rotor em oposição à corrente elétrica aplicada. A FCEM é

essencial para o funcionamento correto do motor, pois para o acionamento correto do motor as bobinas devem ser acionadas a fim de criar torque no rotor e provocar um giro em uma certa direção como mostra na Figura 2, e quando este chega nesta nova posição as bobinas devem mudar o acionamento e levar o rotor para a próxima posição e assim por diante. Tal acionamento é realizado através de um inversor que alterna a alimentação das bobinas do estator (KRISHNAMOORTHY; PARAKKAT KESAVA PANIKKAR, 2022).

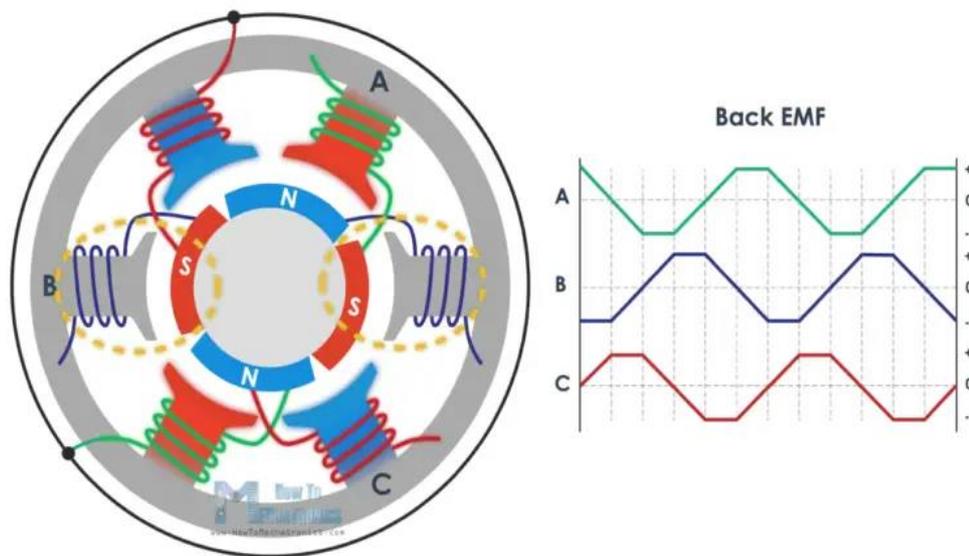


Figura 2 - Força contra eletromotriz gerada com a rotação do motor.

Fonte: Krishnamoorthy, 2022

3.2 Controladores de Motores *Brushless*

Para o desenvolvimento de um controlador *brushless*, é crucial compreender os diferentes tipos de controladores disponíveis. Existem principalmente duas categorias de controladores baseados na presença ou ausência de sensores Hall e dois métodos de acionamento principais: trapezoidal e senoidal (KRISHNAMOORTHY; PARAKKAT KESAVA PANIKKAR, 2022). Os controladores com sensores Hall utilizam sensores magnéticos para detectar a posição do rotor. Isso permite uma comutação precisa das fases do motor, resultando em um controle mais eficiente e suave. A utilização de sensores Hall é particularmente vantajosa em aplicações que requerem alta precisão e respostas rápidas a mudanças de carga e velocidade.

De acordo com Krishnamoorthy (2022), a implementação de sensores Hall em motores *brushless* melhora significativamente a eficiência e a resposta dinâmica do sistema, facilitando a integração em sistemas complexos de controle de movimento.

Já os controladores sem sensores Hall, também conhecidos como controladores *sensorless*, estimam a posição do rotor utilizando técnicas de back-EMF (força eletromotriz reversa). Estes controladores são menos dispendiosos e mais robustos, pois eliminam a necessidade de sensores adicionais. No entanto, sua implementação de controle *sensorless* utilizando a detecção de pontos de cruzamento zero da back-EMF, pode ser mais complexa e menos precisa em baixas velocidades (KRISHNAMOORTHY; PARAKKAT KESAVA PANIKKAR, 2022).

Na Figura 3, apresenta-se um diagrama eletrônico genérico de um controlador de motor *brushless*. Este esquema inclui componentes-chave como os Transistores de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (MOSFETs), que são utilizados para acionar o inversor trifásico, proporcionando uma gestão eficaz da energia elétrica ao motor. Os drives são dispositivos responsáveis pelo acionamento desses MOSFETs, garantindo que operem em sincronia e com a precisão necessária para um controle eficiente. Adicionalmente, o sistema conta com um microcontrolador (MCU) que, por meio de algoritmos específicos, coordena todas as ações dos drives e dos MOSFETs, ajustando a velocidade e o torque do motor com base nos dados recebidos dos sensores de posição Hall. Estes sensores são fundamentais para o feedback preciso da posição do rotor, essencial para o controle de motores *brushless* (TEXAS INSTRUMENTS, 2022a).

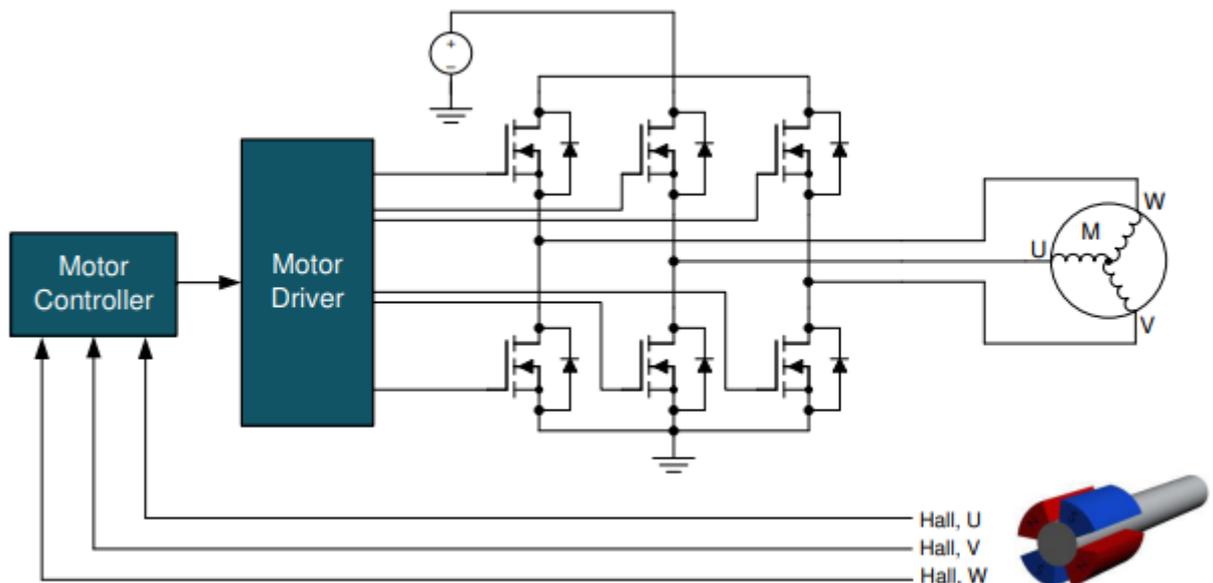


Figura 3 - Esquema eletrônico de um controlador de motor *brushless*.
Fonte: Texas Instruments, 2022a.

3.3 Sensores de Efeito Hall

O sensor Hall ilustrado na Figura 4 é usado para detectar a posição do rotor em motores *brushless* DC, como detalhado por Gomes (2018). Esses sensores geram sinais elétricos em resposta à alteração dos campos magnéticos causados pela rotação do rotor. Esses sinais são então interpretados pelo microcontrolador para determinar a posição exata do rotor. Isso permite que o sistema de controle ajuste adequadamente a sequência de acionamento dos MOSFETs, otimizando o desempenho do motor em termos de eficiência e resposta dinâmica.



Figura 4 – Sensor de efeito hall
Fonte: Gomes, 2018.

3.4 Elementos de comutação

Elementos de comutação são componentes essenciais em circuitos eletrônicos que controlam o fluxo de corrente, alternando entre estados de condução e não condução. Esses elementos são fundamentais em diversas aplicações, incluindo conversores de energia, controle de motores e sistemas de transmissão de potência. Optou-se por utilizar MOSFETs devido à sua eficiência e confiabilidade em aplicações de alta potência (TEXAS INSTRUMENTS, 2018).

Os MOSFETs funcionam aplicando uma tensão no terminal de *gate*, que controla a condutividade entre os terminais de *drain* e *source*. Quando uma tensão suficiente é aplicada ao *gate*, cria-se um canal de condução que efetivamente curto-circuita o *drain* ao *source*, permitindo a passagem de corrente. Esta característica os torna ideais para comutação rápida e eficiente, crucial no acionamento do inversor trifásico em controladores de motores *brushless*. Utilizou-se MOSFETs de potência para garantir um acionamento preciso do inversor. Na Figura 5, é apresentada uma ilustração detalhada de um componente MOSFET, mostrando suas conexões e funcionamento básico.

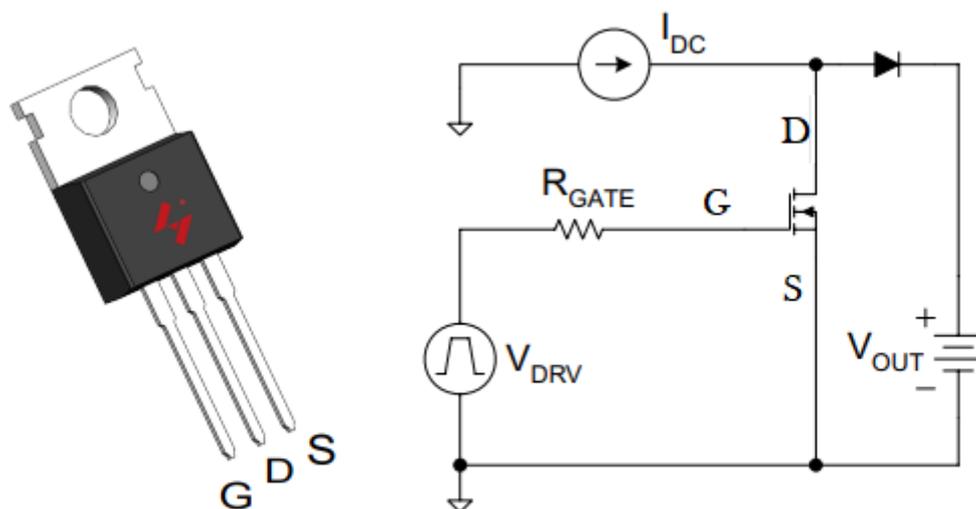


Figura 5 – Mosfet de Potência
 Fonte: Texas Instruments, 2018.

Também é importante ressaltar os diferentes tipos de comutação das bobinas do motor. O acionamento trapezoidal, por exemplo, é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e custo reduzido. No entanto, pode causar maior ondulação de torque, resultando em um funcionamento mais áspero. Gomes (2018) realizou experimentos utilizando controle trapezoidal em motores *brushless* com sensores Hall.

Por outro lado, o acionamento senoidal aplica uma forma de onda senoidal às fases do motor, resultando em um torque mais constante e operação suave. Este método é preferido em aplicações que requerem alta precisão e baixo ruído. Drzymala; Gęca (2021) discutem um controlador de onda senoidal *sensorless* para motores *brushless*, empregando uma compensação automática de ângulo de avanço para otimizar o desempenho do motor em diversas condições de carga e velocidade.

Diante das especificidades dos motores *brushless* utilizados em bicicletas elétricas, foco deste trabalho, e devido ao fato deles já possuírem sensores Hall embutidos, optou-se por desenvolver dois tipos de controladores: o controlador de acionamento trapezoidal e o controlador de acionamento senoidal. Inicialmente, foi desenvolvido o controlador de acionamento trapezoidal devido à sua simplicidade e baixo custo, permitindo a obtenção de resultados preliminares sobre o desempenho e a eficiência do motor. Em seguida, foi desenvolvido o controlador de acionamento senoidal, visando uma operação mais suave e eficiente. A coleta de resultados

para ambos os métodos permitiu uma análise comparativa detalhada entre as formas de acionamento, auxiliando na escolha do controlador mais adequado para otimizar o desempenho das bicicletas elétricas.

3.5 Estudo de acionamento

No estudo sobre o controle de motores *brushless*, a técnica de Modulação por Largura de Pulso (PWM) desempenha um papel essencial, permitindo ajustar a tensão média fornecida às fases do motor variando a duração dos pulsos de alta tensão em um ciclo de trabalho. Este método é crucial para controlar a velocidade e o torque do motor, adaptando-se às variadas demandas de carga (GOMES, 2018). Em uma configuração de *half-bridge*, uma entre as três que formam o inversor trifásico de um motor *brushless*, a PWM é empregada para controlar dois MOSFETs em série. Gomes (2018) destaca que cada MOSFET é acionado alternadamente, conectando a carga ora ao suprimento de alta tensão ora ao terra, gerando uma tensão que varia de zero ao máximo valor, permitindo que cada fase do motor receba uma onda de tensão controlada precisamente em amplitude, facilitando o controle vetorial do motor.

O processo de acionamento dos drivers que controlam os MOSFETs é crítico e requer precisão para prevenir falhas e maximizar a eficiência. Os drivers interpretam os sinais de PWM provenientes do microcontrolador e funcionam como intermediários, amplificando o sinal e fornecendo a energia necessária para o acionamento eficiente dos MOSFETs. A integridade e a precisão desses sinais são essenciais para a performance e eficiência do motor *brushless* (GOMES, 2018).

O PWM é uma técnica eficaz para controlar a tensão em cada fase de um motor, conforme descrito por Gomes (2018). Alterando a largura dos pulsos dentro de um ciclo constante, a PWM ajusta a tensão média aplicada, permitindo controle refinado sobre a velocidade e o torque do motor. Esse método facilita o ajuste da performance do motor de acordo com as exigências de carga, sem necessidade de componentes adicionais para a modulação da tensão. Na Figura 6, apresenta-se um exemplo prático de (PWM) e sua função equivalente, onde se observa a relação entre o *duty cycle* e a tensão média fornecida ao circuito. À medida que o *duty cycle* do sinal PWM aumenta, também se eleva a tensão média aplicada, demonstrando visualmente como o controle de PWM pode ajustar a energia entregue ao motor de forma precisa. Este gráfico ilustra claramente como a variação do *duty cycle* influencia diretamente a tensão média, fundamentando o princípio de operação de sistemas de controle em motores *brushless*.

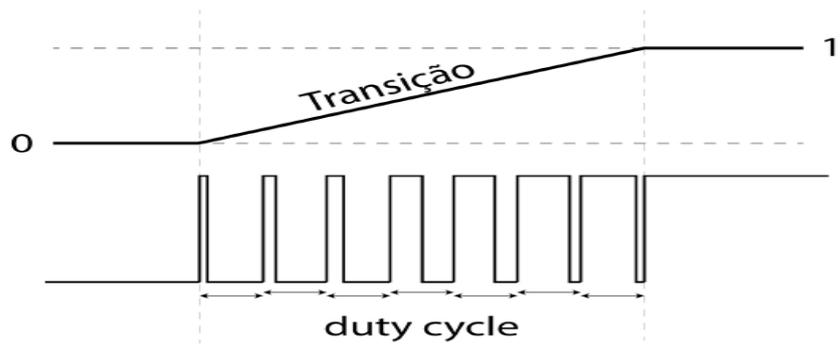


Figura 6 - Representação de PWM e a relação com a tensão média
Fonte: Gomes, 2018

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Métodos de acionamento

Abordando o acionamento trapezoidal, que segmenta as posições do motor em seis estados, detectados pelos sensores Hall. Conforme descrito por Gomes (2018), o microcontrolador coordena este processo enviando sinais PWM correspondentes a cada estado para os drivers, que então acionam os MOSFETs responsáveis por cada fase do motor. A Figura 7 ilustra o diagrama elétrico, mostrando as conexões de ponto como S1 até S6, que representam os sinais para acionar cada MOSFET, e os pontos a, b e c, indicando as tensões enviadas para cada fase do motor. Já na Figura 8, têm-se os sinais de acionamento dos MOSFET em relação a cada estado do motor.

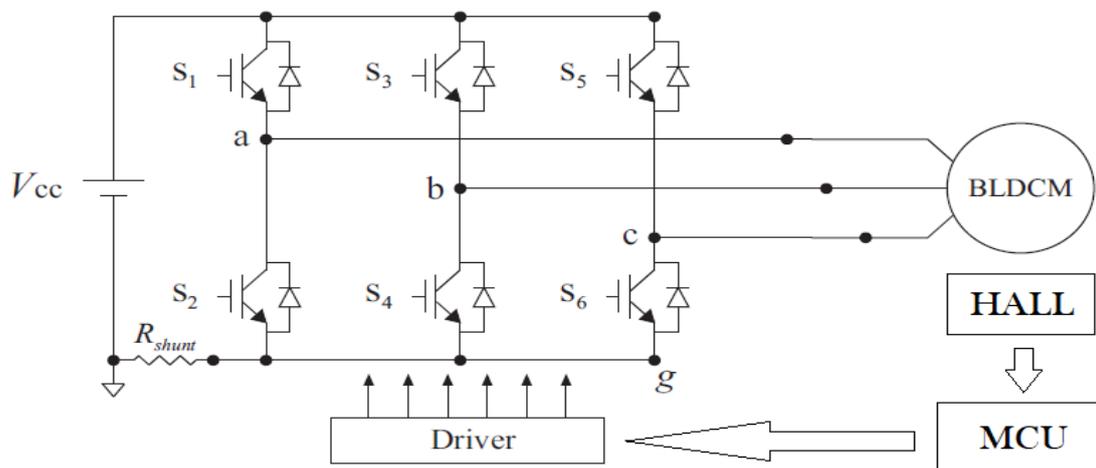


Figura 7 – Esquema elétrico de Mosfets acionadores

Fonte: Gomes, 2018

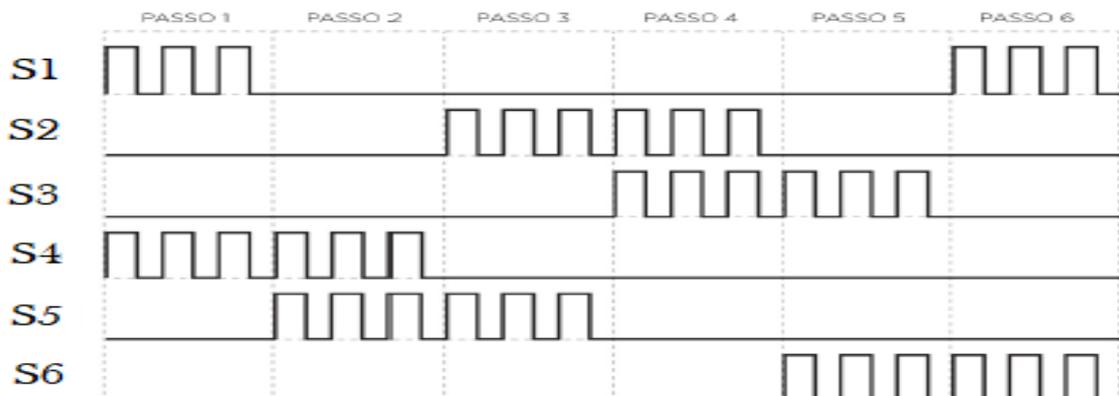


Figura 8 – Sinais de acionamento em cada estado do motor

Fonte: Gomes, 2018

Conforme os MOSFETs são acionados em sequência, eles alternam a alimentação nas fases do motor, criando um campo magnético rotativo que induz o movimento do rotor. O motor possui, tipicamente, seis estados de comutação que correspondem à sequência de ativação das fases, garantindo que o rotor se mova de forma controlada e eficiente. Cada um desses estados representa uma configuração específica de campos magnéticos que impulsionam o rotor a se mover em um padrão previsível e repetitivo, essencial para a operação suave e precisa do motor. Essa dinâmica é fundamental para a performance dos motores *brushless*, permitindo um controle preciso sobre a velocidade e a posição do rotor (GOMES, 2018).

A Figura 9 ilustra detalhadamente cada um dos seis estados de comutação em um motor *brushless*, mostrando como as diferentes ativações dos MOSFETs impactam o campo magnético e, conseqüentemente, a posição do rotor. Este diagrama é crucial para entender como as variações nas comutações dos MOSFETs geram movimentos específicos no rotor, seguindo a sequência de comutação que otimiza a eficiência e o controle do motor. Cada estado, representado na figura, corresponde a uma configuração específica que direciona o campo magnético para impulsionar o rotor de maneira eficaz e precisa, facilitando o entendimento do funcionamento dinâmico e interativo entre os componentes eletrônicos e mecânicos do motor *brushless*.

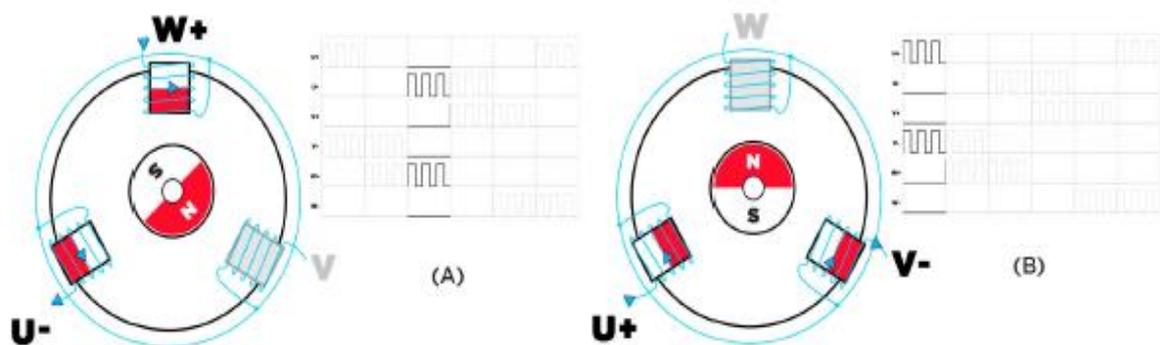


Figura 9 – Polarização das bobinas com base no acionamento dos Mosfets
Fonte: Gomes, 2018

4.2 Dimensionamento de componentes

O dimensionamento adequado de MOSFETs em aplicações de controle de motores *brushless* é fundamental para garantir eficiência e confiabilidade. A seleção do MOSFET deve considerar as perdas por efeito Joule, que são significantes principalmente sob altas correntes. A escolha deve focar em MOSFETs com baixa resistência em condução para minimizar estas perdas térmicas. Além disso, é essencial considerar o desempenho térmico do MOSFET, garantindo que o dispositivo possa dissipar o calor gerado sem exceder sua temperatura máxima operacional. A correta especificação dos parâmetros elétricos e térmicos, incluindo a tensão máxima, corrente contínua e intermitente, e a capacidade de dissipação de calor, são críticos para o desempenho otimizado e seguro do motor. Para uma discussão detalhada sobre a seleção e dimensionamento de MOSFETs para essas aplicações, recomenda-se a consulta ao documento da Texas Instruments (TEXAS INSTRUMENTS, 2018).

Para o projeto do controlador de motor *brushless*, optou-se pelo transistor MOSFET IRF1407, considerando sua capacidade de suportar tensões até 48 V, provenientes da bateria, e correntes de até 30 A nas fases do motor. Esse dimensionamento oferece uma margem de segurança adequada, dado que o motor pode exigir correntes de até 50 A. A escolha do IRF1407, portanto, alinha-se com os requisitos de tensão e corrente do sistema, garantindo eficiência e segurança operacional.

Os drivers acionadores de MOSFET são componentes essenciais para a operação eficiente de transistores de potência em circuitos de comutação. Esses drivers são responsáveis por fornecer os sinais de controle necessários para ativar e desativar os MOSFETs de forma precisa e rápida. Em configurações de ponte H, por exemplo, o acionamento dos MOSFETs da parte de baixo é relativamente simples, pois a tensão de *gate* pode ser referenciada diretamente ao potencial terra. No entanto, o acionamento dos MOSFETs da parte de cima, que está flutuando em relação ao terra, requer uma técnica especial conhecida como *bootstrap*. Segundo a Texas Instruments, na nota de aplicação AN-6076, o método *bootstrap* utiliza um capacitor conectado entre a saída do driver e a fonte do MOSFET de alta, que é carregado durante o estado de condução do MOSFET de baixa. Quando o MOSFET de alta é ativado, o capacitor *bootstrap* fornece a tensão necessária para elevar o *gate* acima do potencial do dreno, permitindo que o MOSFET conduza adequadamente. Esta técnica é fundamental para assegurar uma operação eficiente e confiável de drivers de MOSFET em aplicações de alta potência e alta frequência (TEXAS INSTRUMENTS, 2018).

Para o acionamento eficiente de MOSFETs usando a configuração *half-bridge*, são necessários alguns componentes essenciais: o capacitor de *bootstrap*, que fornece a tensão necessária para o *gate* do MOSFET superior; os resistores de *gate*, que controlam a velocidade de comutação e reduzem oscilações; e o diodo de *bootstrap*, que permite a carga do capacitor *bootstrap* e bloqueia sua descarga, garantindo a operação correta. Esses componentes trabalham juntos para assegurar a comutação precisa e eficiente dos MOSFETs. (TEXAS INSTRUMENTS, 2018).

A Figura 10 ilustra a representação de um circuito integrado de drive para MOSFETs, destacando a pinagem do dispositivo. Nesse circuito, os pinos de entrada *LIN* e *HIN* recebem os sinais PWM provenientes do microcontrolador. Esses sinais PWM são complementares, pois não se pode acionar o MOSFET superior e o inferior simultaneamente, o que geraria um curto-circuito entre os dois MOSFETs. Quando o sinal *HIN* está alto, o driver aciona o MOSFET superior (pino *HO*), permitindo a condução da corrente. Da mesma forma, quando o sinal *LIN* está alto, o driver aciona o MOSFET inferior (pino *LO*), completando o ciclo de comutação. Esse controle permite a operação eficiente da *half-bridge*, gerenciando de forma precisa a comutação dos MOSFETs de alta e baixa.

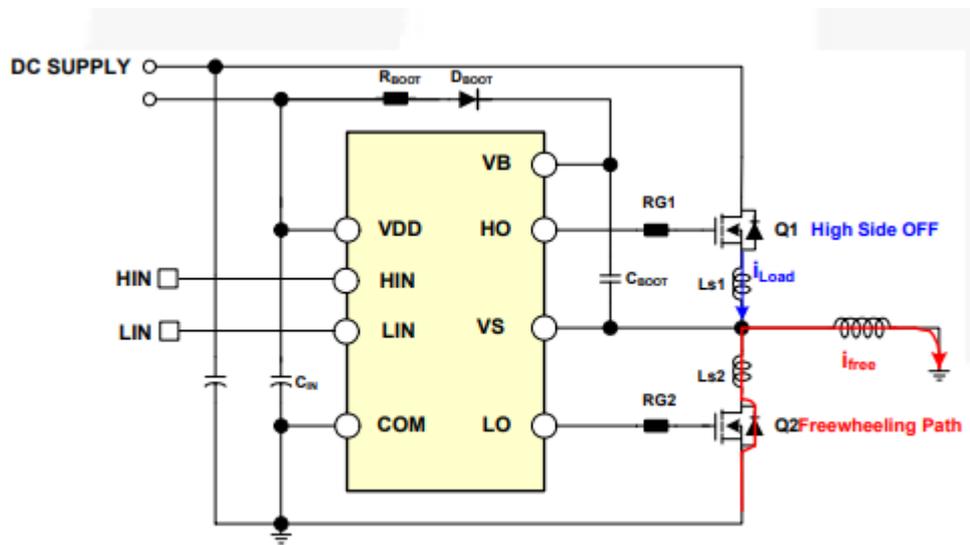


Figura 10 – Circuito Driver de acionamento Mosfet.
Fonte: Texas Instruments, 2018

4.3 Controlador com onda Trapezoidal

O método de acionamento trapezoidal para motores *brushless* desenvolvido neste trabalho utiliza sensores Hall para detectar a posição do rotor, permitindo a definição precisa dos pontos de comutação das fases do motor. Este método consiste em seis posições distintas, identificadas pelos sensores Hall, que determinam a sequência de acionamento das fases do motor (GOMES, 2018).

Na posição 1, a fase A é acionada com um sinal PWM, enquanto a fase C é conectada ao GND, e a fase B permanece em estado flutuante (alta impedância), ou seja, nem o MOSFET da parte alta nem o MOSFET da parte baixa da *half-bridge* correspondente são acionados.

A sequência de acionamento para cada uma das seis posições detectadas pelos sensores Hall segue o padrão descrito na Tabela 1. Para cada estado, uma fase é chaveada com PWM, outra fase é conectada ao GND, e a terceira fase é mantida em estado flutuante. Essa alternância é realizada de maneira cíclica, permitindo que o motor seja acionado de forma eficiente (GOMES, 2018).

Tabela 1 - Sequência de acionamento das fases do motor *brushless*.

Posição	Fase A	Fase B	Fase C
1	PWM	Flutuante	GND
2	PWM	GND	Flutuante
3	Flutuante	GND	PWM
4	GND	Flutuante	PWM
5	GND	PWM	Flutuante
6	Flutuante	PWM	GND

Com base na modelagem matemática descrita por Baratieri (2024), foram desenvolvidas equações para o cálculo dos parâmetros e variáveis que influenciam o comportamento dos motores BLDC. O motor em questão é trifásico, com três enrolamentos conectados em configuração "Y".

A Equação 1 representa a modelagem do motor. Essas matrizes foram implementadas em uma planilha no Excel, que foi configurada para receber uma base de dados com os sinais de entrada. A planilha permite calcular as correntes em cada fase do motor, bem como o torque gerado em cada uma. Para validar a precisão da modelagem dinâmica desenvolvida no Excel, foram

utilizados softwares de simulação elétrica, como o LTspice. Os resultados obtidos nas simulações confirmaram os valores gerados pela planilha.

A planilha foi projetada para simular diferentes tipos de acionamento do motor, possibilitando a análise teórica do comportamento dinâmico e do torque resultante em cada fase do motor. Dessa forma, é possível prever o desempenho do sistema em condições variadas de operação, o que contribui significativamente para o processo de otimização do motor BLDC.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a(\theta) \\ e_b(\theta) \\ e_c(\theta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Em que:

- v_a, v_b, v_c : são as tensões aplicadas em cada fase do motor (A, B e C), em volts.
- i_a, i_b, i_c : são as correntes elétricas que passam pelos enrolamentos das fases (A, B e C), em amperes.
- L : é a indutância própria de cada fase, em henry.
- M : Indutância mútua entre as fases, em henry.
- R : Resistência dos enrolamentos do motor, em ohms.
- θ_r : é a posição angular do rotor, em radianos.
- $e_a(\theta_r), e_b(\theta_r), e_c(\theta_r)$: são as tensões contra eletromotrizes gerada em cada fase, que é função da posição angular do rotor, em volts.

A Figura 11 apresenta o acionamento trapezoidal nas fases do motor, utilizado para analisar a resposta teórica do motor sob essa forma de acionamento. Essa análise considera que as tensões contra-eletromotrizes geradas pelo motor são senoidais, uma vez que todos os motores abordados neste estudo possuem tensão senoidal, sendo especialmente projetados para aplicações em bicicletas elétricas.

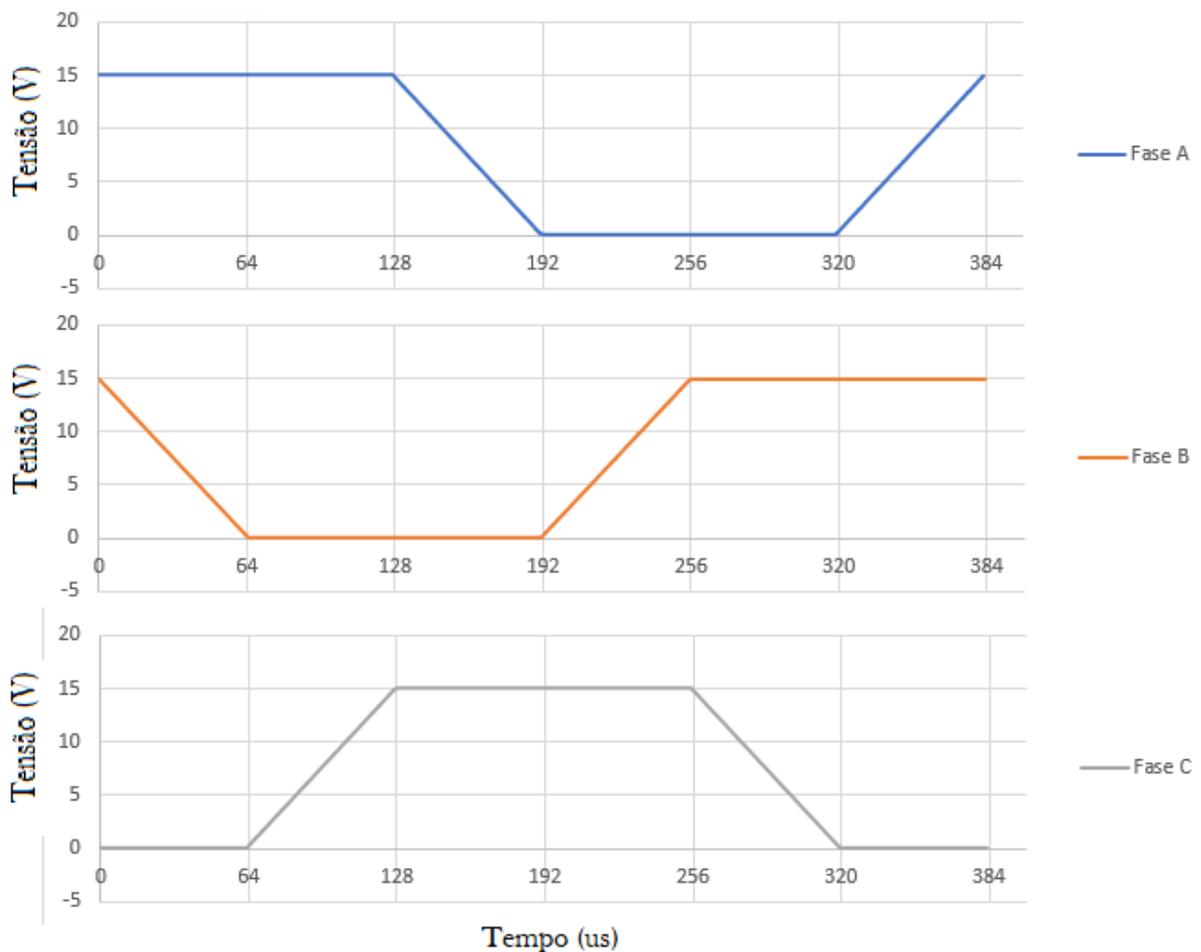


Figura 11 – Representação do Excel de ondas Trapezoidais.

Com a aplicação desse tipo de forma de onda em um motor em movimento, são geradas as correntes trifásicas mostradas na Figura 12. A partir dessas correntes, é possível calcular o torque gerado em cada fase. Conforme descrito por Baratieri (2024), o torque em cada enrolamento é obtido pela multiplicação da corrente da fase por uma constante e pela posição angular do rotor em relação àquela bobina.

O resultado dessa análise indica que o torque resultante apresenta uma oscilação significativa. Essa oscilação é uma das principais desvantagens do método de acionamento trapezoidal, pois gera vibrações no motor, ruído e redução da eficiência.

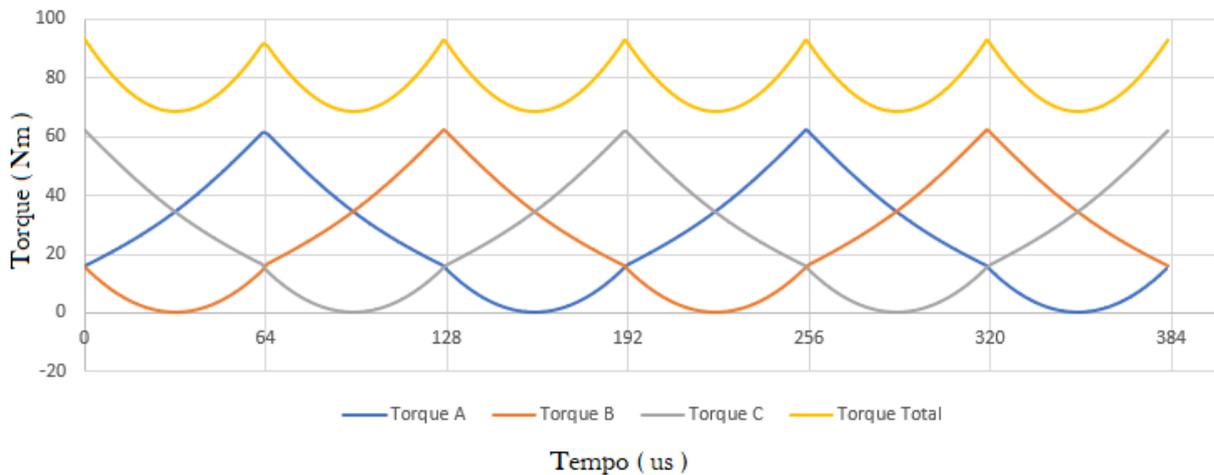


Figura 12 – Resultado de Torque com acionamento Trapezoidal.

4.4 Controlador com onda Senoidal

O método de acionamento senoidal para motores *brushless* visa melhorar a eficiência e reduzir ruídos e ondulações de torque, problemas frequentemente associados ao acionamento trapezoidal. Diferente do controle trapezoidal, que divide a rotação do motor em seis estados discretos, o controle senoidal utiliza uma divisão contínua da posição angular do rotor, permitindo um controle mais preciso.

No desenvolvimento do controlador senoidal, utilizam-se sensores Hall para detectar a posição do rotor. Porém, ao invés de apenas seis estados discretos, a posição é subdividida em múltiplos estados angulares. Dessa forma, três senoides defasadas em 120° são aplicadas às fases do motor. Para criar essas senoides, varia-se o PWM de acordo com uma função senoidal. Embora os sensores Hall continuem fornecendo a posição discretizada em seis estados, a velocidade do motor é calculada detectando o tempo de transição entre esses estados. Com essa informação, ajusta-se a frequência das senoides para corresponder à velocidade do motor, proporcionando um controle suave e eficiente.

A literatura destaca diversas vantagens do acionamento senoidal para motores *brushless*. Drzymala e Gęca (2021) apontam que o controle senoidal reduz significativamente as ondulações de torque e o ruído acústico, proporcionando uma operação mais suave do motor. Além disso, a abordagem descrita por DigiKey (2021) sugere que, embora o controle senoidal seja complexo, sua implementação pode ser facilitada pelo uso de kits de desenvolvimento de motores e drivers integrados, que combinam controle PWM e eletrônica de potência em um único chip. Bacancy Systems (2021) reforça que o controle senoidal elimina as ondulações de

torque presentes no controle trapezoidal e oferece uma operação mais eficiente e menos ruidosa. Este método é especialmente útil em motores síncronos de ímã permanente (PMSM), mas também pode ser aplicado em motores BLDC devido à forma senoidal da força eletromotriz de retorno suavizada pela indutância do motor.

A implementação do controle senoidal descrita neste trabalho demonstra uma abordagem prática e eficiente para o acionamento de motores *brushless*, evidenciando as melhorias em termos de suavidade e eficiência operacional em comparação com o controle trapezoidal tradicional. Esse método aproveita a detecção da posição do rotor através de sensores Hall e ajusta dinamicamente as senoides aplicadas às fases do motor, baseado na velocidade do rotor. A técnica resulta em uma operação mais suave e eficiente, minimizando ruídos e ondulações de torque, conforme suportado pela literatura existente.

Portanto, o método de acionamento senoidal desenvolvido neste trabalho, ao utilizar uma abordagem de divisão contínua da posição angular do rotor e variação do PWM conforme uma função senoidal, se mostra uma solução eficaz para o controle de motores *brushless*, oferecendo significativas vantagens em termos de eficiência e redução de ruídos em comparação aos métodos tradicionais de acionamento trapezoidal.

A Figura 13, retirada do trabalho de Drzymała e Gęca (2021), ilustra como, mesmo com sensores Hall fornecendo uma posição discretizada em seis estados, é possível, através do cálculo da velocidade do motor, definir a posição do rotor em vários passos, permitindo o envio de uma tensão senoidal às fases do motor. O sinal de corrente (na cor verde) mostra o resultado desse método, onde se observa uma corrente quase senoidal nas fases do motor. Quanto mais senoidal for a corrente, menor será o ruído e maior a eficiência do motor.

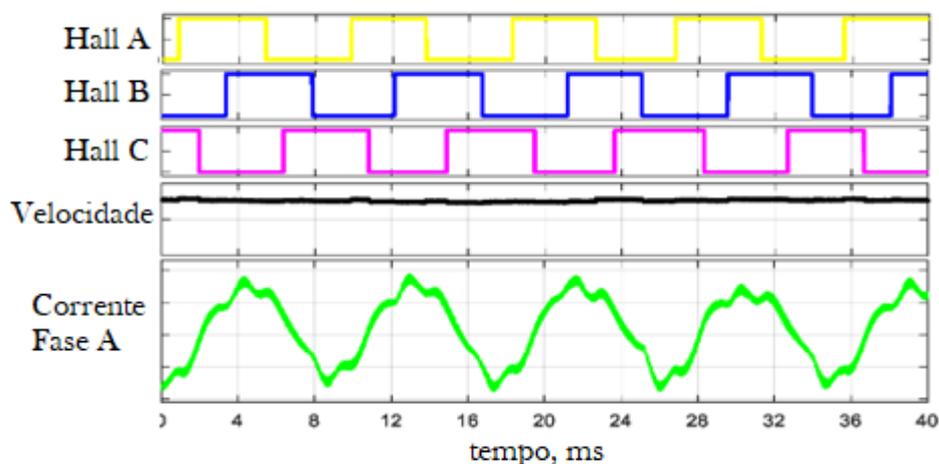


Figura 13 – Resultados de Drzymała e Gęca com acionamento senoidal.
Fonte: adaptado de Drzymała e Gęca, 2021

Na Figura 14, foi utilizado o mesmo modelo desenvolvido na planilha Excel, porém, desta vez aplicando uma forma de onda senoidal nas fases do motor para analisar a resposta em torque. A Figura 15 mostra que essa resposta foi significativamente melhor, com o torque total apresentando oscilações mínimas. Isso confirma que o acionamento senoidal gera menos ruído e vibração, resultando em uma maior eficiência.

É importante destacar que essa modelagem é teórica. Na prática, as ondas senoidais não são completamente perfeitas, mas podem atingir resultados muito próximos do ponto ideal, conforme observado na simulação.

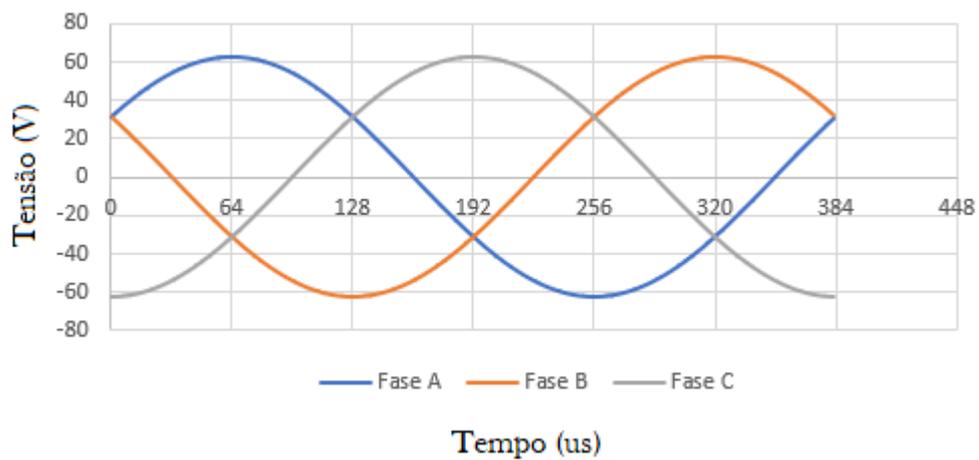


Figura 14 – Tensões senoidais aplicadas no motor.

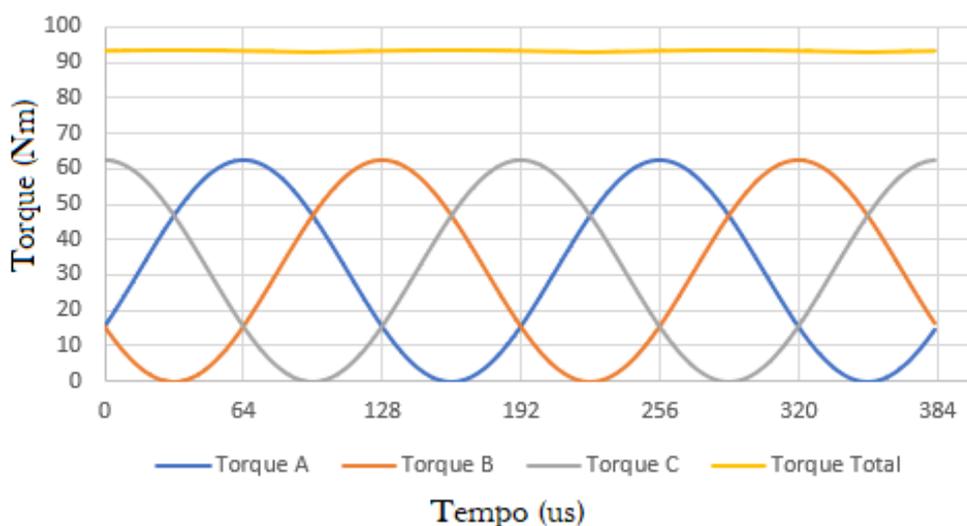


Figura 15 – Torque resultante com tensões senoidais.

4.5 Algoritmo para acionamento senoidal

O controle do motor *brushless* foi implementado utilizando o microcontrolador PIC18F47Q84, um dispositivo de 8 bits com frequência de operação de 64 MHz, que conta com periféricos essenciais como conversores analógico-digital (ADC) e PWM trifásico. O algoritmo de acionamento do motor baseia-se na leitura dos sinais dos sensores Hall, responsáveis por fornecer a posição angular do rotor. A partir dessas informações, o microcontrolador identifica a posição exata do motor e calcula a velocidade de rotação.

O acionamento do motor é realizado por meio de modulação por largura de pulso (PWM) com forma de onda senoidal. Para garantir que a forma de onda seja aplicada corretamente, o algoritmo utiliza um buffer de dados que armazena os valores da senoide, dividido em mil pontos. A cada mudança de estado dos sensores Hall, que são capazes de discriminar a posição do rotor em seis estados distintos, o microcontrolador força o ponteiro do buffer a apontar para um desses seis pontos predefinidos, que são divididos em intervalos de mil dividido por seis.

Além disso, o algoritmo configura um temporizador (timer) que, a cada vez que estoura, avança o ponteiro do buffer para o próximo valor, garantindo que todos os pontos da senoide sejam preenchidos de forma suave e contínua. Assim, o movimento não depende unicamente das mudanças de estado dos sensores Hall, mas é complementado pelo avanço regular proporcionado pelo timer. Essa abordagem permite que o motor execute uma rotação uniforme, seguindo a forma de onda senoidal armazenada no buffer.

Dessa maneira, o sistema consegue ajustar o acionamento do motor *brushless* com precisão, assegurando que a modulação PWM siga a curva senoidal desejada, o que é fundamental para obter um desempenho eficiente e reduzir vibrações indesejadas.

4.6 Desenvolvimento de Hardware

Foi desenvolvida uma placa de circuito impresso com o objetivo de concretizar a teoria apresentada. É importante ressaltar que esse circuito deve atender a todos os requisitos previamente discutidos, incluindo a seção de potência, que utiliza MOSFETs de potência, a seção de acionamento, que incorpora drivers para controle dos MOSFETs, e a seção de controle, que inclui o microcontrolador e seus componentes adjacentes, como resistores e capacitores.

Na Figura 16, é apresentado o esquemático completo da placa eletrônica, que integra todos os aspectos abordados anteriormente. Cabe destacar que, neste esquemático, o foco está exclusivamente no circuito de acionamento do motor, omitindo-se as seções relacionadas à

comunicação da placa com o ambiente e aos circuitos de alimentação. Esta escolha se deve ao fato de que o objetivo principal deste trabalho é o estudo do acionamento de motores brushless, razão pela qual as outras partes foram omitidas.

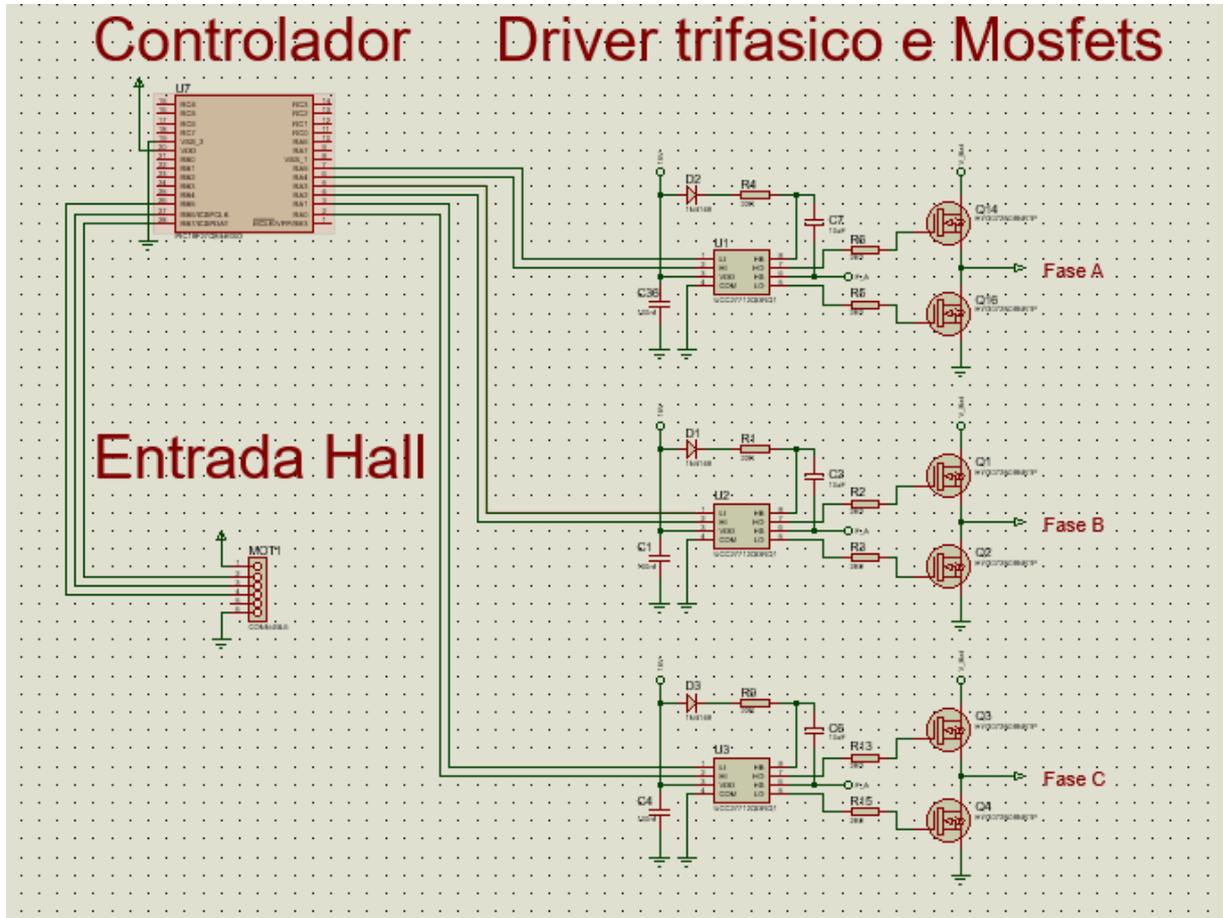


Figura 16 – Esquemático da placa eletrônico

5 RESULTADOS

Após a conclusão do estudo teórico e o desenvolvimento da placa de circuito impresso, esta foi produzida por uma empresa especializada, que recebeu o projeto e fabricou a placa conforme o esquemático fornecido. Posteriormente, a placa foi alimentada adequadamente com uma bateria de lítio e instalada em uma bicicleta convencional, convertendo-a em uma bicicleta elétrica. A Figura 17 apresenta a placa desenvolvida, enquanto a Figura 18 ilustra a bicicleta com todo o sistema instalado, este sistema consiste em componentes como o motor *brushless* acoplado a roda, a caixa da bateria, a eletrônica instalada junto ao quadro da bicicleta e acessórios como acelerador e display para informações.



Figura 17 – Placa de circuito impresso antes da soldagem de componentes



Figura 18 – Bicicleta finalizada

Para avaliar se os resultados obtidos são satisfatórios, foi implementado um circuito de medição na placa eletrônica, composto por sensores de corrente em cada fase do motor. Esses sensores medem a corrente e enviam um sinal de tensão correspondente ao microcontrolador, que realiza a leitura por meio de seu conversor analógico-digital (ADC) e armazena os valores lidos em sua memória. Quando a placa recebe o comando para iniciar a gravação dos dados de corrente, acionado por um botão na bicicleta, o sistema passa a detectar a corrente 10 mil vezes por segundo, salvando esses valores para posterior análise. Esses dados podem ser lidos através de um cabo conectado à placa.

Este método de detecção da qualidade do controle é semelhante ao descrito por Drzymała e Gęca (2021), que também utilizam a medição da corrente de fase para avaliar a eficácia do controle. Para que o controle seja considerado eficiente, as correntes de fase devem apresentar uma forma de onda o mais senoidal possível, com mínimo ruído, e essas senoides devem estar perfeitamente alinhadas com a posição do rotor, conforme indicado pelos sensores Hall.

Os resultados obtidos, apresentados na Figura 19, demonstram a precisão do controlador senoidal desenvolvido. As correntes medidas em cada fase do motor estão muito próximas de uma forma senoidal, conforme ilustrado no gráfico, indicando a eficácia do controle implementado.

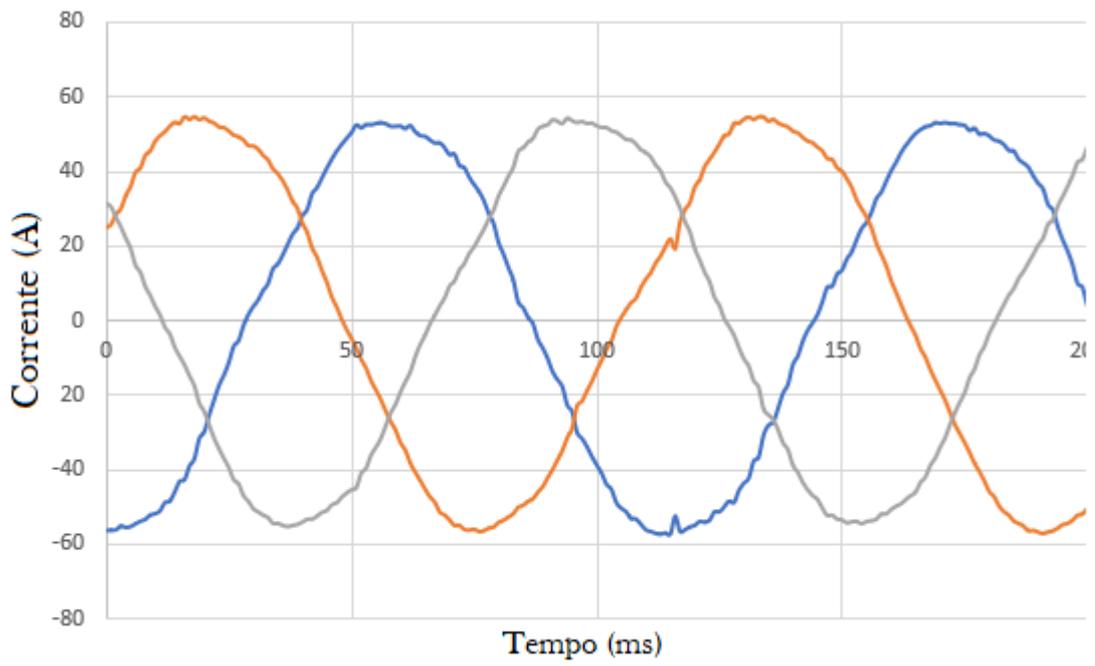


Figura 19 – Resultados obtidos de corrente de acionamento das fases do Motor.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo detalhado sobre o acionamento de motores *brushless* utilizando controladores trapezoidais e senoidais, com ênfase na implementação prática de um controlador senoidal em um motor *brushless* aplicado a uma bicicleta elétrica. A partir da revisão da literatura, foi possível entender a evolução e as vantagens dos motores *brushless* em relação aos motores escovados, destacando-se a eficiência, a durabilidade e a capacidade de controle eletrônico que esses motores proporcionam.

Na fundamentação teórica, foram explorados os diferentes tipos de motores *brushless*, suas configurações (inrunner e outrunner), e a importância dos sensores de efeito Hall e dos elementos de comutação, como os MOSFETs. Esses componentes se mostraram cruciais para o funcionamento eficiente do sistema, especialmente no contexto do controle de motores em aplicações que requerem alta precisão e desempenho.

Durante o desenvolvimento do projeto, foi realizada a comparação entre os métodos de acionamento trapezoidal e senoidal. O controlador trapezoidal, apesar de sua simplicidade, mostrou-se limitado em termos de suavidade e eficiência, apresentando ruídos e ondulações de torque. Em contrapartida, o controlador senoidal, desenvolvido com base na leitura precisa dos sinais dos sensores Hall e na aplicação de funções senoidais através do PWM trifásico, demonstrou uma performance superior, proporcionando um controle mais suave e eficiente do motor.

O algoritmo de acionamento senoidal, implementado no microcontrolador PIC18F47Q84, foi capaz de detectar a posição angular do rotor e ajustar a frequência das senoides conforme a velocidade do motor, resultando em um controle preciso e adaptativo. A implementação de um circuito de medição de corrente em cada fase do motor permitiu a avaliação dos resultados, que indicaram a eficácia do controlador desenvolvido.

Os resultados experimentais confirmaram a precisão do controlador senoidal, com as correntes medidas em cada fase do motor muito próximas de uma forma senoidal ideal, alinhadas com as posições detectadas pelos sensores Hall. Esses resultados validam a abordagem proposta e demonstram que o sistema desenvolvido atende às expectativas de controle eficiente e preciso, sendo uma solução viável para aplicações em veículos elétricos, como bicicletas, onde a eficiência e a suavidade de operação são essenciais.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o controlador senoidal desenvolvido neste trabalho oferece uma alternativa promissora em relação aos métodos tradicionais, mostrando-se eficaz para o controle de motores *brushless* em aplicações que exigem precisão, eficiência

energética e confiabilidade. Embora os resultados sejam encorajadores, reconhece-se que este é apenas um passo inicial, e que há espaço para melhorias e aprofundamento em pesquisas futuras. Este trabalho busca contribuir para o avanço das tecnologias de controle de motores elétricos, oferecendo uma base que pode ser útil para desenvolvimentos e estudos posteriores na área.

7 REFERÊNCIAS

GERAE, S.; MOHAMMADBAGHERPOOR, H.; SHAFIEI, M.; VALIZADEHDEH, M.; MONTAZERI, F.; FEYZI, M. R. A modified DTC with capability of regenerative braking energy in BLDC driven electric vehicles using adaptive control theory. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017.

GAMAZO-REAL, J. C.; VAZQUEZ-SANCHEZ, E.; GOMEZ-GIL, J. Position and speed control of brushless DC motors using sensorless techniques and application trends. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024.

WASUNTAPICHAIKUL, P.; SUKVICHAI, K.; TIPSUWAN, Y. Implementation of torque controller for brushless motors on the omni-directional wheeled mobile robot. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2017.

DASANAYAKE, N.; PERERA, S. Motor state prediction and friction compensation for brushless DC motor drives using data-driven techniques. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023.

MOHAMED, S. A. S.; HAGHBAYAN, M.-H.; MIELE, A.; MUTLU, O.; PLOSILA, J. Energy-efficient mobile robot control via run-time monitoring of environmental complexity and computing workload. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021.

BARATIERI, Cássio Luciano. Controle de velocidade sensorless de motores brushless DC submetidos a variações periódicas de carga. *Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia*. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS, 2024.

SMITH, J. History of AC motor design. *Electric Machines & Drives Journal*, 2001.

JONES, A. Applications of induction motors. *Journal of Electrical Engineering*, 1998.

TAYLOR, R. Synchronous motors: operation and applications. *Power Electronics Journal*, 2005.

BROWN, L. DC motors in modern industry. *Industrial Motor Review*, 1999.

MILLER, T. Brush maintenance in DC motors. *Electric Machinery and Power Systems Journal*, 2003.

WHITE, S. Advancements in brushless DC motors for automotive applications. *Automotive Engineering Journal*, 2010.

NGUYEN, D. Brushless motors in urban mobility solutions. *Urban Mobility Systems Journal*, 2017.

BAIGRIE, B. Electricity and magnetism: a historical perspective. *Cambridge: Cambridge University Press*, 2006.

ARULKUMAR, K.; HEMALATHA, N.; VYSHNAVI, T. D.; GANGARAJU, C.; VAMSI, G. Analysis of brushless DC motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023.

GILL, A. S. The electronic theory of magnetism. *Journal of Applied Physics*, 1964.

KRISHNAMOORTHY, B.; PARAKKAT KESAVA PANIKKAR, K. Brushless direct current motor analysis and controller design. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals. *Application Report*, 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. Understanding MOSFET datasheets: switching parameters. 2018. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/an/slpa009a/slpa009a.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2024.

GOMES, Matheus Ervilha. *Sistema embarcado para controle de motores brushless DC sensored e sensorless para veículos portáteis de transporte individual*. 2018. 155 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia da Computação) — Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Ciência da Computação, Brasília, 2018.

BACANCY SYSTEMS. Differentiating trapezoidal & sinusoidal BLDC motors. Disponível em: <https://www.bacancytechnology.com/blog/differentiating-trapezoidal-sinusoidal-blcdc-motors>. Acesso em: 11 jul. 2024.

DRZYMAŁA, B.; GEÇA, J. Sinusoidal control of a brushless DC motor with misalignment of hall sensors. *Energies*, 2021.

DIGIKEY. Why and how to control brushless DC motors. 2021. Disponível em: <https://www.digikey.com/en/articles/why-and-how-to-control-brushless-dc-motors>. Acesso em: 11 jul. 2024.

