

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

YGOR BARCELOS GIURADELLI

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DA RELUTÂNCIA EM UM POLO EXCITADO  
EM ALTA FREQUÊNCIA.

Joinville  
2025

YGOR BARCELOS GIURADELLI

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DA RELUTÂNCIA EM UM POLO EXCITADO  
EM ALTA FREQUÊNCIA.

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica, no Curso de Engenharia Mecatrônica, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina

Orientador: Dr. Dalton Luiz Rech Vidor

Joinville  
2025

## RESUMO

A crescente demanda por sistemas motrizes mais eficientes impulsiona o desenvolvimento de tecnologias que permitem aprimorar o desempenho de máquinas elétricas sem recorrer a materiais de alto custo. Investiga-se experimentalmente o efeito da relutância, no qual um polo é excitado em alta frequência (acima de 20 kHz) a fim de gerar um campo magnético alternado capaz de produzir forças mensuráveis no entreferro. Para essa análise, foi desenvolvida uma planta experimental composta por um conjunto núcleo–bobina, um sistema de acionamento baseado em ponte H com alta taxa de comutação e um arranjo mecânico equipado com uma célula de carga para a medição das forças resultantes. Ensaio foram conduzidos variando a frequência de excitação, o número de espiras e o afastamento mecânico entre as partes magnéticas. Os resultados obtidos evidenciam o surgimento de componentes de força no sentido do campo magnético e na direção de redução da relutância magnética, avaliando a viabilidade do conceito e estabelecendo alguns parâmetros construtivos relevantes para estudos futuros voltados à implementação de máquinas de relutância excitadas em alta frequência.

**Palavras-chave:** Efeito da relutância; Modulação em alta frequência; Campo magnético alternado

## **ABSTRACT**

The growing demand for more efficient drive systems drives the development of technologies that enable improved performance of electric machines without relying on high-cost materials. The reluctance effect is experimentally investigated, in which a pole is excited at high frequency (above 20 kHz) in order to generate an alternating magnetic field capable of producing measurable forces in the air gap. For this analysis, an experimental setup was developed consisting of a core–coil assembly, a drive system based on an H-bridge with a high switching rate, and a mechanical arrangement equipped with a load cell for measuring the resulting forces. Tests were conducted by varying the excitation frequency, the number of turns, and the mechanical spacing between the magnetic parts. The results obtained show the emergence of force components in the sense of the magnetic field and in the direction of reduction of magnetic reluctance, assessing the feasibility of the concept and establishing some construction parameters relevant for future studies aimed at the implementation of reluctance machines excited at high frequency.

**Keywords:** Reluctance effect; High-frequency modulation; Alternating magnetic field

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação gráfica do campo magnético. . . . .	13
Figura 2 – Visualização do campo magnético com limalha de ferro. . . . .	13
Figura 3 – Campo magnético gerado por solenóides. . . . .	13
Figura 4 – Curvas (MxH) de materiais (a) diamagnéticos, (b) paramagnéticos, (b) antiferromagnéticos, (c) ferromagnéticos e (c) ferrimagnéticos . .	16
Figura 5 – Curva de magnetização e ciclo de histerese. . . . .	16
Figura 6 – Ilustração da corrente de Foucault. . . . .	19
Figura 7 – Torção de condutores paralelos para redução do efeito pelicular. . .	21
Figura 8 – Circuito magnético simples. . . . .	21
Figura 9 – Bobinas e núcleo de ferrite. . . . .	27
Figura 10 – Esquemático detalhado do sistema de acionamento e aquisição. . .	29
Figura 11 – Design PCI. . . . .	31
Figura 12 – Fresagem. . . . .	31
Figura 13 – PCI. . . . .	32
Figura 14 – Tempo morto entre a inversão de polaridade da carga. . . . .	33
Figura 15 – Máquina de estados implementada. . . . .	37
Figura 16 – Comunicação entre IHM, arduino e PCI operando. . . . .	39
Figura 17 – Método de fixação. . . . .	41
Figura 18 – Acoplamento mecânico da célula de carga. . . . .	42
Figura 19 – Conjunto mecânico para ensaios longitudinais. . . . .	43
Figura 20 – Conjunto mecânico para ensaios transversais. . . . .	44
Figura 21 – Ambiente de teste. . . . .	45
Figura 22 – Montagem para teste transversal com deslocamento de 7,5 mm. . .	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros medidos da bobina de 5 espiras. . . . .	27
Tabela 2 – Parâmetros medidos da bobina de 10 espiras. . . . .	28
Tabela 3 – Parâmetros medidos da bobina de 15 espiras. . . . .	28
Tabela 4 – Elementos do circuito apresentado. . . . .	30
Tabela 5 – Principais características elétricas e dinâmicas do driver IR2110. . .	32
Tabela 6 – Portas do driver IR2110 e comportamento funcional. . . . .	33
Tabela 7 – Resultados experimentais para a condição de bobina não acionada com entreferro de 0,0 mm. . . . .	48
Tabela 8 – Resultados experimentais para a bobina de 5 espiras excitada com frequência de 20 kHz. . . . .	48
Tabela 9 – Resultados experimentais para a bobina de 5 espiras excitada com frequência de 40 kHz. . . . .	48
Tabela 10 – Resultados experimentais para a bobina de 5 espiras excitada com frequência de 60 kHz. . . . .	49
Tabela 11 – Resultados experimentais para 10 espiras excitada com frequência de 20 kHz. . . . .	49
Tabela 12 – Resultados experimentais para 10 espiras excitada com frequência de 40 kHz. . . . .	49
Tabela 13 – Resultados experimentais para 10 espiras excitada com frequência de 60 kHz. . . . .	49
Tabela 14 – Resultados experimentais para 15 espiras excitada com frequência de 20 kHz. . . . .	49
Tabela 15 – Resultados experimentais para 15 espiras excitada com frequência de 40 kHz. . . . .	50
Tabela 16 – Resultados experimentais para 15 espiras excitada com frequência de 60 kHz. . . . .	50
Tabela 17 – Valores medidos para diferentes frequências, entreferro e espiras .	50

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>9</b>
1.1	OBJETIVOS . . . . .	10
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b> . . . . .	<b>10</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b> . . . . .	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>12</b>
2.1	FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS . . . . .	12
2.1.1	<b>Campo, dipolos e materiais magnéticos</b> . . . . .	<b>12</b>
2.1.2	<b>Materiais ferromagnéticos.</b> . . . . .	<b>14</b>
2.1.3	<b>Materiais ferrimagnéticos.</b> . . . . .	<b>14</b>
2.1.4	<b>Suscetibilidade, saturação, remanência e histerese magnética</b> .	<b>15</b>
2.2	COMPORTAMENTO ELETROMAGNÉTICO EM CIRCUITOS E BOBINAS . . . . .	17
2.2.1	<b>Indutância e relutância magnética</b> . . . . .	<b>17</b>
2.2.2	<b>Correntes de Foucault</b> . . . . .	<b>18</b>
2.2.3	<b>Impedância, reatância e efeito pelicular.</b> . . . . .	<b>19</b>
2.3	CIRCUITOS MAGNÉTICOS. . . . .	21
<b>3</b>	<b>MÉTODO</b> . . . . .	<b>23</b>
3.1	RECURSOS UTILIZADOS. . . . .	23
3.1.1	<b>Recursos de software</b> . . . . .	<b>23</b>
3.1.2	<b>Recursos de eletrônica</b> . . . . .	<b>25</b>
3.1.3	<b>Recursos de manufatura</b> . . . . .	<b>25</b>
3.2	ELEMENTOS ELETROMAGNÉTICOS . . . . .	26
3.3	HARDWARE . . . . .	28
3.3.1	<b>Problema de leitura com carga aplicada.</b> . . . . .	<b>34</b>
3.4	FIRMWARE. . . . .	34
3.4.1	<b>Código implementado no arduino para aquisição de força complementar.</b> . . . . .	<b>39</b>
3.5	RECURSOS MECÂNICOS. . . . .	39
3.5.1	<b>Estratégias de Fixação Mecânica</b> . . . . .	<b>40</b>
3.5.2	<b>Acoplamento Mecânico à Célula de Carga.</b> . . . . .	<b>41</b>
3.5.3	<b>Planta Longitudinal para Medição da Força Vertical.</b> . . . . .	<b>42</b>
3.5.4	<b>Planta Transversal para Medição da Força Lateral.</b> . . . . .	<b>43</b>
3.5.5	<b>Materiais e Processo de Impressão 3D.</b> . . . . .	<b>44</b>

3.6	AMBIENTE DE TESTE. . . . .	45
3.6.1	<b>Procedimento para coleta dos dados . . . . .</b>	<b>45</b>
3.6.2	<b>Plano de ensaios. . . . .</b>	<b>46</b>
4	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>48</b>
5	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>53</b>
A	<b>APÊNDICE . . . . .</b>	<b>54</b>
.1	CÓDIGO FONTE DO STM32F103C8T6 . . . . .	54
.2	CÓDIGO FONTE DO ARDUINO . . . . .	68

## 1 INTRODUÇÃO

O cenário industrial e energético global tem sido marcado por uma tendência crescente de eletrificação dos sistemas motrizes, impulsionada pela necessidade de aumentar a eficiência energética e reduzir as emissões de dióxido de carbono associadas ao uso de combustíveis fósseis. A transformação é sustentada por políticas governamentais de combate às mudanças climáticas, que incentivam a adoção de tecnologias limpas e sustentáveis (Rosenberger N.; Rosner, 2024). A viabilidade de uma matriz de transporte e produção predominantemente elétrica depende diretamente de avanços tecnológicos tanto nos acumuladores de energia elétrica, capazes de armazenar e disponibilizar grandes quantidades de energia de forma eficiente, quanto nos sistemas motrizes elétricos, cujo desempenho, confiabilidade e eficiência devem acompanhar as crescentes demandas por sustentabilidade e competitividade industrial.

Os motores elétricos desempenham um papel fundamental na conversão eletromecânica de energia e, de maneira geral, classificam-se em motores de corrente contínua (CC) e motores de corrente alternada (CA). Os motores CC caracterizam-se pelo controle direto de torque e velocidade, mediante a variação da tensão de armadura e do campo magnético, apresentando uma resposta dinâmica rápida. Os motores de corrente alternada (CA) subdividem-se em máquinas síncronas e assíncronas. Nas máquinas assíncronas, também denominadas de indução, o campo girante do estator induz correntes no rotor, produzindo torque sem a necessidade de excitação externa, o que confere robustez e ampla difusão no setor industrial. As máquinas síncronas operam a uma velocidade igual à frequência do campo girante (Umans, 2014). Os motores de relutância, cujo princípio de funcionamento baseia-se na tendência do fluxo magnético de percorrer o caminho de menor relutância magnética, destacam-se pela simplicidade construtiva, possibilidade de não usar ímãs permanentes e potencial para alta eficiência quando associados a técnicas modernas de excitação e controle. Em virtude dessas características, os motores de relutância representam uma alternativa promissora para o aprimoramento da conversão eletromecânica de energia (Boldea I.; Tutelea, 2019).

Os motores de relutância comutada (SRM) representam uma das alternativas para aplicações de alta velocidade, impulsionadas pelos avanços recentes na eletrônica de potência, no controle digital e em sensores de precisão. Embora apresentem uma construção simples e robusta (sem ímãs permanentes e com rotor de baixo custo), seu desempenho, historicamente, foi limitado por desafios eletrônicos, especialmente relacionados à detecção de posição e ao chaveamento em altas frequências. No entanto, o desenvolvimento de circuitos de controle de alta comutação, sensores

ópticos e métodos sensoriais sofisticados, aliados ao uso de semicondutores de banda larga, como SiC e GaN, têm permitido operar SRMs em faixas superiores a 100.000 rpm, alcançando, inclusive, projetos conceituais acima de 1.000.000 rpm. A evolução das técnicas de modulação, dos conversores trifásicos de alta densidade de potência e das estratégias de controle em tempo real possibilita compensar as irregularidades de torque e minimizar as perdas associadas ao efeito pelicular e à histerese magnética (Araujo R. E; Camacho, 2020).

O foco das pesquisas em motores de relutância comutada tem se concentrado na melhoria de sua densidade de torque e na mitigação das ondulações inerentes ao chaveamento entre polos. Esse chaveamento, responsável pela característica pulsante do torque eletromagnético, tem sido objeto de intensa investigação, tanto sob o ponto de vista do controle quanto do projeto eletromecânico. Entre as abordagens estruturais mais promissoras, destacam-se as configurações, nas quais o rotor e/ou o estator são segmentados em seções defasadas angularmente. Essa técnica permite uma sobreposição de fases que suaviza o perfil de torque e reduz significativamente as vibrações e o ruído acústico, mantendo elevada eficiência energética (Lan Y.; Benomar, 2021). A integração dessas arquiteturas com estratégias de controle avançado e modulação de corrente em alta frequência tem possibilitado um desempenho superior em aplicações de tração elétrica, consolidando o SRM como uma alternativa competitiva em relação aos motores síncronos de ímã permanente.

As pesquisas sobre motores de relutância têm se expandido para além do aperfeiçoamento do chaveamento entre polos, passando a incluir otimizações geométricas de estatores e rotores, bem como o desenvolvimento de configurações híbridas que combinam características de diferentes topologias, como no caso do motor síncrono de relutância assistido por ímãs permanentes (IPM-SRM), empregado em veículos da Tesla, como o Model 3 e o Model Y (Rosenberger N.; Rosner, 2024). Propõe-se, portanto, um novo conceito que poderá ser empregado em motores de relutância chaveados em alta frequência, mas com chaveamento realizado dentro do mesmo polo. Tal abordagem visa gerar um campo magnético rotativo resultante da modulação da largura de pulso (PWM) aplicada aos polos, de modo a reduzir as ondulações de torque e explorar regimes de operação em frequências superiores a 20 kHz.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Indicar a viabilidade da geração de força por fenômeno de relutância com polos excitados em alta frequência.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Validar o acionamento de um polo eletromagnético com um circuito de topologia ponte completa (ponte H), acionado em alta frequência.
- Apontar a existência de forças longitudinais e transversais;
- Avaliar alguns parâmetros construtivos que intensificam a força gerada entre os componentes mecânicos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considerando a necessidade de encontrar soluções para a conversão energética mais eficiente, apresenta-se uma variação de motores de relutância, a fim de identificar sua viabilidade para futuros estudos de desempenho em relação a outros tipos de máquinas elétricas. Sendo assim, são apresentados os princípios físicos considerados para a construção do sistema e a definição dos elementos utilizados no dispositivo proposto para a validação da técnica.

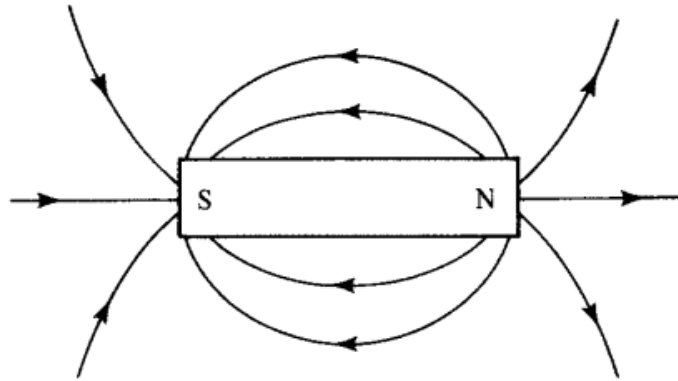
### 2.1 FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS

O estudo dos fenômenos eletromagnéticos constitui a base para a compreensão do comportamento de materiais e dispositivos que interagem com campos elétricos e magnéticos. Esses fenômenos decorrem da relação intrínseca entre eletricidade e magnetismo, expressa pelas leis fundamentais de Biot–Savart, Ampère e Faraday, que descrevem como correntes elétricas e variações de campo geram campos magnéticos e elétricos mutuamente acoplados. A partir desses princípios, é possível compreender a formação de polos magnéticos, o comportamento de dipolos e a resposta de diferentes materiais à aplicação de campos externos.

#### 2.1.1 Campo, dipolos e materiais magnéticos

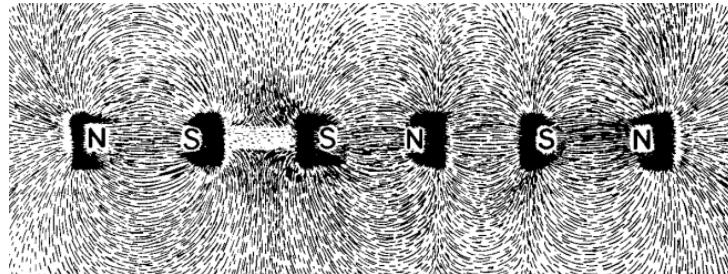
Os ímãs permanentes possuem regiões chamadas polos, norte e sul, localizadas em suas extremidades. Polos de mesmo nome se repelem, e polos de nomes opostos se atraem. Historicamente, John Michell (1750) e Charles Coulomb (1785) formularam a lei da força magnética entre polos, que estabelece que a força  $F$  entre dois polos é proporcional ao produto de suas intensidades e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. Um polo magnético gera um campo magnético  $H$ , e a força sobre outro polo é proporcional a esse campo. O campo magnético também pode ser descrito em termos de linhas de força, um conceito introduzido por Michael Faraday (1791–1867). Essas linhas emergem do polo norte e retornam ao polo sul, representando a direção e o sentido do vetor  $H$ , destacado na Figura 1. A densidade dessas linhas expressa a intensidade do campo. A visualização experimental das linhas de campo pode ser obtida ao espalhar limalha de ferro sobre uma placa colocada acima do ímã, conforme exemplificado na Figura 2. Assim, o campo magnético é uma manifestação contínua e vetorial da interação entre os polos, cuja intensidade decresce com o quadrado da distância e cuja direção segue as linhas de força que conectam os polos norte e sul (CULLITY B. D.; GRAHAM, 2009).

Figura 1 – Representação gráfica do campo magnético.



Fonte: (Nussenzveig, 1997)

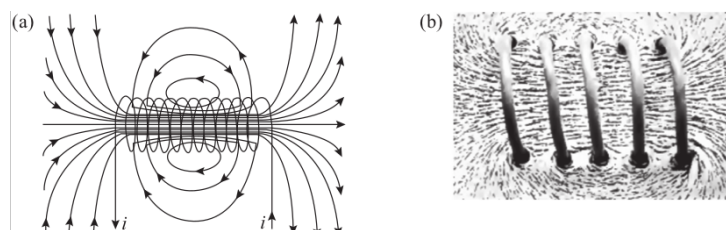
Figura 2 – Visualização do campo magnético com limalha de ferro.



Fonte: (CULLITY B. D.; GRAHAM, 2009)

A partir da lei de Biot–Savart e da lei de Ampère, demonstra-se que toda corrente elétrica em um condutor gera um campo magnético ao seu redor. Segundo a Lei de Biot–Savart, cada elemento de corrente contribui com um campo magnético que é proporcional à intensidade da corrente e inversamente proporcional ao quadrado da distância. Já a lei de Ampère estabelece que a circulação do campo magnético ao redor de um percurso fechado é proporcional à corrente total que o atravessa. Assim, quando a corrente percorre um enrolamento com varias espiras, o campo resultante assemelha-se ao de um dipolo magnético, apresentando polos norte e sul bem definidos. No caso de uma bobina (ou solenóide), a superposição dos campos gerados por cada espira reforça o campo no interior da bobina e o torna semelhante ao de um ímã permanente, como exemplificado na Figura 3(Nussenzveig, 1997).

Figura 3 – Campo magnético gerado por solenóides.



Fonte: (Nussenzveig, 1997)

Assim, o comportamento físico das bobinas elétricas, descrito quantitativamente pelas leis de Biot–Savart e de Ampère, torna possível a operação das máquinas elétricas. A formação de campos magnéticos controláveis, resultante da circulação de corrente em espiras condutoras, permite produzir forças, torques e fluxos dirigidos, constituindo o princípio fundamental da conversão eletromecânica de energia. Por essa razão, bobinas estão presentes em todas as máquinas elétricas, desde motores e geradores até transformadores e atuadores, viabilizando o controle do campo magnético interno e, conseqüentemente, o funcionamento eficiente desses dispositivos(Umans, 2014).

### **2.1.2 Materiais ferromagnéticos.**

O ferromagnetismo distingue-se dos demais fenômenos magnéticos pela elevada magnetização de saturação e pela forma como um material alcança esse estado a partir da condição desmagnetizada. Em metais como ferro, cobalto e níquel, a magnetização de saturação pode ocorrer sob campos relativamente fracos, evidenciando um alinhamento coletivo dos momentos magnéticos atômicos. A hipótese do campo molecular proposta por Pierre Weiss, em 1906, explicou esse comportamento ao introduzir o conceito de um campo interno proporcional à magnetização, que atua no mesmo sentido do campo aplicado, reforçando-o. Essa ideia permitiu compreender a relação entre a temperatura de Curie e a intensidade das interações internas responsáveis pela ordenação magnética(CULLITY B. D.; GRAHAM, 2009).

Abaixo da temperatura de Curie, Weiss postulou que um ferromagneto apresenta magnetização espontânea, ou seja, permanece magnetizado mesmo na ausência de campo externo. Contudo, essa teoria exigiu um complemento para explicar a existência de materiais aparentemente desmagnetizados. Para isso, Weiss propôs que os ferromagnetos são compostos por pequenas regiões denominadas domínios, cada uma magnetizada à saturação, mas orientada em direções distintas, resultando em magnetização líquida nula no estado global. Assim, o processo de magnetização não consiste em aumentar a magnitude da magnetização, mas em reorientar os domínios na direção do campo aplicado(CULLITY B. D.; GRAHAM, 2009).

### **2.1.3 Materiais ferrimagnéticos.**

Os materiais ferrimagnéticos são aqueles em que os momentos magnéticos dos átomos ou íons se organizam em sub-redes antiparalelas com magnitudes desiguais, podendo resultar em uma magnetização líquida diferente de zero. Esse comportamento ocorre devido a interações de troca que favorecem o alinhamento oposto dos spins entre diferentes sítios cristalinos. Um exemplo de material ferrimagnético são as soluções sólidas intersticiais de ferrita, uma importante classe de óxidos magnéticos com fórmula

geral  $MO \cdot Fe_2O_3$ , onde M é um cátion bivalente, como Zn, Ni, Co, Cu, Mg ou Mn. As ferritas apresentam estrutura de espinélio, composta por sítios tetraédricos (A) e octaédricos (B), nos quais os spins das sub-redes A e B estão alinhados paralelamente dentro de cada grupo, mas de forma antiparalela entre si. Como as interações de troca entre essas sub-redes têm intensidades diferentes, surge uma magnetização resultante parcial, tornando as ferrites amplamente utilizadas em núcleos de transformadores e dispositivos de alta frequência (Kittel, 2005).

Substâncias ferrimagnéticas apresentam uma magnetização significativa à temperatura ambiente, de modo semelhante aos materiais ferromagnéticos, o que as torna de grande relevância tecnológica e industrial. Assim como os ferromagnetos, elas são constituídas por domínios magneticamente saturados e manifestam os fenômenos de saturação e histerese. Entretanto, essa magnetização desaparece acima de uma temperatura crítica (temperatura de Curie), a partir da qual o material passa a exibir comportamento paramagnético (CULLITY B. D.; GRAHAM, 2009).

As ferritas são materiais cerâmicos formados por compostos de óxidos metálicos que, devido à sua alta resistividade elétrica, minimizam as perdas por correntes de Foucault e, portanto, são ideais para aplicações em altas frequências. Elas são produzidas por técnicas cerâmicas convencionais, nas quais óxidos metálicos como NiO e  $Fe_2O_3$  são misturados, prensados e sinterizados a temperaturas superiores a 1200 °C, resultando em um material duro, frágil e semicondutor. Suas propriedades magnéticas derivam essencialmente dos íons metálicos presentes em sua estrutura iônica, sendo que o oxigênio ( $O^{2-}$ ) não contribui para a magnetização. A orientação dos spins desses íons segue a regra de Hund, segundo a qual os elétrons em orbitais parcialmente preenchidos se organizam de forma a maximizar o desequilíbrio de spins, respeitando o princípio da exclusão de Pauli. Essa configuração eletrônica é a responsável pelos momentos magnéticos que conferem às ferritas suas características ferrimagnéticas (CULLITY B. D.; GRAHAM, 2009).

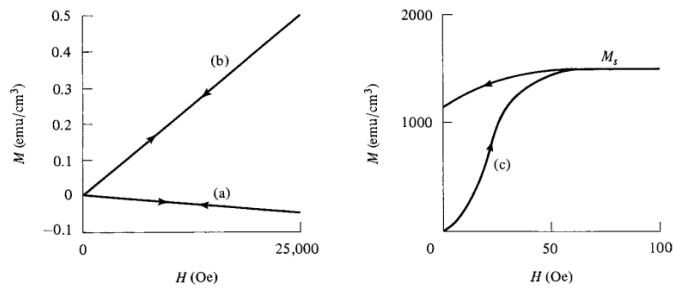
#### **2.1.4 Suscetibilidade, saturação, remanência e histerese magnética**

As propriedades magnéticas de um material dependem não apenas da intensidade e do sinal da magnetização  $\mathbf{M}$ , mas também da forma como  $\mathbf{M}$  varia em função do campo magnético aplicado  $\mathbf{H}$ . A razão entre essas duas grandezas é chamada de suscetibilidade magnética  $X$ . A magnetização  $\mathbf{M}$  representa o momento magnético por unidade de volume de um material; isto é, a densidade de dipolos magnéticos induzidos ou permanentes em seu interior (CULLITY B. D.; GRAHAM, 2009).

As curvas típicas de magnetização ( $M \times H$ ), Figura 4, mostram que materiais diamagnéticos, paramagnéticos e antiferromagnéticos apresentam comportamento linear; ou seja,  $\mathbf{M}$  varia proporcionalmente a  $\mathbf{H}$  e desaparece quando o campo

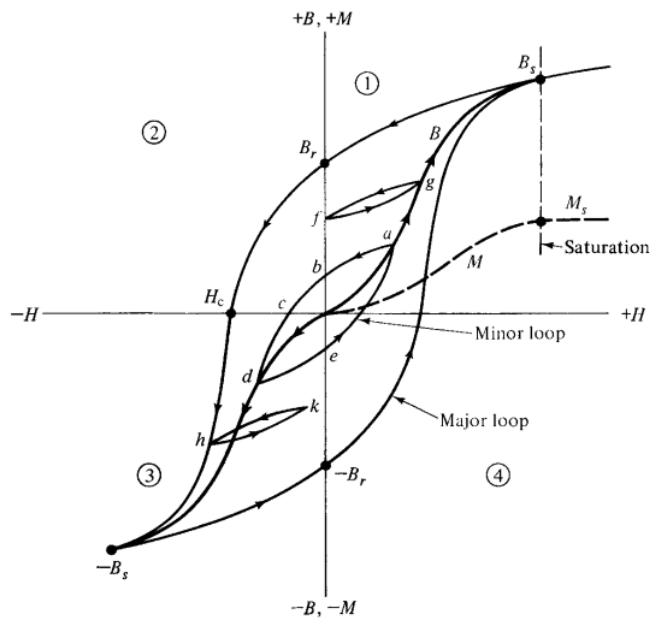
é removido. Já nos ferromagnetos e ferrimagnéticos, a curva é não linear e a susceptibilidade  $X_s$  varia com  $H$ , atingindo um valor máximo. Dois fenômenos importantes ocorrem nesses materiais não lineares: saturação e histerese. A saturação ocorre quando  $H$  é suficientemente grande para  $M$  atingir um valor máximo constante  $M_s$ . A histerese (Figura 5), por sua vez, manifesta-se por meio de uma curva cíclica de magnetização e desmagnetização, caracterizada pela magnetização residual que permanece mesmo após a remoção do campo magnético que a originou (CULLITY B. D.; GRAHAM, 2009).

Figura 4 – Curvas (MxH) de materiais (a) diamagnéticos, (b) paramagnéticos, (b) antiferromagnéticos, (c) ferromagnéticos e (c) ferrimagnéticos



Fonte: (CULLITY B. D.; GRAHAM, 2009)

Figura 5 – Curva de magnetização e ciclo de histerese.



Fonte: (CULLITY B. D.; GRAHAM, 2009)

Os materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos apresentam comportamentos

distintos quanto à facilidade de magnetização, característica que define se são magneticamente moles ou duros. Nos materiais moles, a saturação magnética é alcançada sob a ação de um campo relativamente pequeno, o que indica alta permeabilidade e facilidade para alinhar os domínios magnéticos. Já os materiais duros exigem campos muito mais intensos para atingir a saturação, evidenciando uma forte resistência à magnetização e à desmagnetização. Essa resistência se reflete também na remanência (representada pelo ponto  $B_r$  da curva de histerese da Figura 5), isto é, a magnetização residual que permanece mesmo após a remoção do campo externo. A remanência representa a capacidade do material de reter parte do alinhamento magnético induzido, sendo, portanto, um parâmetro fundamental para distinguir entre materiais destinados à fabricação de ímãs permanentes (altamente remanentes) e aqueles voltados para aplicações eletromagnéticas reversíveis (baixa remanência) (CULLITY B. D.; GRAHAM, 2009).

## 2.2 COMPORTAMENTO ELETROMAGNÉTICO EM CIRCUITOS E BOBINAS

O comportamento eletromagnético em circuitos e bobinas está diretamente relacionado à interação entre correntes elétricas e os campos magnéticos que elas geram. Essa relação dinâmica fundamenta fenômenos essenciais como a indutância, a relutância e a impedância, que descrevem, respectivamente, a razão do fluxo concatenado pela corrente que o atravessa, a oposição à variação do fluxo e a resistência à passagem de corrente alternada (Nussenzveig, 1997). A compreensão desses efeitos é indispensável para a análise e o projeto de sistemas elétricos e magnéticos, especialmente em aplicações que envolvem altas frequências, nas quais surgem fenômenos adicionais como o efeito pelicular (skin effect) (Pyrhönen J.; Jokinen, 2008).

### 2.2.1 Indutância e relutância magnética

A indutância depende tanto das propriedades do material magnético quanto da geometria do circuito e é medida em henry (H). Esse parâmetro descreve o comportamento intrínseco de uma bobina em gerar fluxo quando excitada por uma corrente elétrica (Pyrhönen J.; Jokinen, 2008).

Em um circuito magnético com permeabilidade constante ou entreferro dominante, a relação entre fluxo concatenado e corrente é linear, permitindo expressar a indutância em função da relutância (Umans, 2014):

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad (1)$$

A relutância magnética é a oposição que um circuito magnético oferece à passagem do fluxo magnético, análoga à resistência elétrica em um circuito elétrico.

Ela depende do comprimento  $l$  do caminho percorrido pelo fluxo, da permeabilidade magnética  $\mu$  do material e da área da seção transversal  $S$ , sendo expressa por (Umans, 2014):

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}. \quad (2)$$

A relutância determina a relação entre a força magnetomotriz ( $F_{mm}$ ) e o fluxo magnético  $\Phi$ , conforme (Umans, 2014):

$$F_{mm} = \mathcal{R}\Phi. \quad (3)$$

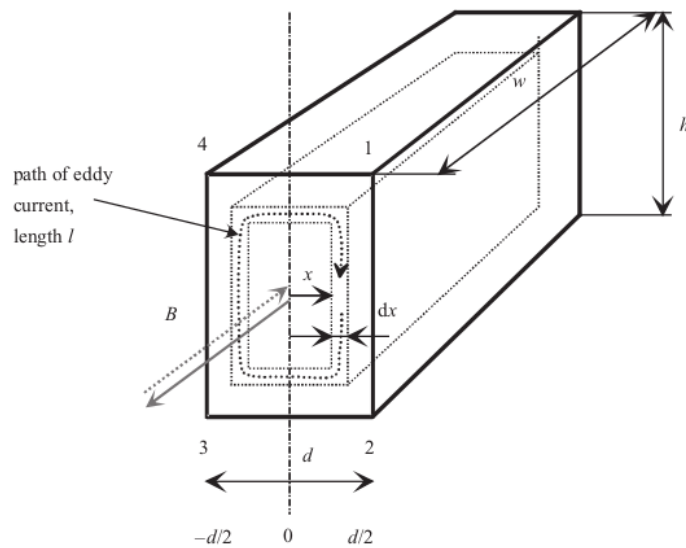
Quando há um entreferro no circuito, a relutância aumenta significativamente, pois o ar apresenta uma permeabilidade muito menor do que a dos materiais magnéticos em geral. Assim, a maior parte da relutância total concentra-se nesse entreferro, influenciando diretamente a intensidade do campo magnético e o desempenho de dispositivos como eletroímãs e transformadores. Além disso, para que a aproximação  $\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}$  seja válida, é necessário que  $l^2 < S$ , garantindo que o fluxo se distribua de forma uniforme pela seção transversal do material (Nussenzveig, 1997).

A autoindutância constitui um parâmetro fundamental na caracterização de sistemas eletromecânicos, pois influencia diretamente o comportamento elétrico, ao determinar a resposta da corrente às variações de tensão; o comportamento eletromagnético, ao expressar a capacidade do circuito de armazenar e transferir energia no campo magnético; e o comportamento mecânico, ao interagir com forças e torques gerados em dispositivos como motores e atuadores eletromagnéticos.

### 2.2.2 Correntes de Foucault

As correntes de Foucault, também chamadas de correntes parasitas, são correntes elétricas induzidas em materiais condutores quando estes são submetidos a um fluxo magnético variável no tempo (Umans, 2014). De acordo com a lei de Faraday, qualquer variação do fluxo magnético através de uma superfície condutora cria uma força eletromotriz induzida; e, pela lei de Lenz, as correntes resultantes circulam de modo a opor-se à variação que as gerou (Pyrhönen J.; Jokinen, 2008). Em máquinas elétricas, especialmente nas estruturas da armadura e nos núcleos magnéticos, essas correntes formam trajetórias fechadas ao redor das linhas de fluxo, dissipando energia na forma de calor.

Figura 6 – Ilustração da corrente de Foucault.



Fonte: (Pyrhönen J.; Jokinen, 2008)

O problema central das correntes de Foucault está no fato de que elas não contribuem para o funcionamento eletromecânico desejado. Pelo contrário, representam uma importante fonte de perdas no circuito magnético, reduzindo o rendimento e podendo elevar a temperatura do equipamento.

Para minimizar esses efeitos, os núcleos magnéticos de motores e transformadores são construídos com chapas laminadas de aço elétrico (Umans, 2014). Cada lâmina é isolada das demais para interromper o caminho das correntes parasitas, reduzindo drasticamente sua circulação e, portanto, as perdas associadas.

### 2.2.3 Impedância, reatância e efeito pelicular.

A impedância é a grandeza que expressa a oposição que um circuito apresenta à passagem de corrente alternada. Ela relaciona a tensão e a corrente fasoriais de um elemento ou circuito, ou seja, lei de Ohm (ALEXANDER C. K.; SADIKU, 2013):

$$\vec{Z} = \frac{\vec{V}}{\vec{I}} \quad \text{ou} \quad \vec{V} = \vec{Z} \vec{I} \quad (4)$$

A impedância pode incluir tanto uma componente resistiva quanto uma reativa, associada ao armazenamento de energia em campos elétricos e magnéticos. Embora seja definida como a razão entre dois fasores, a impedância em si não é um fasor, pois não varia senoidalmente no tempo, sendo um parâmetro complexo dependente da frequência que descreve o comportamento dinâmico dos elementos elétricos (ALEXANDER C. K.; SADIKU, 2013).

As expressões da impedância para os elementos passivos são dadas

por(ALEXANDER C. K.; SADIKU, 2013):

$$\begin{aligned} R : \quad \vec{Z} &= R \\ L : \quad \vec{Z} &= j\omega L \\ C : \quad \vec{Z} &= \frac{1}{j\omega C} \end{aligned} \quad (5)$$

A impedância é uma grandeza complexa que pode ser expressa na forma  $Z = R + jX$  onde R representa a resistência e X a reatância do circuito. A resistência está associada à dissipação de energia, enquanto a reatância relaciona-se ao armazenamento temporário de energia em campos elétricos ou magnéticos. A reatância X pode assumir valores positivos ou negativos, sendo positiva para elementos indutivos e negativa para elementos capacitivos. Assim, a impedância indutiva faz com que a corrente atrase em relação à tensão, enquanto a impedância capacitiva provoca um adiantamento. Tanto a resistência quanto a reatância são medidas em ohms, e juntas determinam a magnitude e a fase da impedância total de um circuito(ALEXANDER C. K.; SADIKU, 2013).

A energia armazenada em um indutor é dada por(PURCELL E. M.; MORIN, 2013):

$$U = \frac{1}{2}Li^2 \quad (6)$$

E, na sua forma mais geral, em função do campo magnético B(PURCELL E. M.; MORIN, 2013):

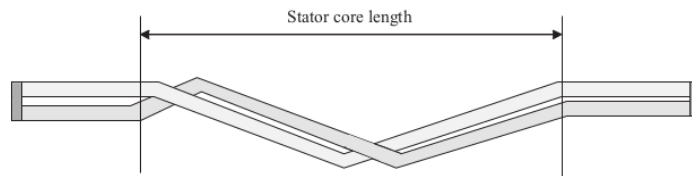
$$U = \frac{1}{2\mu_0} \int_{(\text{volume ocupado pelo campo})} B^2 dv \quad (7)$$

O efeito pelicular (skin effect) é um fenômeno eletromagnético que ocorre em condutores percorridos por corrente alternada, no qual o campo magnético gerado pela própria corrente faz com que a densidade de corrente se concentre nas regiões superficiais do material. Dessa forma, a corrente tende a fluir predominantemente nas camadas externas do condutor, reduzindo a participação da parte interna na condução. Esse comportamento aumenta a resistência elétrica efetiva do condutor com a frequência e manifesta-se principalmente nas ranhuras das máquinas elétricas, onde o fluxo magnético é mais intenso. A distribuição não uniforme da corrente implica perdas adicionais e variação da impedância ao longo da seção, devendo ser considerada em aplicações que envolvem altas frequências de operação. O efeito pelicular também altera a indutância do circuito. Contudo, tem a tendência de reduzir a indutância do circuito(Pyrhönen J.; Jokinen, 2008).

O efeito pelicular pode ser minimizado pela divisão do condutor em múltiplos fios finos isolados eletricamente e entrelaçados, como exemplificado na Figura 7. Essa configuração garante a transposição periódica das correntes nos fios, uniformizando a distribuição de corrente na seção transversal e reduzindo as perdas por aquecimento

associadas à concentração de corrente na superfície do condutor em altas frequências (Pyrhönen J.; Jokinen, 2008).

Figura 7 – Torção de condutores paralelos para redução do efeito pelicular.



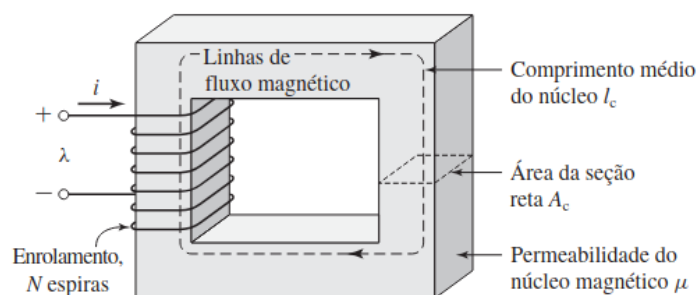
Fonte: (Pyrhönen J.; Jokinen, 2008)

Evidencia-se, portanto, a necessidade do trançamento de dois condutores paralelos na construção de bobinas que operam em alta frequência e que necessitam de correntes elevadas para sua operação, visto que reduz a impedância geral do circuito.

### 2.3 CIRCUITOS MAGNÉTICOS.

Um circuito magnético consiste em caminhos magnéticos médios com permeabilidades variadas, submetidos a um fluxo magnético gerado por uma força magnetomotriz (Fmm). Um exemplo simples de circuito magnético é apresentado na Figura 8. Nele, é possível identificar a bobina submetida a uma corrente  $i$ , enrolada no núcleo, sendo a corrente a fonte de excitação magnética. O núcleo, com uma permeabilidade magnética baixa, mantém o fluxo magnético direcionado. A Fmm é obtida pela relação 8 (Umans, 2014).

Figura 8 – Circuito magnético simples.



Fonte: (Umans, 2014)

$$\mathcal{F} = Ni = H_c l_c \quad (8)$$

Os circuitos magnéticos são análogos aos circuitos elétricos, apresentando elementos resistivos (Relutâncias), alimentação (Fmm) e corrente (fluxo). Junto a isso,

as operações de equivalência para circuitos magnéticos são as mesmas que as de circuitos elétricos (Umans, 2014).

Embora as analogias sejam muito úteis na análise de circuitos contendo materiais magnéticos, elas representam uma aproximação, cujas limitações devem ser consideradas. Em condutores elétricos, as dimensões da seção transversal são geralmente muito menores que o comprimento do fio, o que garante uma distribuição uniforme da corrente. No entanto, essa condição nem sempre é válida em circuitos magnéticos, onde as dimensões da seção transversal podem variar ao longo do caminho do fluxo. Assim, o cálculo da relutância em um circuito de seção variável é dado por

$$\mathcal{R} = \int \frac{dl}{\mu S}, \quad (9)$$

o que torna a aproximação menos precisa do que nos circuitos elétricos. Além disso, o produto  $F_{mm}\Phi$  não representa uma taxa de dissipação de energia, diferentemente de  $\varepsilon i$  em um circuito resistivo (Nussenzveig, 1997).

### **3 MÉTODO**

Para avaliar o comportamento eletromagnético gerado pelo efeito da relutância com o polo excitado em alta frequência, foi desenvolvida uma planta experimental composta por um conjunto núcleo-bobina e um sistema eletrônico de excitação e aquisição de dados. A metodologia adotada envolve o projeto do atuador eletromagnético, a implementação física do conjunto magnético e mecânico, o desenvolvimento do circuito de acionamento baseado em uma ponte H e a integração de um sistema microcontrolado responsável pelo controle, medição e comunicação com a IHM. Os ensaios realizados buscaram caracterizar as forças desenvolvidas, nos sentidos horizontal e transversal, pelo polo sob diferentes condições de excitação elétrica e configurações das bobinas.

#### **3.1 RECURSOS UTILIZADOS.**

A execução do projeto exigiu a integração de um conjunto diversificado de recursos, abrangendo ferramentas de software, instrumentos eletrônicos de bancada e equipamentos de manufatura que possibilitaram o desenvolvimento completo da planta experimental (desde a modelagem e o projeto eletrônico até a validação e a fabricação dos protótipos). A seleção desses recursos baseou-se na busca por precisão, reprodutibilidade, acessibilidade e eficiência, de modo a garantir que todas as etapas, desde o desenho conceitual até a execução dos ensaios, sejam contempladas. Assim, a combinação de softwares livres, instrumentos de medição de alta confiabilidade e processos de fabricação internos conferiu ao projeto autonomia e flexibilidade, assegurando um fluxo de desenvolvimento contínuo e alinhado às necessidades experimentais.

##### **3.1.1 Recursos de software**

Foram empregadas diversas ferramentas de software livre e de código aberto ao longo do desenvolvimento do projeto. Os principais softwares utilizados foram: FreeCAD; KiCad; FlatCAM; UGS (Universal Gcode Sender); ultimaker; UMLetino; STM32CubeIDE e o logic 2. A preferência por ferramentas livres e de código aberto justifica-se pela transparência, flexibilidade e possibilidade de personalização que essas plataformas oferecem, além de promoverem acessibilidade e independência em relação a licenças proprietárias.

O FreeCAD é um software livre e de código aberto para modelagem 3D paramétrica. Destinado a engenheiros, projetistas e entusiastas, o FreeCAD oferece

ambientes especializados para análise por elementos finitos (FEA), dinâmica de fluidos (CFD), BIM, CAM/CNC e simulação robótica. Compatível com Windows, macOS e Linux, suporta diversos formatos de arquivo (como STEP, STL, DXF e IFC) e é totalmente personalizável. Não apresenta custos ou restrições de licença, conta com uma comunidade ativa, ampla documentação e evolução constante, oferecendo liberdade e flexibilidade para prototipagem e design 3D.

O Ultimaker Cura é um software de fatiamento (slicer) desenvolvido pela Ultimaker para preparar modelos 3D para impressão. Gratuito e de código aberto, ele converte arquivos nos formatos STL, OBJ ou 3MF em instruções G-code para impressoras 3D. O Cura permite ajustar parâmetros como altura da camada, temperatura, velocidade e preenchimento, além de oferecer perfis otimizados para diferentes materiais e impressoras.

O KiCad é um software livre e de código aberto voltado para o projeto de placas de circuito impresso (PCBs) e esquemas eletrônicos de alta complexidade. Ele oferece um conjunto completo de ferramentas para a criação de esquemas elétricos, o roteamento de placas multicamadas, a visualização em 3D, a simulação de circuitos e a geração de arquivos Gerber prontos para fabricação. Compatível com Windows, macOS e Linux, o KiCad.

O FlatCAM é um software livre e de código aberto desenvolvido para preparar e converter projetos de placas de circuito impresso (PCB) para roteamento em máquinas CNC. Ele possibilita abrir, editar e criar arquivos Gerber, Excellon ou G-Code, além de gerar percursos de isolamento e outras rotas de usinagem necessárias à fabricação mecânica de PCBs.

O Universal Gcode Sender (UGS) é um software livre e multiplataforma que atua como uma interface de controle para máquinas CNC, permitindo enviar e monitorar comandos Gcode em tempo real. Compatível com controladores como GRBL, TinyG e Smoothieware, o UGS oferece recursos como visualização 3D das trajetórias, controle manual dos eixos, ajuste de velocidade, monitoramento de status e execução segura de trabalhos de usinagem. Possui uma interface intuitiva e suporte a diferentes sistemas operacionais (Windows, macOS e Linux).

O STM32CubeIDE é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) fornecido pela STMicroelectronics para a programação de microcontroladores STM32. Baseado no Eclipse e no compilador GCC ARM, ele integra ferramentas de configuração de hardware, geração de código e depuração em um único ambiente. Por meio do STM32CubeMX, o IDE permite configurar graficamente os periféricos, pinos e clocks, além de gerar automaticamente o código de inicialização do projeto. O STM32CubeIDE também oferece suporte completo a depuração via ST-Link e à visualização de variáveis em tempo real.

O Logic 2, desenvolvido pela Saleae, é um software de análise digital e mista

utilizado para depuração e inspeção de sinais em sistemas eletrônicos. Ele permite visualizar formas de onda, decodificar protocolos de comunicação e registrar eventos em tempo real, oferecendo um ambiente intuitivo e de alta precisão para o diagnóstico de hardware e firmware. Com suporte a diversos canais, triggers configuráveis e ferramentas de medição avançadas, o Logic 2 se destaca como uma plataforma robusta para validação de circuitos, testes experimentais e análise de desempenho em sistemas embarcados.

O UMLetino é uma ferramenta online gratuita para a criação rápida de diagramas UML, executada diretamente no navegador, sem necessidade de instalação. Baseado no software UMLet, o UMLetino mantém a mesma filosofia de edição ágil por meio de uma interface textual simplificada, permitindo ao usuário descrever elementos UML usando uma linguagem de marcação leve. A aplicação oferece suporte a diversos tipos de diagramas, armazenamento local no navegador, edição intuitiva dos componentes e exportação em formato PNG, tornando-se uma alternativa prática e eficiente para a elaboração de esquemas UML em ambientes acadêmicos e de desenvolvimento.

### **3.1.2 Recursos de eletrônica**

Durante o desenvolvimento do projeto, foram empregados diversos recursos de eletrônica de bancada essenciais para a validação experimental e o diagnóstico dos circuitos. Utilizou-se uma fonte de alimentação FA-3030, responsável por fornecer tensão e corrente estabilizadas, garantindo condições controladas durante os ensaios elétricos. Para a análise temporal dos sinais, foi empregado um osciloscópio Rigol DS2102A, permitindo observar formas de onda, transientes e fenômenos dinâmicos do sistema com alta resolução e largura de banda adequada. Complementarmente, a caracterização precisa dos elementos passivos foi realizada por meio de uma ponte LCR Twintex LCR-70200, que possibilitou medir a indutância sob diferentes frequências de excitação. Esses instrumentos foram fundamentais para assegurar a confiabilidade das medições e a correta interpretação do comportamento eletromagnético da planta estudada.

### **3.1.3 Recursos de manufatura**

Para a etapa de manufatura dos protótipos e componentes experimentais, foram utilizadas ferramentas que possibilitaram precisão dimensional e rapidez no processo de fabricação. A máquina CNC Twotress CNC3018, um roteador de três eixos, foi empregada para a usinagem de placas de circuito impresso, permitindo a produção de geometrias personalizadas com boa repetibilidade e acabamento adequado. Complementando esse processo, utilizou-se também a impressora 3D

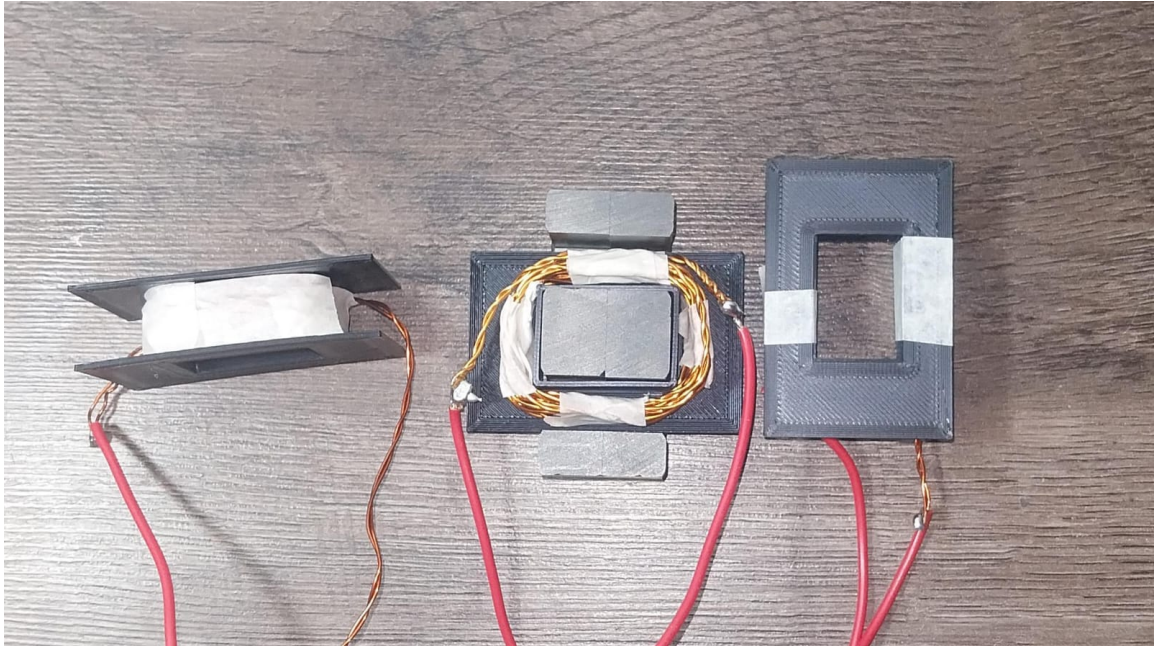
BQU B1, que viabilizou a fabricação de suportes e peças mecânicas sob medida, contribuindo para a montagem estruturada da planta de testes. A combinação dessas duas ferramentas ampliou a flexibilidade do desenvolvimento, permitindo ajustes rápidos, fabricação interna e adaptação contínua dos protótipos ao longo do projeto.

### 3.2 ELEMENTOS ELETROMAGNÉTICOS

O conjunto eletromagnético empregado foi construído a partir de dois núcleos comerciais do tipo E(NEE-55/28/25 - 7300), fabricados em ferrite pela Thornton, com material IP12E (cuja permeabilidade magnética relativa é de 1701), um material ferrimagnético amplamente utilizado em aplicações de alta frequência, devido à sua elevada resistividade elétrica e às reduzidas correntes de Foucault quando comparadas às de materiais ferromagnéticos metálicos. Enquanto os ferromagnéticos apresentam histerese mais pronunciada, maior remanência e menores resistividades, fatores que aumentam as perdas por histerese e correntes parasitas em regimes dinâmicos, os ferrimagnéticos oferecem ciclos de histerese mais estreitos, menor densidade de corrente parasita e comportamento mais estável para excitações de média e alta frequência, características desejáveis para o tipo de excitação implementado. Ambos os materiais compartilham alta suscetibilidade magnética e capacidade de saturação; porém, os ferrites tipicamente saturam em níveis menores de indução.

Um dos núcleos foi equipado com uma bobina para representar o polo do estator, enquanto o núcleo oposto, sem enrolamento, atuou como o elemento móvel equivalente ao rotor em um estudo estático. Para a avaliação do efeito do número de espiras na resposta do atuador, foram confeccionadas três amostras de bobinas, com 5, 10 e 15 espiras; apresentadas na Figura 9, cujos parâmetros obtidos de resistência, reatância e indutância estão apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3. Cada bobina foi enrolada utilizando dois condutores em paralelo trançados, os quais foram empregados para reduzir o efeito pelicular em frequências elevadas, diminuindo a resistência de corrente alternada e, conseqüentemente, mitigando variações indesejadas na impedância do conjunto. A utilização de condutores paralelos também impacta a reatância indutiva, que cresce proporcionalmente ao número de espiras, influenciando diretamente a corrente de magnetização e a força resultante produzida pelo entreferro. Dessa forma, a variedade de configurações de bobinas permitiu analisar a influência conjunta da resistência em corrente alternada (AC), da impedância e do acoplamento magnético no desempenho do polo eletromagnético.

Figura 9 – Bobinas e núcleo de ferrite.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A caracterização da força eletromagnética foi realizada considerando três frequências de excitação: 20 kHz, 40 kHz e 60 kHz. A escolha inicial de 20 kHz teve como motivação principal ultrapassar o limite superior da faixa audível humana, evitando ruídos mecânicos e magnéticos indesejáveis durante a operação do atuador. As frequências de 40 kHz e 60 kHz foram selecionadas para avaliar o comportamento do sistema em regime de alta frequência, no qual tanto as perdas por histerese quanto as perdas por corrente parasita tornam-se mais relevantes. A comparação entre esses três regimes permitiu analisar como a variação da frequência afeta a impedância do enrolamento e a força desenvolvida no entreferro, fornecendo uma visão abrangente da resposta dinâmica do conjunto eletromagnético para aplicações de acionamento em alta frequência.

Tabela 1 – Parâmetros medidos da bobina de 5 espiras.

Frequência	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )	L ( $\mu\text{H}$ )
20 kHz	0.0512	0.6957	5.5363
40 kHz	0.0490	1.3000	5.1730
60 kHz	0.0414	1.9469	5.1639

Tabela 2 – Parâmetros medidos da bobina de 10 espiras.

Frequência	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )	L ( $\mu$ H)
20 kHz	0.0611	3.0320	24.320
40 kHz	0.0461	5.9841	23.809
60 kHz	0.0354	8.9591	23.765

Tabela 3 – Parâmetros medidos da bobina de 15 espiras.

Frequência	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )	L ( $\mu$ H)
20 kHz	0.0677	4.8254	38.398
40 kHz	0.0593	9.6318	38.320
60 kHz	0.0636	14.424	38.261

Para o acionamento de motores de relutância, a revisão apresentada por Han, apresenta diversas topologias de conversão, incluindo o conversor meia-ponte assimétrico, os conversores de chave compartilhada ( $n+1$ ), as variantes *split converter*, as configurações C-dump e, por fim, os conversores de ponte H. Cada uma dessas topologias apresenta compromissos entre o número de semicondutores, a tolerância a falhas, a capacidade de controle de corrente, a eficiência e a dinâmica de magnetização; entretanto, a ponte H se destaca por oferecer excitação bipolar, elevada capacidade de comutação e melhor controle do fluxo magnético, características particularmente adequadas para estudos que envolvem excitação em alta frequência, como no presente trabalho. Além de permitir trajetórias de corrente mais eficientes para magnetização e desmagnetização rápidas, a ponte H facilita a imposição de formas de onda simétricas e bem definidas, reduzindo distorções na corrente e minimizando perdas associadas ao regime dinâmico (Han S.; Diao, 2021). Dessa forma, a topologia selecionada para o acionamento da bobina de ensaio foi a Ponte H.

### 3.3 HARDWARE

O sistema responsável pela excitação da bobina, assim como pelos procedimentos de controle e aquisição, foi implementado em uma única placa de circuito impresso (PCI). A PCI integra a ponte-H de potência, o estágio de condicionamento de sinais, o sistema microcontrolado e os circuitos auxiliares necessários para a operação.

A Figura 10 apresenta o esquemático do circuito de acionamento. A topologia empregada baseia-se em quatro MOSFETs do tipo canal N IRFB3306, selecionados devido à sua baixa resistência  $R_{DS(on)}$  e elevada capacidade de corrente. O acionamento dos MOSFETs superiores e inferiores é realizado por dois drivers IR2110, responsáveis por gerar os sinais de *high-side* e *low-side* utilizando técnicas de bootstrap. Para isso, cada driver incorpora conjuntos de capacitores eletrolíticos e cerâmicos (22  $\mu$ F e

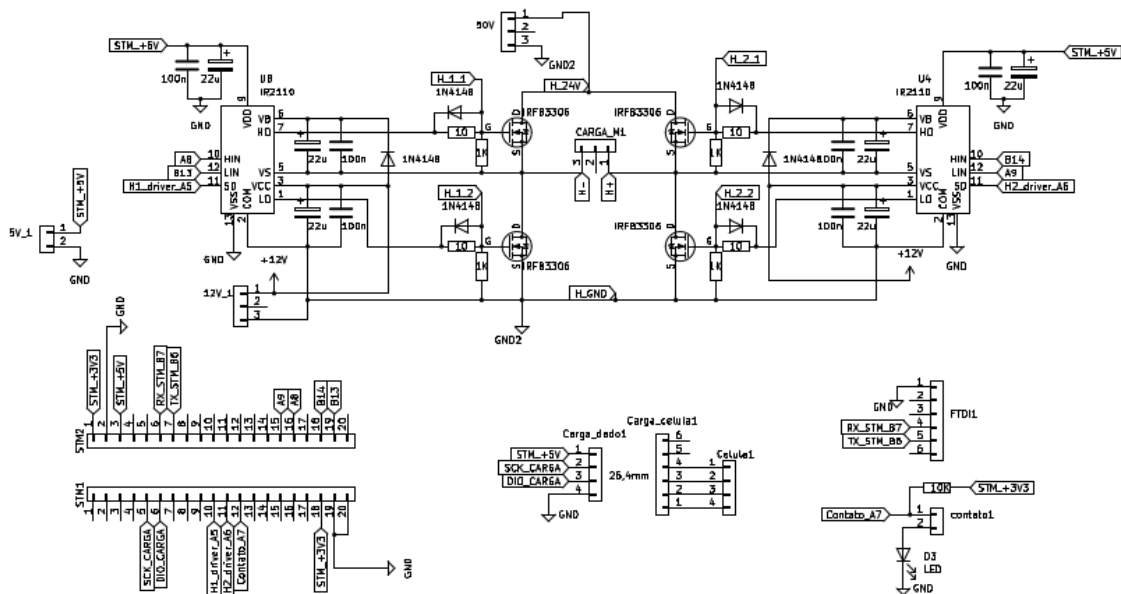
100 nF) conectados nas linhas VB–VS, garantindo a carga adequada do estágio de *high-side* durante o chaveamento.

Os caminhos de proteção incluem diodos de comutação rápida 1N4148, utilizados tanto no circuito de bootstrap quanto na proteção dos nós de porta dos MOSFETs. Resistores de 10  $\Omega$  são empregados como resistores de gate, limitando a corrente de comutação. Resistores de 1k  $\Omega$  realizam a descarga das portas em estado desligado, garantindo operação segura e evitando disparos indevidos, operando como *pull-down's*.

A PCI recebe alimentação de duas tensões principais: 24V, que alimenta dois módulos buck (XL 4015 - 5A) que geram as tensões de 12V e 5V (para a operação dos drives de acionamento da ponte H e utilização pelo microcontrolador e por circuitos auxiliares integrados, respectivamente), e 50V, que corresponde ao barramento da ponte H responsável pela energização da bobina.

O sistema microcontrolado é baseado em um microcontrolador ARM (STM32), conectado ao estágio de potência por meio de sinais digitais dedicados aos pinos HIN e LIN de cada driver, permitindo controlar individualmente as chaves *high-side* e *low-side*. O mesmo microcontrolador também realiza a leitura de força por meio do módulo Hx711, junto a uma célula de carga de 5 kg, e a comunicação serial com o computador, através de um conversor USB–Serial FTDI. A interface humano–máquina (IHM) em software possibilita configurar parâmetros, visualizar sinais e registrar resultados.

Figura 10 – Esquemático detalhado do sistema de acionamento e aquisição.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

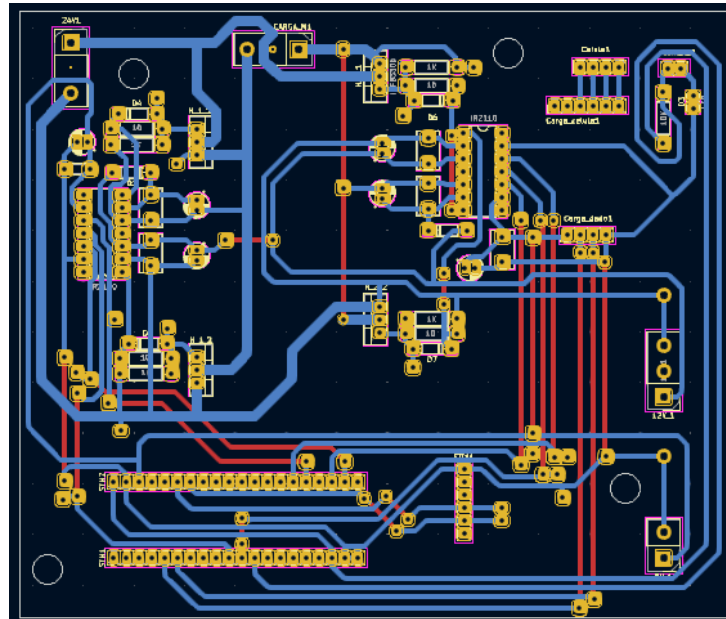
A Tabela 4 apresenta os principais componentes identificados no circuito mostrado na Figura 10, incluindo sua função e quantitativo.

Tabela 4 – Elementos do circuito apresentado.

Componente	Modelo	Função no circuito	Qtd.
MOSFETs de potência	IRFB3306	Chaves da ponte H	4
Drivers meia ponte	IR2110	Acionamento <i>high/low-side</i>	2
Diodos de comutação	1N4148	Proteção e bootstrap	8
Resistores de gate	10 $\Omega$	Limite de corrente de comutação	4
Resistores de descarga	1k $\Omega$	<i>Pull-down</i> das portas dos MOSFETs	4
Capacitores cerâmicos	100 nF	Filtro e bootstrap	4
Capacitores eletrolíticos	22 $\mu$ F	Filtro e bootstrap	4
Conversor USB–Serial	FTDI	Comunicação com o computador	1
Microcontrolador	STM32	Controle, aquisição e comunicação	1
Módulos Buck	XL 4015	Alimentação lógica e acionamento	2
Fonte de barramento	50V	Alimentação da ponte H	1
Fonte auxiliar	24V	Alimentação dos módulos Buck	1
Módulo célula de carga	Hx711	Leitura do dado de força da célula de carga	1
Célula de carga	5 kg	Gerar dado de força	1
Conectores	<i>Headers</i> e bornes	Interfaces de potencia e sensores	Diversos

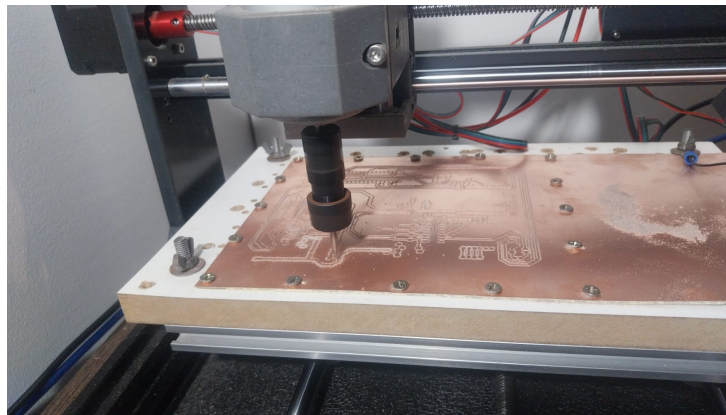
A placa de circuito impresso utilizada no sistema foi manufaturada por meio de fresagem CNC a partir do *layout* desenvolvido no KiCad, Figura 11. Após a geração dos arquivos de fabricação, as informações geométricas do projeto foram preparadas em ambiente CAM (FlatCAM) e, posteriormente, convertidas para código de usinagem, assegurando a correspondência entre o modelo eletrônico e a execução mecânica. O fresamento foi realizado em um Router CNC de 3 eixos, empregando uma placa virgem de fenolite e procedimentos adequados de alinhamento e fixação, conforme apresentado na Figura 12. A máquina executou de forma sequencial as operações necessárias para a conformação da PCI, resultando em uma placa final compatível com o circuito projetado. O processo permitiu a obtenção de um protótipo funcional (Figura 13), garantindo a integração correta dos componentes apresentados na Tabela 2.

Figura 11 – Design PCI.



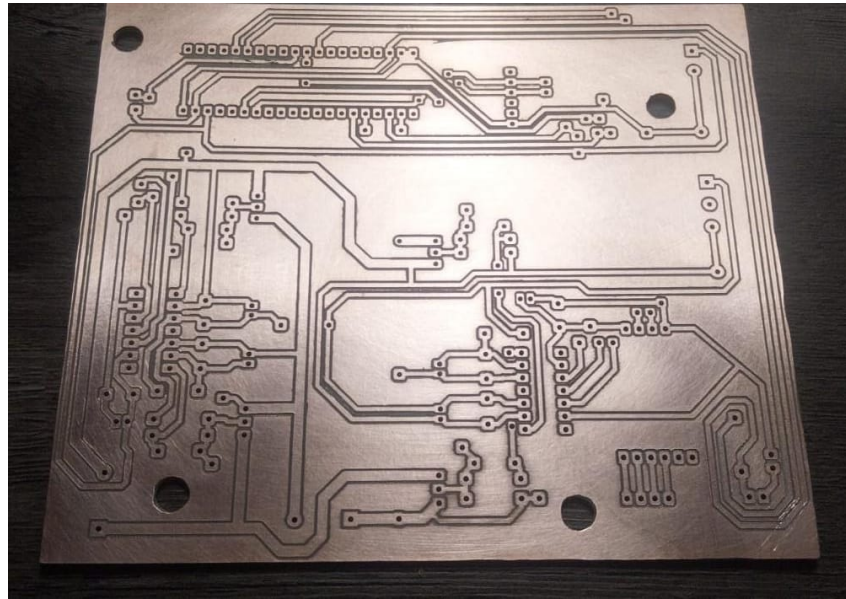
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 12 – Fresagem.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 13 – PCI.



**Fonte:** Desenvolvido pelo autor.

O circuito de acionamento adotado utiliza o driver IR2110; cujas portas lógicas são descritas na Tabela 6 e características elétricas apresentadas na Tabela 5, responsável por prover a interface entre os sinais lógicos do microcontrolador e as portas dos MOSFETs, garantindo níveis de tensão adequados, isolamento funcional e controle seguro das comutações. Esse componente opera por meio de um estágio bootstrap para a condução do MOSFET high-side e apresenta tempos de propagação e de transição compatíveis com aplicações de chaveamento rápido, assegurando que as transições entre os estados de condução ocorram de forma coerente com o tempo morto de 500 ns definido para a aplicação (mostrados na Figura 14), a fim de evitar o Shoot-through na fonte de 50 V utilizada no projeto. Nos ensaios finais da PCI, mesmo operando a 200 kHz (frequência superior às condições utilizadas nos ensaios finais da planta), demonstrou robustez e plena capacidade de acionar a ponte H conforme projetada.

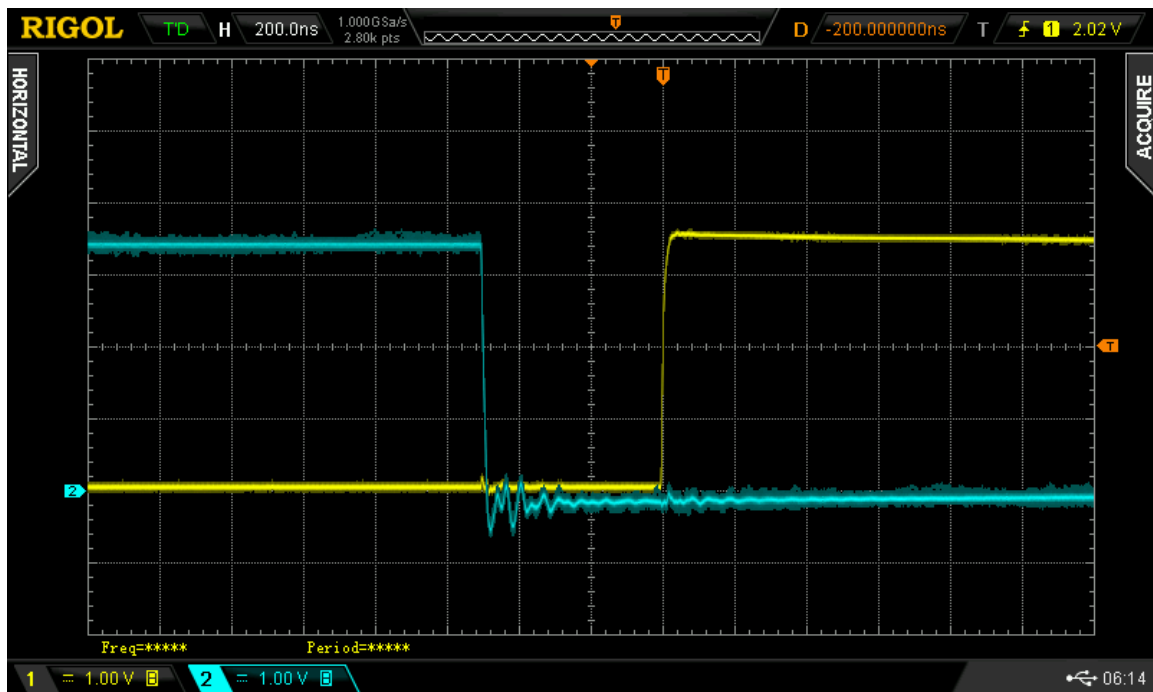
Tabela 5 – Principais características elétricas e dinâmicas do driver IR2110.

Parâmetro	Valor típico	Máx./Faixa	Unidade
Tensão $V_{CC}$ (Acionamento)	–	10 – 20	V
Tensão $V_{DD}$ (lógica)	–	$V_{SS} + 3 - V_{SS} + 20$	V
Tensão $V_{SS}$ (lógica)	–	-5 – 5	V
Tensão $V_B$ (bootstrap)	–	-3 – 525 (ABS) $V_S + 10 - V_S + 20$	V
Corrente de saída (pico)	–	2	A
$t_{on}$ (propagação turn-on)	120	150	ns
$t_r$ (rise time)	25	35	ns
$t_{off}$ (propagação turn-off)	94	125	ns
$t_f$ (fall time)	17	25	ns
$t_{sd}$ (shutdown delay)	110	140	ns

Tabela 6 – Portas do driver IR2110 e comportamento funcional.

Pino	Nome	Função / Comportamento
HIN	Entrada High-side	Comanda o MOSFET da parte superior da meia ponte.
LIN	Entrada Low-side	Comanda o MOSFET inferior da meia ponte.
HO	Saída High-side	Fornece o sinal de gate AO MOSFET high-side via bootstrap.
LO	Saída Low-side	Fornece o sinal de gate ao MOSFET low-side.
VB	Bootstrap Supply	Alimentação flutuante para o HO; atua com diodo + capacitor.
VS	Source do HS	Referência flutuante da saída high-side.
VCC	Alimentação de acionamento	Alimenta a seção de controle.
COM	Terra de acionamento	Referência da seção de controle.
VDD	Alimentação lógica auxiliar	Alimenta entradas digitais.
VSS	GND lógica	Referencia das entradas digitais.
SD	Shutdown	Desliga ambas as saídas quando ativo (nível alto).

Figura 14 – Tempo morto entre a inversão de polaridade da carga.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A presença dos diodos de descarga associados aos MOSFETs, em conjunto com o tempo morto configurado no microcontrolador e com os tempos de propagação e de transição do driver, assegurou o rápido escoamento das cargas armazenadas nas capacitâncias internas dos semicondutores antes da ativação do dispositivo complementar. Essa coordenação entre elementos passivos, controle digital e características dinâmicas do IR2110 impediu a condução simultânea indesejada entre os ramos da meia ponte, garantindo a operação segura do estágio de potência, mesmo em frequências elevadas. Em consequência, os testes mostraram que a ponte H funcionou dentro dos limites esperados, comutando de forma estável e confiável durante todo o processo de validação do hardware.

### 3.3.1 Problema de leitura com carga aplicada.

Durante os ensaios destinados à coleta dos dados de força resultantes da interação entre os núcleos de ferrite, foram observadas inconsistências nas medições fornecidas pelo módulo Hx711. Essas inconsistências estavam associadas à presença de ruídos eletromagnéticos gerados pela operação em alta frequência da ponte H quando a carga indutiva estava conectada. No acionamento da ponte H, as leituras apresentavam um deslocamento (offset) inicial, embora mantivessem a linearidade. Verificou-se que esse offset variava em função da corrente aplicada à carga indutiva, a qual sofre alterações significativas durante os ensaios. Em razão dessa variação dinâmica, a simples recalibração da célula de carga durante o acionamento mostrou-se insuficiente para compensar adequadamente o erro introduzido.

Para contornar o erro observado e permitir a continuidade dos ensaios, adotou-se a utilização de um Arduino Uno dedicado exclusivamente à leitura da força proveniente da célula de carga. Embora não tenha sido implementado um isolamento galvânico entre o Arduino e o hardware desenvolvido, devido a conexão comum ao computador utilizado como interface homem-máquina (que unificou os referenciais de GND), foi o suficiente para mitigar os efeitos dos ruídos no módulo Hx711. Essa configuração permitiu corrigir o erro de leitura observado, assegurando a estabilidade das medições e viabilizando a realização completa dos ensaios experimentais.

## 3.4 FIRMWARE.

O desenvolvimento do firmware foi conduzido com foco na implementação dos algoritmos de controle, aquisição de dados e acionamento do sistema. Para isso, utilizou-se a placa de desenvolvimento, baseada no microcontrolador STM32F103C8T6. A programação e a depuração foram realizadas na IDE STM32CubeIDE, fornecida pela STMicroelectronics, que integra o ambiente de desenvolvimento, as ferramentas de configuração de periféricos e os gerenciadores de projetos. A combinação de hardware e software permitiu estruturar um firmware modular e compatível com os requisitos necessários para a aplicação proposta, como disponibilizado na íntegra no apêndice A.1.

O código-fonte explora de forma integrada os recursos de hardware e firmware disponíveis na placa de desenvolvimento. No nível de hardware, são utilizados o oscilador externo HSE com PLL para operação a 72 MHz, as linhas de GPIO para acionamento da ponte H (sinais de comando dos ramos da ponte) e para interface com o módulo de condicionamento de sinal HX711 da célula de carga, além da porta USART1 para comunicação serial com a interface de supervisão. Do ponto de vista do firmware, a aplicação é estruturada sobre a biblioteca HAL da ST, responsável pela inicialização do clock do sistema (SystemClock\_Config),

configuração dos periféricos básicos (MX\_GPIO\_Init, MX\_USART1\_UART\_Init) e gerenciamento do temporizador do sistema (SysTick). Recursos específicos de controle e aquisição são encapsulados em módulos dedicados, incluindo as rotinas de inicialização e calibração da célula de carga (HX711\_Init, tara\_celula\_de\_carga), o ajuste dos parâmetros de PWM complementar do TIM1 para acionamento da ponte H (setup\_tim1\_pwm\_complementary, calculate\_pwm\_params\_E\_Atualiza) e o estabelecimento da camada de comunicação serial (config\_comunicacao, definido em Comunicacao.h). Por fim, a lógica de operação é organizada na função Run\_machine(), executada ciclicamente no laço principal com um período definido pelo atraso programado, conferindo ao firmware uma arquitetura modular e compatível com os requisitos de controle, aquisição e acionamento do sistema proposto.

O módulo de comunicação serial foi desenvolvido para garantir a troca estruturada de informações entre o microcontrolador e a interface externa de supervisão (computador, utilizando o software Cutecom como interface). Sua implementação baseia-se no uso da USART1 operando em modo assíncrono, com recepção orientada a interrupções, permitindo que o firmware continue executando outras tarefas enquanto aguarda novos dados. Para isso, o módulo mantém um buffer circular simples, responsável por armazenar byte a byte as mensagens recebidas até a detecção do caractere delimitador de final de linha. A rotina de callback HAL\_UART\_RxCpltCallback é acionada automaticamente a cada byte recebido, registrando o conteúdo no buffer e sinalizando ao sistema quando há um comando completo pendente de tratamento. Além disso, o módulo disponibiliza funções para a inicialização da comunicação (config\_comunicacao), verificação de comandos recebidos (verifica\_se\_tem\_comando\_pendente) e transmissão não bloqueante de mensagens (transmite\_mensagem), garantindo um fluxo de comunicação robusto, responsivo e compatível com a arquitetura modular do firmware. Essa abordagem possibilita a interação contínua entre o sistema de controle e os módulos de monitoramento, permitindo ajustes, leituras e comandos em tempo real, sem comprometer o desempenho do loop principal.

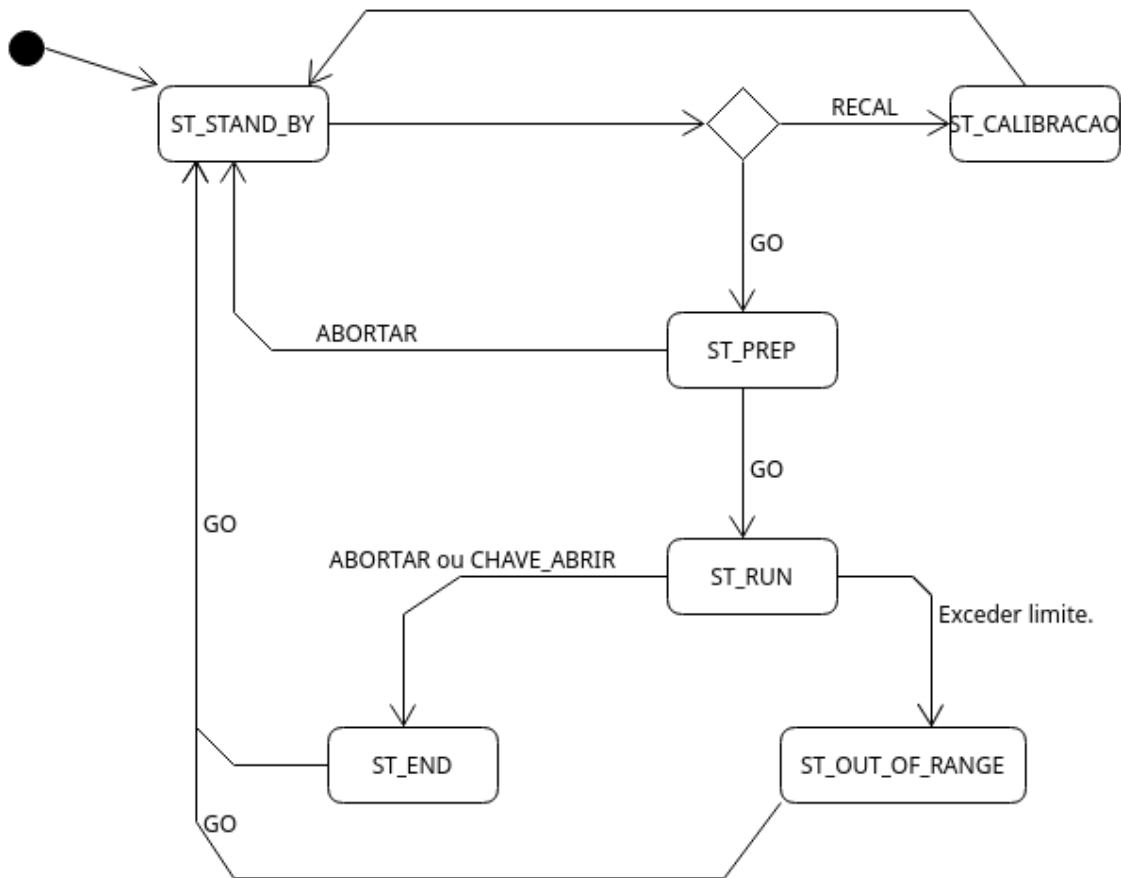
O módulo responsável pela aquisição de carga implementa a interface direta com o conversor analógico-digital dedicado HX711, utilizado para a leitura de uma célula de carga. A arquitetura do módulo é baseada na configuração explícita das linhas digitais do microcontrolador para operação como entrada (DOUT) e saída (SCK), garantindo o controle preciso do protocolo serial proprietário do HX711. A rotina HX711\_Read executa a sequência completa de clocking necessária para a captura dos 24 bits de saída do conversor, incluindo o pulso adicional que define o ganho interno do dispositivo. Para assegurar a confiabilidade metrológica, o módulo inclui funções de calibração e compensação, como (tara\_celula\_de\_carga), que realiza múltiplas amostragens para estabilizar o valor de referência, e a função de conversão

para força em Newton (aquisição\_de\_carga\_N), que aplica um fator de escala ajustável conforme a calibração experimental, realizada ao submeter a célula de carga a uma força conhecida. Essa implementação permite ao firmware realizar leituras consistentes e em tempo real da carga aplicada ao sistema, integrando a medição de força ao ciclo de controle, sem a necessidade de periféricos analógicos adicionais no microcontrolador.

O módulo de acionamento da ponte H foi projetado para explorar plenamente os recursos avançados do temporizador TIM1, permitindo a geração de sinais PWM complementares com tempo morto (dead-time) controlado de 500 ns, essenciais para a operação segura dos MOSFETs da ponte H na topologia Full-bridge. A configuração dos pinos associados aos canais principais e complementares do timer é realizada diretamente por meio do acesso aos registradores das portas GPIOA e GPIOB, garantindo baixa latência e controle preciso dos modos de função alternativa. O temporizador é inicializado em modo PWM1, com o preload habilitado, possibilitando a atualização síncrona dos ciclos de trabalho e assegurando a estabilidade temporal no acionamento. A inclusão do bloco BDTR com Master Output Enable e a geração de dead-time reforçam a proteção contra o Shoot-through em cada ramo, fator crítico em aplicações de comutação rápida. Além disso, o módulo incorpora uma função de cálculo dinâmico para a atualização dos parâmetros PSC e ARR (calculate\_pwm\_params\_E\_Atualiza), permitindo ajustar a frequência de chaveamento entre 20 kHz e 200 kHz, conforme a demanda do controle. Funções auxiliares para a habilitação e desabilitação dos drivers complementam o módulo, permitindo que o firmware gerencie o estado dos estágios de potência de maneira segura e coerente com o restante da lógica de controle. Com isso, o acionamento da ponte H é realizado de forma confiável, flexível e diretamente integrado ao ciclo de operação do sistema.

O módulo StateMachine implementa a lógica sequencial do sistema por meio de uma máquina de estados finitos (FSM - representada na Figura 15), responsável por coordenar a operação entre os subsistemas de aquisição de carga, acionamento da ponte H e comunicação serial. Seu papel central é gerenciar a transição entre estados de prontidão, preparação, execução, encerramento e condições de falha, garantindo que cada etapa do processo ocorra de forma segura, controlada e sincronizada com os sinais externos e internos do sistema. O estado atual da FSM é armazenado em uma variável estática, e cada ciclo de execução da função Run\_machine() representa uma iteração da lógica de controle, que é continuamente invocada dentro do laço principal do firmware.

Figura 15 – Máquina de estados implementada.



**Fonte:** Desenvolvido pelo autor.

A FSM inicia no estado ST\_STAND\_BY, no qual o sistema permanece inerte, notificando a interface externa por meio de mensagens transmitidas pelo módulo de comunicação e aguardando comandos do usuário. Nesse estado, a função `verifica_se_tem_comando_pendente()` (proveniente do módulo de Comunicação) examina o buffer de recepção para identificar comandos como GO, FREQ: ou RECAL. Em caso de atualização de frequência, o módulo de acionamento da ponte H é acionado com a função `calculate_PWM_params_E_Atualiza()`, recalculando os parâmetros de PWM em tempo real. A rotina de recalculando a frequência só é chamada dentro do estado ST\_STAND\_BY, pois os drivers encontram-se desabilitados nos estados de transição que precedem e sucedem o estado, evitando acionamento indevido dos MOSFETs da ponte H. A transição para o estado ST\_PREP ocorre quando o comando GO é recebido, estabelecendo o início da preparação para o ensaio.

No estado ST\_PREP, o sistema ainda não está ativo, mas monitora continuamente o sensor de contato físico conectado ao microcontrolador. Somente quando o usuário envia novamente o comando GO e o contato indica uma condição

segura (nível lógico baixo), os drivers da ponte H são habilitados por meio da função `habilita_drivers()`, pertencente ao módulo `HBridge`. Isso garante que o acionamento da ponte ocorra somente em condições mecânicas adequadas. Caso um comando de abortamento (`ABORTAR`) seja recebido, o sistema retorna imediatamente ao estado de espera, reforçando a segurança operativa.

Entrando no estado `ST_RUN`, inicia-se o ensaio propriamente dito. O módulo de carga, por meio da função `aquisição_de_carga_N()`, fornece leituras contínuas da força aplicada ao sistema, que são comparadas com o valor máximo registrado para fins de monitoramento. Uma FSM executa verificações de limiar, sendo a leitura de força superior ao limite da célula de carga (definido como 20 N), causando a desativação imediata da ponte H (`desabilita_drivers()`) e a transição para o estado `ST_OUT_OF_RANGE`. Paralelamente, comandos recebidos via comunicação também podem interromper o processo, permitindo o abortamento manual a qualquer momento. A integração direta entre `StateMachine`, `Carga` e `HBridge` é essencial para permitir reações rápidas a mudanças físicas ou comandos externos.

O estado `ST_END` representa o encerramento normal do ensaio. Nele, a força máxima registrada é enviada à interface externa por meio da função `forca_max()`, e o sistema permanece aguardando um novo comando de início (`GO`) para reinicializar o processo. De forma semelhante, o estado `ST_OUT_OF_RANGE` trata de encerramentos por falhas, informando ao operador sobre a ocorrência de valores fora do intervalo operacional seguro, preservando a integridade do sistema eletromecânico.

O estado `ST_CALIBRACAO` foi implementado para recalibrar o módulo `Hx711` durante o acionamento da planta com a carga indutiva devidamente conectada a saída da ponte H, para corrigir o offset descrito na subseção 3.3.1. Nesse estado, o módulo `HBridge` é brevemente ativado para estabilizar eletromagneticamente o sistema antes da execução da função `tara_celula_de_carga()`, proveniente do módulo de `Carga`.

Complementando a operação principal, a FSM executa a função auxiliar `envio_padrao()` a cada iteração, que compõe e envia dados estruturados via `UART`, contendo a força atual, o estado dos drivers, a leitura do contato mecânico e a frequência de operação da ponte H. Essa rotina, em conjunto com as funções de preparação de dados (`Prep_dado_de_forca` e `Prep_dado_de_freq`), garante comunicação contínua e transparente entre o sistema embarcado e o software de monitoramento externo.

Dessa forma, o módulo `StateMachine` atua como o núcleo integrador da aplicação, coordenando o comportamento dos módulos de `Comunicação`, `Carga` e `Acionamento da Ponte H`. Sua implementação garante operação determinística, segurança nas transições de estado e resposta rápida a eventos físicos e comandos externos, refletindo uma arquitetura de firmware robusta, modular e adequada às exigências do sistema proposto.

### 3.4.1 Código implementado no arduino para aquisição de força complementar.

O código implementado no Arduino Uno realiza a leitura contínua da força aplicada à célula de carga, utilizando o módulo HX711, configurado nos pinos digitais 2 e 3. Após inicializar a comunicação serial e estabilizar o sensor, o sistema executa a tara para eliminar offsets e aplica um fator de calibração determinado experimentalmente, permitindo que as leituras representem a massa equivalente a força aplicada a célula de carga em quilogramas. A cada ciclo, o Arduino verifica se o HX711 está pronto e obtém a medida filtrada pelo método `get_units()`, convertendo-a posteriormente em força pela multiplicação pela aceleração da gravidade. Os valores de massa e força são, então, enviados via UART para o computador, possibilitando o monitoramento em tempo real durante os ensaios.

Figura 16 – Comunicação entre IHM, arduino e PCI operando.

The image shows two side-by-side screenshots of the CuteCom software interface. Both windows are titled 'CuteCom - Default' and show a serial communication log. The left window is connected to 'device: /dev/ttyUSB3' and displays the following output:

```

go
FREQ:050000
FREQ:020000
FREQ:040000
FREQ:060000
FREQ:080000
RECAL
ABORTAR
GO
FREQ:100000

[16:30:10:284] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.003 N \n
[16:30:10:396] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.002 N \n
[16:30:10:492] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.002 N \n
[16:30:10:588] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.003 N \n
[16:30:10:700] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.002 N \n
[16:30:10:796] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.002 N \n
[16:30:10:892] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.003 N \n
[16:30:11:004] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.003 N \n
[16:30:11:100] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.003 N \n
[16:30:11:196] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.003 N \n
[16:30:11:298] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.002 N \n
[16:30:11:404] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.002 N \n
[16:30:11:501] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.001 N \n
[16:30:11:613] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.002 N \n
[16:30:11:708] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.002 N \n
[16:30:11:820] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.001 N \n
[16:30:11:916] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.001 N \n
[16:30:12:012] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.001 N \n
[16:30:12:124] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.001 N \n
[16:30:12:220] Massa: 0.000 kg | Forca: 0.002 N \n

```

The right window is connected to 'device: /dev/ttyUSB2' and displays the following output:

```

go
FREQ:050000
FREQ:020000
FREQ:040000
FREQ:060000
FREQ:080000
RECAL
FREQ:100000
GO
ABORTAR

[16:30:11:734] FORCA_MAXIMA:+00.00000<-break> \n
[16:30:11:734] \n
[16:30:11:783] +00.00000:1:0:020000 \n
[16:30:11:783] RUNNING \n
[16:30:11:783] FORCA_MAXIMA:+00.00000<-break> \n
[16:30:11:783] \n
[16:30:11:846] +00.00000:1:0:020000 \n
[16:30:11:846] RUNNING \n
[16:30:11:846] FORCA_MAXIMA:+00.00000<-break> \n
[16:30:11:894] +00.00000:1:0:020000 \n
[16:30:11:894] RUNNING \n
[16:30:11:894] FORCA_MAXIMA:+00.00000<-break> \n
[16:30:11:894] \n
[16:30:11:942] +00.00000:1:0:020000 \n
[16:30:11:942] RUNNING \n
[16:30:11:958] FORCA_MAXIMA:+00.00000<-break> \n
[16:30:11:958] \n
[16:30:12:006] +00.00000:1:0:020000 \n
[16:30:12:006] RUNNING \n

```

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A Figura 16 apresenta a operação integrada dos sistemas que operam em conjunto e viabilizaram a execução dos ensaios.

## 3.5 RECURSOS MECÂNICOS.

O desenvolvimento mecânico foi realizado integralmente no FreeCAD, onde foram modeladas de forma paramétrica as duas plantas experimentais: uma voltada para a análise longitudinal e outra para a análise transversal das forças geradas pelos núcleos de ferrite. O projeto considerou critérios de rigidez estrutural, ausência de interferência eletromagnética nos arredores das bobinas e facilidade de acesso para a montagem de múltiplos ensaios em sequencia. As geometrias contemplaram o posicionamento e a centralização dos núcleos, bem como o alojamento dedicado à célula de carga, realizando o alinhamento e a transmissão da força medida. A separação entre partes móveis e estáticas foi obtida por meio de guias, apoios e rolamentos que

asseguraram deslocamentos lineares controlados, enquanto a exportação final dos modelos em formato STL para impressão 3D permitiu a construção direta das peças projetadas.

A arquitetura mecânica foi planejada para minimizar influências eletromagnéticas externas, de modo que parafusos metálicos foram empregados em regiões onde não alterariam o caminho de fluxo magnético do núcleo de ferrite que representa a parte móvel, enquanto componentes plásticos foram priorizados nas regiões sensíveis aos ensaios. Essa estratégia visa evitar que o suporte mecânico introduza distorções nas medições, preservando a integridade dos ensaios.

### **3.5.1 Estratégias de Fixação Mecânica**

Para as regiões do conjunto mecânico que não apresentam sensibilidade eletromagnética, a fixação foi realizada com parafusos metálicos comerciais, priorizando rigidez, facilidade de montagem e repetibilidade dimensional. Foram empregados parafusos do tipo M3, instalados em pré-furos impressos com 2,5 mm de diâmetro, dimensionados para permitir o corte de rosca manual com macho, sem comprometer a integridade das peças poliméricas. Esse método garantiu conexões firmes, elevada resistência ao cisalhamento e estabilidade estrutural, mesmo sob múltiplos ciclos de montagem e desmontagem. A utilização de parafusos metálicos nesses locais também facilitou a remontagem do conjunto para múltiplos testes.

Nas regiões próximas aos núcleos de ferrite e às bobinas, áreas diretamente afetadas pela distribuição do fluxo magnético, foram adotados parafusos e elementos de fixação impressos em 3D, seguindo o padrão ISO M8 e modelados especificamente no FreeCAD, de acordo com as necessidades geométricas do conjunto. Para viabilizar sua montagem, as peças receptoras foram projetadas com roscas internas impressas e com folga radial de 0,6 mm, garantindo acoplamento adequado, sem travamentos e sem comprometer a geometria funcional. A adoção desses elementos plásticos evitou perturbações no circuito magnético, mantendo a confiabilidade das medições. Embora apresentem menor resistência mecânica que os equivalentes metálicos, os parafusos M8 impressos mostraram desempenho suficiente para as cargas envolvidas no experimento, oferecendo um equilíbrio adequado entre funcionalidade, compatibilidade magnética e adaptabilidade.

Figura 17 – Método de fixação.

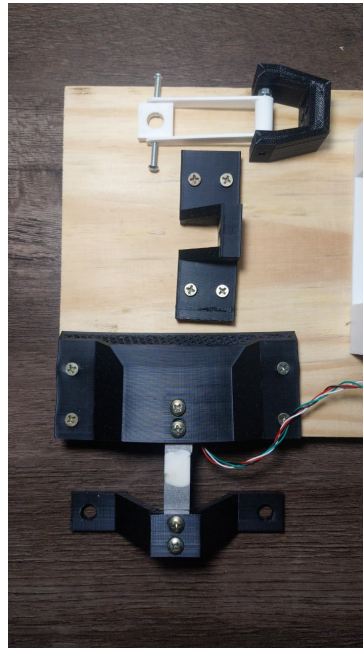


Fonte: Desenvolvido pelo autor.

### 3.5.2 Acoplamento Mecânico à Célula de Carga.

O acoplamento da célula de carga foi projetado de forma distinta para cada uma das plantas experimentais, de modo a garantir que o vetor de força medido coincidisse com a direção efetiva da análise direcional da força magnética entre os núcleos. Na planta longitudinal, a célula de carga foi instalada de forma que seu eixo sensível permanecesse alinhado ao vetor de aceleração da gravidade, permitindo medições diretas da força de atração ou repulsão no mesmo sentido do carregamento estrutural natural do sensor. Para isso, foram modeladas e impressas duas peças dedicadas: a primeira destinada à fixação rígida da célula na base de ensaio; e a segunda atuando como interface mecânica entre o elemento móvel da planta longitudinal e o ponto ativo de medição da célula. Já na planta transversal, foram igualmente desenvolvidas duas peças impressas com propósito semelhante; contudo, sua geometria foi configurada para posicionar a célula de carga com o eixo sensível orientado ortogonalmente ao vetor da gravidade, assegurando que a força lateral gerada fosse medida exclusivamente no plano transversal, sem influência do peso próprio da estrutura.

Figura 18 – Acoplamento mecânico da célula de carga.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

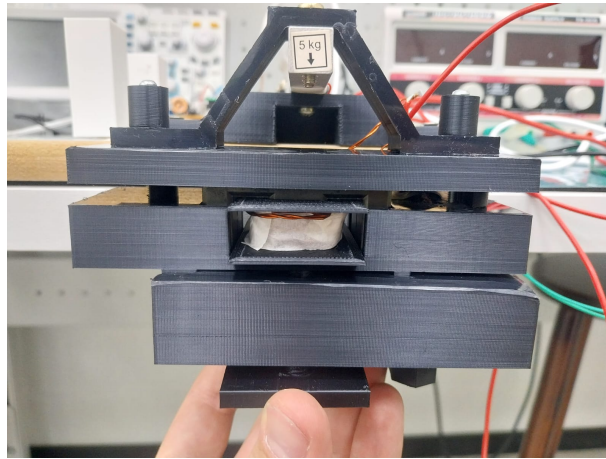
### 3.5.3 Planta Longitudinal para Medição da Força Vertical.

A planta horizontal foi estruturada em duas partes principais, sendo a primeira responsável pela fixação do núcleo, equipado com a bobina. Essa estrutura é formada por duas peças que envolvem o núcleo de ferrite, garantindo o posicionamento correto da bobina em seu interior e deixando exposta a interface frontal do núcleo, de modo a permitir ensaios sem entreferro artificial entre os núcleos. A peça inferior desse conjunto incorpora duas saliências assimétricas que atuam como elementos-guia, promovendo uma topologia poka-yoke que evita montagens incorretas e assegura o alinhamento adequado da parte móvel durante o deslocamento. A peça inferior também tem com dois furos passantes destinados à instalação de um sensor de fim de curso, permitindo a detecção do limite mecânico de afastamento. Todo o conjunto, incluindo o suporte do núcleo bobinado e a interface com a célula de carga, é rigidamente fixado por dois parafusos metálicos, garantindo a estabilidade estrutural e a transmissão precisa da força medida.

A segunda parte da planta horizontal é composta por três peças mecânicas distintas e interligadas, fixadas entre si por três parafusos impressos que asseguram compatibilidade magnética e evitam distorções no fluxo durante o ensaio. A peça principal é responsável por acomodar o núcleo sem bobina e possui furos passantes compatíveis com as saliências poka-yoke presentes na base fixa, garantindo o acoplamento correto e o alinhamento obrigatório entre os núcleos durante o deslocamento longitudinal. A essa peça acopla-se uma segunda estrutura, cuja função é prender firmemente o núcleo não bobinado; ambas são unidas por dois

parafusos plásticos, proporcionando rigidez adequada sem introduzir elementos metálicos próximos ao caminho magnético. A terceira peça atua como um mecanismo de ajuste para o acionamento do sensor de fim de curso: ela é mantida sob tensão por um pequeno elástico, permitindo retorno automático, e seu posicionamento é regulado à distância por meio do terceiro parafuso impresso, possibilitando o ajuste fino do ponto de disparo do sensor que indica o fim do ensaio.

Figura 19 – Conjunto mecânico para ensaios longitudinais.



**Fonte:** Desenvolvido pelo autor.

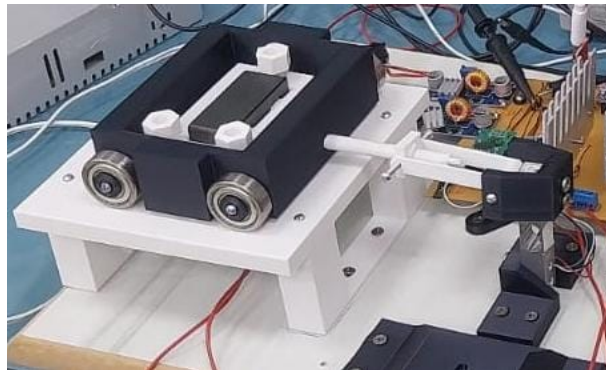
### 3.5.4 Planta Transversal para Medição da Força Lateral.

A planta transversal é estruturada em duas partes funcionais, sendo a primeira (correspondente ao conjunto inferior fixo) composta por quatro elementos mecânicos que, em conjunto, alojam o núcleo equipado com a bobina e suportam o deslocamento lateral do núcleo oposto. A peça principal deste conjunto fornece uma base ampla e rígida para a fixação do núcleo bobinado, ao mesmo tempo em que integra a parte móvel destinada a acomodar o núcleo sem bobina, permitindo seu movimento livre no sentido transversal para possibilitar a medição da força lateral. A segunda e terceira peças atuam como estruturas elevadas responsáveis por formar quatro colunas de suporte, cada uma fixada à base por dois parafusos metálicos, garantindo sustentação mecânica, alinhamento geométrico e posicionamento da parte móvel na altura correspondente ao ponto sensível da célula de carga. Já a quarta peça é responsável pela fixação direta do núcleo bobinado sobre essa base elevada, sendo acoplada por meio de dois parafusos plásticos, de modo a evitar interferências eletromagnéticas próximas ao entreferro e preservar a integridade das medições de força transversal.

A segunda parte da planta transversal é responsável por alojar o núcleo sem bobina e garantir seu deslocamento lateral com precisão. Ela é constituída por duas peças principais. A primeira corresponde à parte móvel propriamente dita, que integra

quatro rolamentos, estrategicamente distribuídos para eliminar atritos e permitir um movimento transversal suave e controlado. Essa peça também possui furos passantes destinados ao posicionamento seguro do núcleo não bobinado, preservando seu alinhamento durante todo o curso. A segunda peça atua como um mecanismo de ajuste fino do plano do núcleo, permitindo a regulação precisa do gap entre os núcleos por meio do uso de três parafusos plásticos, que possibilitam correções micrométricas de paralelismo e centralização. A conexão da parte móvel com a célula de carga é realizada por meio de um parafuso plástico longo e de uma haste ajustável que, em conjunto com duas porcas, permite o ajuste do posicionamento lateral da parte móvel, garantindo contato correto e transmissão fiel da força transversal medida.

Figura 20 – Conjunto mecânico para ensaios transversais.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

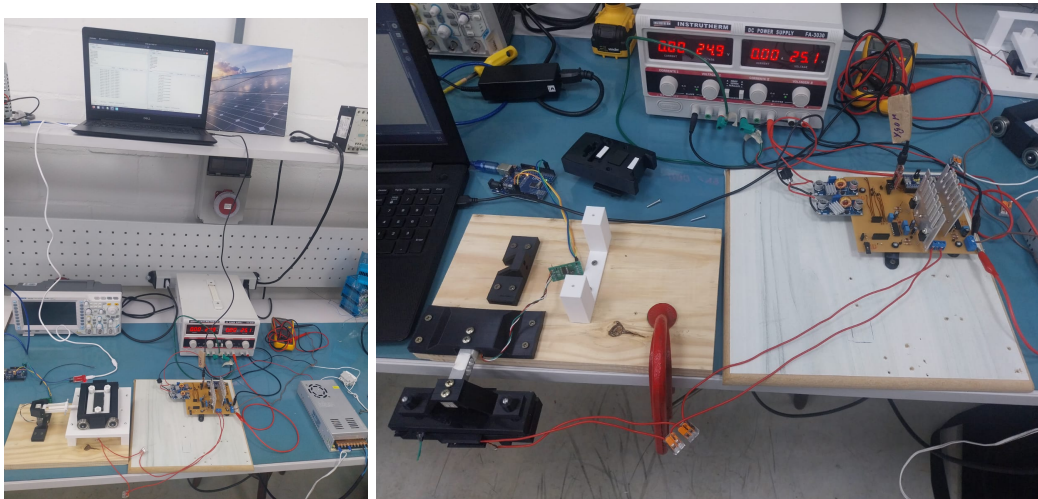
### 3.5.5 Materiais e Processo de Impressão 3D.

Todas as peças mecânicas utilizadas nas plantas de ensaio foram manufaturadas por impressão 3D, utilizando filamento PLA, em razão das limitações da impressora empregada, que não suporta materiais de maior desempenho térmico ou mecânico. A orientação das peças na mesa de impressão foi definida de maneira estratégica, de modo a maximizar a resistência nas direções dos esforços predominantes, garantindo que as linhas de deposição suportassem adequadamente as solicitações de tração, flexão e cisalhamento associadas aos ensaios. Para componentes submetidos a maiores cargas (como suportes estruturais, interfaces com os núcleos de ferrite e elementos que transferem força para a célula de carga), adotou-se uma configuração com seis camadas de parede e 40% de preenchimento, aumentando significativamente a rigidez e a resistência à deformação. Já para peças de função secundária, não expostas a esforços relevantes, utilizou-se três camadas de parede e 20% de preenchimento, otimizando o tempo de impressão e o consumo de material sem comprometer a funcionalidade do conjunto mecânico.

### 3.6 AMBIENTE DE TESTE.

O ambiente de testes foi estruturado no GREEN — Grupo de Energias Renováveis da UFSC Joinville, onde foram conduzidos tanto os ensaios preliminares quanto os ensaios finais do protótipo e são apresentadas na Figura 22. A bancada experimental foi alimentada por duas fontes independentes: uma fonte (FA-3030) regulada em 50 V, limitada a 3 A, utilizada como barramento principal da ponte H responsável pela excitação da bobina, e uma fonte chaveada de 24 V dedicada aos módulos auxiliares, incluindo os conversores buck e os circuitos de controle. Essa configuração permitiu a operação estável do sistema sob diferentes condições de frequência e carga, assegurando um ambiente controlado para a coleta das grandezas de força medidas pela célula de carga. A infraestrutura do laboratório ofereceu suporte adequado para a instrumentação, dissipação térmica e monitoramento em tempo real, garantindo a reprodutibilidade dos ensaios e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Figura 21 – Ambiente de teste.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

#### 3.6.1 Procedimento para coleta dos dados

Para os ensaios realizados na planta horizontal, inicia-se com a montagem da parte fixa do sistema, composta pelo núcleo equipado com a bobina, que será submetida às excitações elétricas. Após a fixação do conjunto e a verificação do alinhamento mecânico, a planta é ligada e aguarda-se o ciclo completo de inicialização do sistema. Em seguida, utilizando a interface de comando, configura-se a frequência de operação desejada e navega-se até o estado de preparação do sistema. Posiciona-se cuidadosamente o núcleo móvel (composto apenas pelo núcleo sem bobina) com o entreferro definido para o ensaio. O sistema é colocado em estado de acionamento, permitindo que a força de atração magnética seja medida. A coleta consiste em tracionar

a parte móvel lentamente no sentido horizontal até que o acoplamento magnético entre os núcleos se rompa. Por fim, registra-se a força máxima indicada pela célula de carga. Esse procedimento foi repetido para todas as combinações de bobinas, frequências e distâncias previstas no planejamento experimental, assegurando uniformidade e comparabilidade entre os cenários avaliados.

Na planta transversal, os ensaios são conduzidos a partir da montagem da parte móvel sobre o conjunto fixo, posicionando-a no deslocamento lateral discriminado pelo ensaio. O núcleo sem bobina é então posicionado, ajustando-se manualmente o entreferro e o paralelismo entre as superfícies, de forma a garantir um posicionamento geométrico adequado. Após a montagem mecânica, a planta é energizada, aguardando a finalização completa da inicialização eletrônica. Em seguida, configura-se a frequência de excitação e navega-se pela interface até o estado RUNNING, no qual a ponte H passa a excitar a bobina em regime permanente. A força resultante é monitorada continuamente até a estabilização, registrando-se o valor máximo indicado pela célula de carga. Tal procedimento foi replicado para todos os deslocamentos, entreferro e condições de frequência definidos previamente no plano de ensaios, garantindo consistência e repetibilidade na aquisição dos dados experimentais.

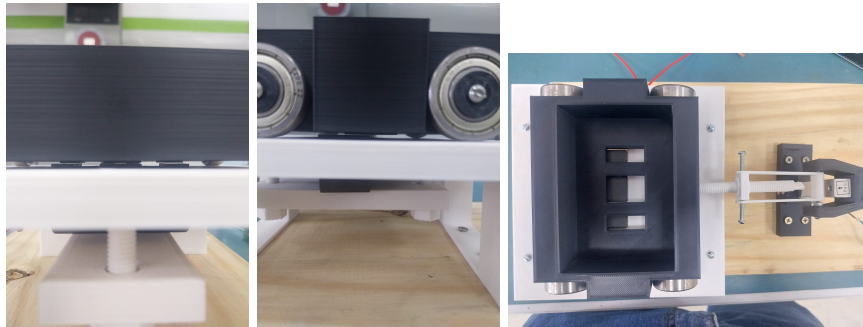
### **3.6.2 Plano de ensaios.**

O plano de ensaios definido para a planta horizontal consiste em uma sequência sistemática de medições destinada a avaliar a influência conjunta dos parâmetros eletromagnéticos e geométricos no comportamento do protótipo. Para cada uma das três bobinas utilizadas no estudo, foram realizadas aquisições nas três frequências de excitação previamente estabelecidas (20 kHz, 40 kHz e 60 kHz), combinadas com três condições distintas de entreferro: 0,0 mm, 0,5 mm e 1 mm. Cada configuração experimental foi submetida à execução de cinco ensaios consecutivos, permitindo não apenas a obtenção de valores representativos da força máxima, mas também a avaliação da repetibilidade das medições sob condições operacionais idênticas. Adicionalmente, uma rodada de ensaios foi conduzida sem o acionamento da bobina, com o objetivo de identificar possíveis vieses inerentes ao sistema mecânico e assegurar que as forças registradas fossem exclusivamente decorrentes da interação eletromagnética. Essa abordagem estruturada garantiu uma varredura abrangente dos cenários definidos, resultando em um conjunto robusto e confiável de dados experimentais.

No caso da planta transversal, o plano de ensaios foi estruturado de forma a investigar a variação da força resultante em função do desalinhamento lateral entre os núcleos. Para cada uma das três bobinas avaliadas, aplicaram-se as três frequências de excitação definidas no estudo (20 kHz, 40 kHz e 60 kHz), mantendo-se constante o entreferro de 0,5 mm, estabelecido como referência para esses testes.

Cada configuração foi analisada em três condições geométricas distintas: alinhamento completo entre os núcleos, deslocamento lateral de 7,5 mm e deslocamento lateral de 15 mm. Em todas essas combinações, realizou-se a aquisição sistemática da força máxima após a estabilização do regime de excitação, assegurando a comparabilidade entre os cenários e permitindo avaliar de forma isolada o impacto do desalinhamento no comportamento do sistema eletromagnético.

Figura 22 – Montagem para teste transversal com deslocamento de 7,5 mm.



**Fonte:** Desenvolvido pelo autor.

## 4 RESULTADOS

Para a planta longitudinal, são disponibilizados os valores de força máxima medidos para cada combinação de bobina em newtons, frequência de excitação e condição de entreferro, organizados em tabelas que permitem a visualização sistemática dos cenários avaliados. Os resultados referentes às bobinas de 5, 10 e 15 espiras são apresentados de forma sequencial para as frequências de 20 kHz, 40 kHz e 60 kHz. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos na condição em que a bobina permaneceu desligada, servindo como referência para quantificar o nível de ruído gerado pelo sistema mecânico na medição e estabelecer um patamar comparativo para os demais ensaios realizados com excitação elétrica.

Tabela 7 – Resultados experimentais para a condição de bobina não acionada com entreferro de 0,0 mm.

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
bobina não acionada	0,11 N	0,03 N	0,15 N	0,13 N	0,07 N

Tabela 8 – Resultados experimentais para a bobina de 5 espiras excitada com frequência de 20 kHz.

<b>entreferro</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
0,0 mm	7,73 N	8,46 N	7,38 N	7,8 N	7,13 N
0,5 mm	0,16 N	0,24 N	0,15 N	0,2 N	0,23 N
1 mm	0,1 N	0,15 N	0,09 N	0,7 N	0,21 N

Tabela 9 – Resultados experimentais para a bobina de 5 espiras excitada com frequência de 40 kHz.

<b>entreferro</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
0,0 mm	2,91 N	3,23 N	4,57 N	2,94 N	2,4 N
0,5 mm	0,18 N	0,15 N	0,12 N	0,16 N	0,1 N
1 mm	0,15 N	0,24 N	0,1 N	0,12 N	0,7 N

Tabela 10 – Resultados experimentais para a bobina de 5 espiras excitada com frequência de 60 kHz.

<b>entreferro</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
0,0 mm	1,66 N	1,01 N	1,18 N	1,41 N	0,9 N
0,5 mm	0,15 N	0,1 N	0,05 N	0,09 N	0,12 N
1 mm	0,17 N	0,08 N	0,11 N	0,08 N	0,1 N

Tabela 11 – Resultados experimentais para 10 espiras excitada com frequência de 20 kHz.

<b>entreferro</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
0,0 mm	1,8 N	1,76 N	1,98 N	1,24 N	2,07 N
1 mm	0,44 N	0,42 N	0,54 N	0,62 N	0,61 N
2 mm	0,35 N	0,26 N	0,29 N	0,24 N	0,38 N

Tabela 12 – Resultados experimentais para 10 espiras excitada com frequência de 40 kHz.

<b>entreferro</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
0,0 mm	0,47 N	0,57 N	0,75 N	0,44 N	0,7 N
0,5 mm	0,24 N	0,15 N	0,13 N	0,27 N	0,15 N
1 mm	0,1 N	0,15 N	0,09 N	0,07 N	0,17 N

Tabela 13 – Resultados experimentais para 10 espiras excitada com frequência de 60 kHz.

<b>entreferro</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
0,0 mm	0,28 N	0,28 N	0,31 N	0,3 N	0,24 N
0,5 mm	0,13 N	0,15 N	0,08 N	0,11 N	0,1 N
1 mm	0,06 N	0,14 N	0,13 N	0,05 N	0,16 N

Tabela 14 – Resultados experimentais para 15 espiras excitada com frequência de 20 kHz.

<b>entreferro</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
0,0 mm	0,94 N	1,21 N	0,81 N	0,87 N	0,9 N
0,5 mm	0,34 N	0,56 N	0,28 N	0,32 N	0,3 N
1 mm	0,07 N	0,12 N	0,15 N	0,12 N	0,18 N

Tabela 15 – Resultados experimentais para 15 espiras excitada com frequência de 40 kHz.

<b>entreferro</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
0,0 mm	0,13 N	0,06 N	0,18 N	0,14 N	0,08 N
0,5 mm	0,05 N	0,12 N	0,1 N	0,16 N	0,09 N
1 mm	0,18 N	0,09 N	0,13 N	0,07 N	0,14 N

Tabela 16 – Resultados experimentais para 15 espiras excitada com frequência de 60 kHz.

<b>entreferro</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
0,0 mm	0,13 N	0,1 N	0,04 N	0,09 N	0,08 N
0,5 mm	0,06 N	0,12 N	0,07 N	0,15 N	0,08 N
1 mm	0,16 N	0,1 N	0,08 N	0,18 N	0,17 N

A Tabela 17 apresenta os dados médios de força compilados em uma tabela para indicar a tendência de força desenvolvida longitudinalmente pelo circuito magnético.

Tabela 17 – Valores medidos para diferentes frequências, entreferro e espiras

<b>Frequência</b>	<b>entreferro</b>	<b>5 Esp</b>	<b>10 Esp</b>	<b>15 Esp</b>
20 kHz	0,0 mm	7.7 N	1.77 N	0.946 N
	0.5 mm	0.196 N	0.526 N	0.36 N
	1 mm	0.124 N	0.304 N	0.128 N
40 kHz	0,0 mm	3.21 N	0.586 N	0.18 N
	0.5 mm	0.142 N	0.188 N	0.104 N
	1 mm	0.136 N	0.116 N	0.122 N
60 kHz	0,0 mm	1.232 N	0.282 N	0.096 N
	0.5 mm	0.102 N	0.114 N	0.096 N
	1 mm	0.108 N	0.108 N	0.098 N

Durante a execução dos ensaios na planta transversal, verificou-se que nenhuma das combinações entre bobina, frequência de excitação e deslocamento lateral resultou em forças mensuráveis pela célula de carga instalada no sistema. Apesar da variação sistemática dos parâmetros geométricos e eletromagnéticos, os valores registrados permaneceram dentro da faixa de ruído intrínseco do sensor, não apresentando qualquer tendência consistente que indicasse a presença de interação magnética significativa na direção transversal. Esse resultado evidencia que, nas condições operacionais implementadas, a configuração proposta não foi capaz de desenvolver esforços laterais detectáveis.

## 5 CONCLUSÕES

A análise dos valores medidos demonstra que a força desenvolvida pela planta eletromagnética longitudinal tende a aumentar quando se utiliza uma menor frequência de operação e um menor número de espiras, especialmente nos casos sem entreferro. Contudo, ao observar simultaneamente o efeito do entreferro e da frequência, nota-se que a relação não é linear: embora forças elevadas ocorram em baixas frequências, a sensibilidade ao entreferro torna o desempenho menos estável e menos eficiente quando se introduzem folgas mecânicas. De forma particular, os resultados indicam que a faixa intermediária de operação, em torno de 40 kHz, apresenta um comportamento mais equilibrado; combinando valores de força ainda relevantes. Assim, pode-se concluir que existe um ponto ótimo de operação em frequências intermediárias, no qual a influência do entreferro é atenuada e o sistema apresenta um melhor compromisso entre a intensidade da força.

Além de evidenciar o comportamento da força longitudinal em função da frequência de excitação, do número de espiras e da condição de entreferro, os resultados obtidos permitem validar que o circuito baseado na topologia de ponte H demonstrou plena capacidade de acionar a bobina nas faixas de 20 kHz, 40 kHz e 60 kHz, de forma estável, possibilitando a caracterização do comportamento eletromagnético do conjunto.

A análise experimental comprova a existência de forças longitudinais associadas ao efeito de relutância, mesmo quando operando em regime de alta frequência. Embora a força resultante dependa fortemente da interação entre frequência, número de espiras e entreferro, as medições mostram que o acionamento em altas frequências é capaz de gerar esforços detectáveis e consistentes, caracterizando o fenômeno físico pretendido. Já no caso das forças transversais, verificou-se que, nas condições estruturais adotadas e com o arranjo geométrico da planta transversal, não foram observados esforços laterais significativos, o que indica que a configuração proposta não favorece esse tipo de componente de força ou que tais esforços se mantêm abaixo do limiar de detecção imposto pelo ruído do sistema.

Os resultados também possibilitaram identificar parâmetros construtivos que influenciam diretamente a intensidade da força gerada, destacando-se: (i) a importância do controle do entreferro, que afeta a eficiência do acoplamento magnético; (ii) o papel do número de espiras, que altera simultaneamente a relutância do circuito e a magnitude da corrente necessária para a excitação; e (iii) o efeito da faixa de frequência, cuja região intermediária demonstrou melhor compromisso entre a intensidade da força e a estabilidade frente a variações geométricas. Tais observações constituem diretrizes

importantes para o desenvolvimento futuro de motores de relutância excitados em alta frequência.

## REFERÊNCIAS

- ALEXANDER C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5. ed. São Paulo: AMGH, 2013.
- ARAUJO R. E; CAMACHO, J. R. **Modelling and Control of Switched Reluctance Machines**. [S.l.]: IntechOpen, 2020.
- BOLDEA I.; TUTELEA, L. **Reluctance electric machines** design and control. New York: Taylor Francis Group, 2019.
- CULLITY B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to magnetic materials**. 2. ed. Hoboken: John Wiley Sons, Inc, 2009.
- HAN S.; DIAO, K. X. Overview of multi-phase switched reluctance motor drives for electric vehicles. *Advances in Mechanical Engineering*, 2021.
- KITTEL, C. **Introduction to solid state physics**. 8. ed. Hoboken: John Wiley Sons, Inc, 2005.
- LAN Y.; BENOMAR, Y. D. K. A. A. B. M. B. E. H. O. Switched reluctance motors and drive systems for electric vehicle powertrains: State of the art analysis and future trends. *Energies*, 2021.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica 3: eletromagnetismo**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1997.
- PURCELL E. M.; MORIN, D. J. **Electricity and magnetism**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- PYRHÖNEN J.; JOKINEN, T. H. V. **Design of rotational electrical machines**. Hoboken: John Wiley sons Ltd, 2008.
- ROSENBERGER N.; ROSNER, P. P. S. J. T. O. J. A. G. K. A. C. D. B. S. M. Quantifying the state of the art of electric powertrains in battery electric vehicles: Comprehensive analysis of the tesla model 3 on the vehicle level. *World Electr. Veh. J.*, 2024.
- UMANS, S. D. **Máquinas elétricas**. 2. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

## A APÊNDICE

### .1 CÓDIGO FONTE DO STM32F103C8T6

```

1 #ifndef __MAIN_H
2 #define __MAIN_H
3
4 #ifdef __cplusplus
5 extern "C" {
6 #endif
7
8 #include "stm32f1xx_hal.h"
9
10 #include <string.h>
11 #include <stdbool.h>
12 #include "HBridge.h"
13 #include "Carga.h"
14 #include "Comunicacao.h"
15
16 void Error_Handler(void);
17
18 #ifdef __cplusplus
19 }
20 #endif
21
22 #endif

```

Listing 1 – main.h

```

1 #include "main.h"
2
3 UART_HandleTypeDef huart1;
4
5 void SystemClock_Config(void);
6 static void MX_GPIO_Init(void);
7 static void MX_USART1_UART_Init(void);
8
9 int main(void)
10 {
11     HAL_Init();
12
13     SystemClock_Config();
14     MX_GPIO_Init();
15     MX_USART1_UART_Init();
16
17     HAL_GPIO_WritePin(porta_ponte_H, lado_ponte_H1, GPIO_PIN_SET);
18     HAL_GPIO_WritePin(porta_ponte_H, lado_ponte_H2, GPIO_PIN_SET);
19
20     HX711_Init(porta_dio_carga,
21               porta_sck_carga,
22               dio_carga,
23               sck_carga);
24

```

```
25 tara_celula_de_carga();
26
27 setup_tim1_gpio();
28 setup_tim1_pwm_complementary();
29
30 calculate_pwm_params_E_Atualiza(20000);
31
32 config_comunicacao(&huart1);
33 while (1)
34 {
35     Run_machine();
36     HAL_Delay(50);
37 }
38
39 }
40
41 void SystemClock_Config(void)
42 {
43     RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
44     RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};
45     RCC_PeriphCLKInitTypeDef PeriphClkInit = {0};
46
47     RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSE;
48     RCC_OscInitStruct.HSEState = RCC_HSE_ON;
49     RCC_OscInitStruct.HSEPredivValue = RCC_HSE_PREDIV_DIV1;
50     RCC_OscInitStruct.HSIState = RCC_HSI_ON;
51     RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
52     RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSE;
53     RCC_OscInitStruct.PLL.PLLMUL = RCC_PLL_MUL9;
54     if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
55     {
56         Error_Handler();
57     }
58
59     RCC_ClkInitStruct.ClockType = RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK
60         |RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
61     RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
62     RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
63     RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;
64     RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;
65
66     if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_2) != HAL_OK)
67     {
68         Error_Handler();
69     }
70     PeriphClkInit.PeriphClockSelection = RCC_PERIPHCLK_USB;
71     PeriphClkInit.UsbClockSelection = RCC_USBCLKSOURCE_PLL_DIV1_5;
72     if (HAL_RCCEX_PeriphCLKConfig(&PeriphClkInit) != HAL_OK)
73     {
74         Error_Handler();
75     }
76 }
77
78 static void MX_USART1_UART_Init(void)
79 {
80
```

```
81  huart1.Instance = USART1;
82  huart1.Init.BaudRate = 115200;
83  huart1.Init.WordLength = UART_WORDLENGTH_8B;
84  huart1.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1;
85  huart1.Init.Parity = UART_PARITY_NONE;
86  huart1.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX;
87  huart1.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE;
88  huart1.Init.OverSampling = UART_OVERSAMPLING_16;
89  if (HAL_UART_Init(&huart1) != HAL_OK)
90  {
91      Error_Handler();
92  }
93 }
94
95 static void MX_GPIO_Init(void)
96 {
97     GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct = {0};
98
99     __HAL_RCC_GPIOC_CLK_ENABLE();
100    __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
101    __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();
102
103    HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_13, GPIO_PIN_RESET);
104
105    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5|GPIO_PIN_6, GPIO_PIN_RESET);
106
107    GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_13;
108    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
109    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
110    GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
111    HAL_GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStruct);
112
113    GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_5|GPIO_PIN_6;
114    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
115    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
116    GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
117    HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);
118
119    GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_7;
120    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_INPUT;
121    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
122    HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);
123
124 }
125
126 void Error_Handler(void)
127 {
128     __disable_irq();
129     while (1)
130     {
131     }
132 }
133
134 #ifdef USE_FULL_ASSERT
135
136 void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)
```

```

137 {
138
139 }
140 #endif

```

Listing 2 – main.c

```

1 #ifndef INC_STATEMACHINE_H_
2 #define INC_STATEMACHINE_H_
3
4 #include "stm32f1xx_hal.h"
5
6 #include <string.h>
7 #include <stdbool.h>
8 #include "HBridge.h"
9 #include "Carga.h"
10 #include "Comunicacao.h"
11
12
13 #define led_bluepill          GPIO_PIN_13
14
15 #define porta_led_bluepill    GPIOC
16
17 typedef enum {
18     ST_STAND_BY = 0,
19     ST_PREP,
20     ST_RUN,
21     ST_END,
22     ST_OUT_OF_RANGE,
23     ST_CALIBRACAO
24 } fsm_state_t;
25
26 void Run_machine(void);
27 static void envio_padrao(void);
28 static void forca_max(float Forca);
29 void Prep_dado_de_forca(float value, char *buffer);
30 void Prep_dado_de_freq(int32_t value, char *buffer);
31 bool Atualiza_Freq(uint32_t *nova_freq, const char *buffer);
32 bool GO(const char *buffer);
33 bool Abortar(const char *buffer);
34 bool Recalibra(const char *buffer);
35
36 #endif

```

Listing 3 – StateMachine.h

```

1 #include "StateMachine.h"
2
3 static fsm_state_t s;
4
5 uint8_t STAND_BY_MSG[tamngo_buf] = "STAND_BY\r\n";
6 uint8_t PREP_MSG[tamngo_buf] = "PREP\r\n";
7 uint8_t RUN_MSG[tamngo_buf] = "RUNNING\r\n";
8 uint8_t END_MSG[tamngo_buf] = "TESTE_OVER\r\n";
9 uint8_t FAULT_MSG[tamngo_buf] = "OUT_OF_RANGE\r\n";
10 uint8_t FORCA_MAX[tamngo_buf] = "FORCA_MAXIMA:";

```

```

11
12 void Run_machine(void) {
13
14     static float max_forca = 0;
15
16     uint32_t nova_freq = 0;
17     char _buffer[tamngo_buf];
18
19     float _forca = 0;
20     bool tem_mensagem = verifica_se_tem_comando_pendente(&_buffer, tamngo_buf);
21     bool abortar = false;
22
23     envio_padrao();
24     GPIO_PinState contato = HAL_GPIO_ReadPin(porta_contato, _contato);
25     HAL_GPIO_WritePin(porta_led_bluepill, led_bluepill, contato);
26
27     switch (s) {
28         case ST_STAND_BY:
29             transmite_mensagem (&STAND_BY_MSG, 10);
30             if(tem_mensagem){
31                 if(Atualiza_Freq(&nova_freq, &_buffer))
32                     calculate_pwm_params_E_Atualiza(nova_freq);
33                 if(GO(&_buffer)){
34                     s = ST_PREP;
35                 }
36                 if(Recalibra(&_buffer) && false){
37                     s = ST_CALIBRACAO;
38                 }
39             }
40             HAL_Delay(500);
41             break;
42         case ST_PREP:
43             HAL_Delay(500);
44             transmite_mensagem (&PREP_MSG, 6);
45             if(tem_mensagem){
46                 if(Abortar(&_buffer)) {
47                     s = ST_STAND_BY;
48                 }
49                 if( GO(&_buffer) && contato == GPIO_PIN_RESET ){
50                     habilita_drivers();
51                     s = ST_RUN;
52                 }
53             }
54             break;
55         case ST_RUN:
56             transmite_mensagem (&RUN_MSG, 9);
57             _forca = aquisiçao_de_carga_N();
58
59             if(_forca > max_forca) max_forca = _forca;
60
61             forca_max(max_forca);
62
63             if(_forca >= 20 ){
64                 desabilita_drivers();
65                 s = ST_OUT_OF_RANGE;
66             }

```

```

67
68     if(tem_mensagem)
69         abortar = Abortar(&_buffer);
70
71     if(abortar || contato == GPIO_PIN_SET){
72         desabilita_drivers();
73         s = ST_END;
74     }
75     break;
76 case ST_END:
77     HAL_Delay(1000);
78     forca_max(max_forca);
79     transmite_mensagem (&END_MSG, 12);
80     if(tem_mensagem){
81         if(GO(&_buffer)){
82             max_forca = 0;
83             s = ST_STAND_BY;
84         }
85     }
86     break;
87 case ST_OUT_OF_RANGE:
88     HAL_Delay(1000);
89     transmite_mensagem (&FAULT_MSG, 14);
90     if(tem_mensagem){
91         if(GO(&_buffer)){
92             max_forca = 0;
93             s = ST_STAND_BY;
94         }
95     }
96     break;
97 case ST_CALIBRACAO:
98
99     habilita_drivers();
100     HAL_Delay(50);
101     tara_celula_de_carga();
102     HAL_Delay(50);
103     desabilita_drivers();
104     HAL_Delay(50);
105     s = ST_STAND_BY;
106
107     break;
108 default: break;
109 }
110 }
111
112 static void envio_padrao(void){
113     uint8_t buf_envio_p_oc = 0;
114     uint8_t buf_envio_p[tam_nho_buf];
115
116     float Forca = aquisicao_de_carga_N();
117     uint8_t local_buf[9];
118     Prep_dado_de_forca(Forca, local_buf);
119
120     for(buf_envio_p_oc ; buf_envio_p_oc <=9;buf_envio_p_oc++)
121         buf_envio_p[buf_envio_p_oc] = local_buf[buf_envio_p_oc];
122

```

```

123 buf_envio_p_oc--;
124 buf_envio_p[buf_envio_p_oc] = ',';
125 buf_envio_p_oc++;
126
127 if(Drivers_state()) buf_envio_p[buf_envio_p_oc] = '1';
128     else buf_envio_p[buf_envio_p_oc] = '0';
129
130 buf_envio_p_oc++;
131 buf_envio_p[buf_envio_p_oc] = ',';
132 buf_envio_p_oc++;
133
134 if(HAL_GPIO_ReadPin(porta_contato, _contato) == GPIO_PIN_SET) buf_envio_p[
    buf_envio_p_oc] = '1';
135     else buf_envio_p[buf_envio_p_oc] = '0';
136
137 buf_envio_p_oc++;
138 buf_envio_p[buf_envio_p_oc] = ',';
139 buf_envio_p_oc++;
140
141
142 int32_t freq = retorna_frequencia_atual();
143 uint8_t local_buf_freq[6];
144 Prep_dado_de_freq(freq, local_buf_freq);
145
146
147 for(buf_envio_p_oc ; buf_envio_p_oc <= 19;buf_envio_p_oc++)
148     buf_envio_p[buf_envio_p_oc] = local_buf_freq[buf_envio_p_oc - 14];
149
150 buf_envio_p[buf_envio_p_oc] = '\r';
151 buf_envio_p_oc++;
152 buf_envio_p[buf_envio_p_oc] = '\n';
153 buf_envio_p_oc++;
154
155 transmite_mensagem (&buf_envio_p, 22);
156 }
157
158 static void forca_max(float Forca){
159     uint8_t buf_envio_p_oc = 0;
160     uint8_t buf_envio_p[tam_nho_buf];
161
162     uint8_t local_buf[9];
163     Prep_dado_de_forca(Forca, local_buf);
164
165     for(buf_envio_p_oc ; buf_envio_p_oc <=9;buf_envio_p_oc++)
166         buf_envio_p[buf_envio_p_oc] = local_buf[buf_envio_p_oc];
167
168     buf_envio_p[10] = '\r';
169     buf_envio_p[11] = '\n';
170
171     transmite_mensagem (&FORCA_MAX, 13);
172     transmite_mensagem (&buf_envio_p, 12);
173 }
174
175 void Prep_dado_de_freq(int32_t value, char *buffer){
176     char teste = (value/100000)%10 + '0';
177     buffer[0] = teste;

```

```

178 teste = (value/10000)%10 + '0';
179 buffer[1] = teste;
180 teste = (value/1000)%10 + '0';
181 buffer[2] = teste;
182 teste = (value/100)%10 + '0';
183 buffer[3] = teste;
184 teste = (value/10)%10 + '0';
185 buffer[4] = teste;
186 teste = (value)%10 + '0';
187 buffer[5] = teste;
188
189 }
190
191 void Prep_dado_de_forca(float value, char *buffer)
192 {
193     if(value <= limite_celula){
194         int32_t int_part;
195         float frac_part;
196
197         if (value < 0) {
198             buffer[0] = '-';
199             value = -value;
200         }
201         else buffer[0] = '+';
202
203         int_part = (int32_t)value;
204         frac_part = value - (float)int_part;
205         buffer[1] = (int_part/10)%10 + '0';
206         buffer[2] = (int_part)%10 + '0';
207         buffer[3] = '.';
208         buffer[4] = (int32_t)(frac_part*10)%10 + '0';
209         buffer[5] = (int32_t)(frac_part*100)%10 + '0';
210         buffer[6] = (int32_t)(frac_part*1000)%10 + '0';
211         buffer[7] = (int32_t)(frac_part*10000)%10 + '0';
212         buffer[8] = (int32_t)(frac_part*100000)%10 + '0';
213
214     }else{
215         strcpy(buffer, "OUTOFRAGE");
216     }
217 }
218
219 bool Atualiza_Freq(uint32_t *nova_freq, const char *buffer){
220
221     char mensagem_esperada[5] = "FREQ:";
222     bool atualize = true;
223     *nova_freq = 0;
224
225     for(int i = 0; i<5; i++)
226         if(!atualize || !(mensagem_esperada[i] == buffer[i]))
227             atualize = false;
228     if(atualize){
229         *nova_freq += (uint32_t)(buffer[5] - '0')*100000;
230         *nova_freq += (uint32_t)(buffer[6] - '0')*10000;
231         *nova_freq += (uint32_t)(buffer[7] - '0')*1000;
232         *nova_freq += (uint32_t)(buffer[8] - '0')*100;
233         *nova_freq += (uint32_t)(buffer[9] - '0')*10;

```

```

234     *nova_freq += (uint32_t)(buffer[10] - '0');
235 }
236 return atualize;
237 }
238
239 bool GO(const char *buffer){
240     char mensagem_esperada[2] = "GO";
241     bool atualize = true;
242
243     for(int i = 0; i<2; i++)
244         if(!atualize || !(mensagem_esperada[i] == buffer[i]))
245             atualize = false;
246
247     return atualize;
248 }
249
250 bool Recalibra(const char *buffer){
251     char mensagem_esperada[5] = "RECAL";
252     bool atualize = true;
253
254     for(int i = 0; i<5; i++)
255         if(!atualize || !(mensagem_esperada[i] == buffer[i]))
256             atualize = false;
257
258     return atualize;
259 }
260
261 bool Abortar(const char *buffer){
262     char mensagem_esperada[7] = "ABORTAR";
263     bool atualize = true;
264
265     for(int i = 0; i<7; i++)
266         if(!atualize || !(mensagem_esperada[i] == buffer[i]))
267             atualize = false;
268
269     return atualize;
270 }

```

Listing 4 – StateMachine.c

```

1 #ifndef INC_CARGA_H_
2 #define INC_CARGA_H_
3
4 #include "stm32f1xx_hal.h"
5
6 #define a_g 9.81;
7 #define limite_celula 49
8
9 #define _contato GPIO_PIN_7
10 #define dio_carga GPIO_PIN_1
11 #define sck_carga GPIO_PIN_0
12
13 #define porta_contato GPIOA
14 #define porta_dio_carga GPIOA
15 #define porta_sck_carga GPIOA
16

```

```

17 void HX711_Init(GPIO_TypeDef *HX711_GPIO_PORT_DOUT ,
18                GPIO_TypeDef *HX711_GPIO_PORT_SCK ,
19                uint16_t HX711_DOUT_PIN ,
20                uint16_t HX711_SCK_PIN);
21 long HX711_Read(void);
22 void tara_celula_de_carga(void);
23 float aquisição_de_carga_N (void);
24
25 #endif

```

Listing 5 – Carga.h

```

1 #include "Carga.h"
2
3 static GPIO_TypeDef *HX711_GPIO_PORT_DOUT_LOCAL;
4 static GPIO_TypeDef *HX711_GPIO_PORT_SCK_LOCAL;
5 static uint16_t HX711_DOUT_PIN_LOCAL;
6 static uint16_t HX711_SCK_PIN_LOCAL;
7
8 static float tara = 0;
9 static float fator = 0.0000232719;
10
11 void HX711_Init(GPIO_TypeDef *HX711_GPIO_PORT_DOUT ,
12               GPIO_TypeDef *HX711_GPIO_PORT_SCK ,
13               uint16_t HX711_DOUT_PIN ,
14               uint16_t HX711_SCK_PIN) {
15
16     HX711_GPIO_PORT_DOUT_LOCAL = HX711_GPIO_PORT_DOUT;
17     HX711_GPIO_PORT_SCK_LOCAL = HX711_GPIO_PORT_SCK;
18     HX711_DOUT_PIN_LOCAL = HX711_DOUT_PIN;
19     HX711_SCK_PIN_LOCAL = HX711_SCK_PIN;
20
21     __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
22
23     GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure = {0};
24
25     GPIO_InitStructure.Pin = HX711_DOUT_PIN;
26     GPIO_InitStructure.Mode = GPIO_MODE_INPUT;
27     GPIO_InitStructure.Pull = GPIO_NOPULL;
28     HAL_GPIO_Init(HX711_GPIO_PORT_DOUT, &GPIO_InitStructure);
29
30     GPIO_InitStructure.Pin = HX711_SCK_PIN;
31     GPIO_InitStructure.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
32     GPIO_InitStructure.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_HIGH;
33     HAL_GPIO_Init(HX711_GPIO_PORT_SCK, &GPIO_InitStructure);
34
35     HAL_GPIO_WritePin(HX711_GPIO_PORT_SCK, HX711_SCK_PIN, GPIO_PIN_RESET);
36 }
37
38
39 long HX711_Read(void) {
40
41     long value = 0;
42     while (HAL_GPIO_ReadPin(HX711_GPIO_PORT_DOUT_LOCAL, HX711_DOUT_PIN_LOCAL));
43
44     for (uint8_t i = 0; i < 24; i++) {

```

```

45     HAL_GPIO_WritePin(HX711_GPIO_PORT_SCK_LOCAL, HX711_SCK_PIN_LOCAL,
46                       GPIO_PIN_SET);
47     value = (value << 1) | HAL_GPIO_ReadPin(HX711_GPIO_PORT_DOUT_LOCAL,
48                                               HX711_DOUT_PIN_LOCAL);
49     HAL_GPIO_WritePin(HX711_GPIO_PORT_SCK_LOCAL, HX711_SCK_PIN_LOCAL,
50                       GPIO_PIN_RESET);
51 }
52
53 HAL_GPIO_WritePin(HX711_GPIO_PORT_SCK_LOCAL, HX711_SCK_PIN_LOCAL,
54                   GPIO_PIN_SET);
55 HAL_GPIO_WritePin(HX711_GPIO_PORT_SCK_LOCAL, HX711_SCK_PIN_LOCAL,
56                   GPIO_PIN_RESET);
57
58 if (value & 0x800000)
59     value |= 0xFF000000;
60
61 return value;
62 }
63
64 void tara_celula_de_carga(void){
65     for(int i = 0;i<10;i++){
66         tara+=(float)HX711_Read();
67     }
68     tara = tara*0.1;
69 }
70
71 float aquisição_de_carga_N (void){
72     float Força_aplicada_na_cel = 0;
73     float leitura = (float)HX711_Read();
74     Força_aplicada_na_cel = ((float)leitura - tara) * fator;
75
76     return Força_aplicada_na_cel;
77 }

```

Listing 6 – Carga.c

```

1  #ifndef INC_COMUNICACAO_H_
2  #define INC_COMUNICACAO_H_
3
4  #include "stm32f1xx_hal.h"
5  #include <stdbool.h>
6
7  #define tamnho_buf          28
8
9
10 bool verifica_se_tem_comando_pendente(uint8_t* _buffer, uint8_t tam);
11 void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart);
12 void config_comunicacao(UART_HandleTypeDef *huart);
13 void transmite_mensagem (uint8_t* _buffer, uint8_t _tam);
14
15 #endif

```

Listing 7 – Comunicacao.h

```

1  #include "Comunicacao.h"
2

```

```

3 static volatile uint8_t rx_byte[tamaho_buf];
4 static volatile uint8_t Buffer_[tamaho_buf];
5 static uint8_t Buffer_count = 0;
6 static bool msg_para_ser_tratada = false;
7
8 UART_HandleTypeDef *_huart1;
9
10 void config_comunicacao(UART_HandleTypeDef *huart){
11     _huart1 = huart;
12     HAL_UART_Receive_IT(_huart1, (uint8_t*)&rx_byte, 1);
13 }
14
15 void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart)
16 {
17     if (huart->Instance == USART1)
18     {
19         Buffer_[Buffer_count] = rx_byte[0];
20         Buffer_count++;
21         if(rx_byte[0] != '\n') {
22             HAL_UART_Receive_IT(_huart1, (uint8_t*)&rx_byte, 1);
23             msg_para_ser_tratada = true;
24         }
25     }
26 }
27
28 void transmite_mensagem (uint8_t* _buffer, uint8_t _tam){
29     HAL_UART_Transmit_IT(_huart1, _buffer, _tam);
30     while (__HAL_UART_GET_FLAG(_huart1, UART_FLAG_TC) == RESET) { }
31 }
32 }
33
34 bool verifica_se_tem_comando_pendente(uint8_t* _buffer, uint8_t tam){
35     if(msg_para_ser_tratada) {
36         int i = 0;
37         while(Buffer_[i] != '\n' || i >= tam) i++;
38         if(i >= tam){
39             msg_para_ser_tratada = false;
40             HAL_UART_Receive_IT(_huart1, (uint8_t*)&rx_byte, 1);
41             return false;
42         }
43         for (int j=0; j < i; j++) _buffer[j] = Buffer_[j];
44         for(int k = 0; k<= tam; k++)Buffer_[k] = '\0';
45
46         msg_para_ser_tratada = false;
47         HAL_UART_Receive_IT(_huart1, (uint8_t*)&rx_byte, 1);
48         return true;
49     }
50
51     msg_para_ser_tratada = false;
52     return false;
53 }

```

Listing 8 – Comunicacao.c

```

1 #ifndef __HBRIDGE_H
2 #define __HBRIDGE_H

```

```

3
4 #include <stdint.h>
5 #include <math.h>
6 #include <stdbool.h>
7 #include "stm32f1xx_hal.h"
8
9 #define ARR_MAX 0xFFFF
10 #define PSC_MAX 0xFFFF
11
12 #define timer_clk_hz 72000000
13
14 #define lado_ponte_H1      GPIO_PIN_5
15 #define lado_ponte_H2      GPIO_PIN_6
16
17 #define porta_ponte_H      GPIOA
18
19 typedef struct {
20     uint16_t psc;
21     uint16_t arr;
22 } TimerConfig_t;
23
24 void setup_tim1_pwm_complementary(void);
25
26 void setup_tim1_gpio(void);
27
28 TimerConfig_t calculate_pwm_params_E_Atualiza( uint32_t target_freq_hz);
29
30
31 uint32_t retorna_frequencia_atual(void);
32 bool Drivers_state(void);
33 void desabilita_drivers(void);
34 void habilita_drivers(void);
35
36 #endif

```

Listing 9 – HBridge.h

```

1
2 #include "HBridge.h"
3
4 static TimerConfig_t config = {0, 359};
5 static uint32_t frequencia = 20000;
6 static bool Drivers_on = false;
7
8
9 void setup_tim1_gpio(void)
10 {
11     RCC->APB2ENR |= RCC_APB2ENR_IOPAEN | RCC_APB2ENR_IOPBEN | RCC_APB2ENR_AFIOEN
12     ;
13
14     GPIOA->CRH &= ~((0xF << (0 * 4)) | (0xF << (1 * 4)));
15     GPIOA->CRH |= ((0xB << (0 * 4)) | (0xB << (1 * 4)));
16
17     GPIOB->CRH &= ~((0xF << (5 * 4)) | (0xF << (6 * 4)));
18     GPIOB->CRH |= ((0xB << (5 * 4)) | (0xB << (6 * 4)));
19 }

```

```

19
20 void setup_tim1_pwm_complementary(void)
21 {
22     RCC->APB2ENR |= RCC_APB2ENR_TIM1EN;
23
24     TIM1->PSC = config.psc;
25     TIM1->ARR = config.arr;
26     TIM1->CCR1 = 180;
27     TIM1->CCR2 = 180;
28
29     TIM1->CCMR1 |= (6 << 4) | (1 << 3);
30     TIM1->CCMR1 |= (6 << 12) | (1 << 11);
31
32     TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC1E | TIM_CCER_CC1NE;
33     TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC2E | TIM_CCER_CC2NE;
34
35     TIM1->BDTR |= TIM_BDTR_MOE
36                 | (36 & 0x7F);
37     TIM1->CR1 |= TIM_CR1_ARPE;
38     TIM1->EGR |= TIM_EGR_UG;
39     TIM1->CR1 |= TIM_CR1_CEN;
40 }
41
42 TimerConfig_t calculate_pwm_params_E_Atualiza( uint32_t target_freq_hz)
43 {
44     if(target_freq_hz > 200000 || target_freq_hz < 20000) return config;
45
46     frequencia = target_freq_hz;
47
48     uint32_t ideal_total = timer_clk_hz / target_freq_hz;
49
50     for (uint32_t psc = 0; psc <= PSC_MAX; psc++) {
51         uint32_t arr = ideal_total / (psc + 1);
52
53         if (arr <= ARR_MAX) {
54             config.psc = psc;
55             config.arr = arr - 1;
56
57             TIM1->CR1 &= ~TIM_CR1_CEN;
58             TIM1->PSC = config.psc;
59             TIM1->ARR = config.arr;
60             TIM1->CCR1 = (config.arr + 1) / 2;
61             TIM1->CCR2 = TIM1->CCR1;
62             TIM1->EGR |= TIM_EGR_UG;
63             TIM1->CR1 |= TIM_CR1_CEN;
64
65             return config;
66         }
67     }
68
69     return config;
70 }
71
72 uint32_t retorna_frequencia_atual(void){
73     return frequencia;
74 }

```

```

75
76 bool Drivers_state(void){
77     if(Drivers_on) return true;
78     return false;
79 }
80
81 void habilita_drivers(void){
82     Drivers_on = true;
83     HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_RESET);
84     HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_6, GPIO_PIN_RESET);
85 }
86
87 void desabilita_drivers(void){
88     Drivers_on = false;
89     HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_SET);
90     HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_6, GPIO_PIN_SET);
91 }

```

Listing 10 – HBridge.c

## .2 CÓDIGO FONTE DO ARDUINO

```

1  #include "HX711.h"
2
3  #define LOADCELL_DOUT_PIN  3
4  #define LOADCELL_SCK_PIN  2
5
6  HX711 scale;
7
8  float CALIBRATION_FACTOR = 418579.88127f;
9  const float G = 9.80665f;
10
11 void setup() {
12     Serial.begin(115200);
13     while (!Serial) { }
14
15     Serial.println(F("Iniciando HX711..."));
16
17     scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN);
18
19     scale.set_gain(128);
20
21     delay(1000);
22
23     Serial.println(F("Fazendo tara (sem carga na c lula)..."));
24     scale.tare(50);
25
26     Serial.println(F("Tara conclu da.));
27
28     scale.set_scale(CALIBRATION_FACTOR);
29
30     Serial.println(F("Sistema pronto. Coloque cargas para medir.));
31 }
32

```

```
33 void loop() {
34
35     if (scale.is_ready()) {
36         float mass_kg = scale.get_units(1);
37         float force_N = mass_kg * G;
38         Serial.print(F("Massa: "));
39         Serial.print(mass_kg, 3);
40         Serial.print(F(" kg | Forca: "));
41         Serial.print(force_N, 3);
42         Serial.println(F(" N"));
43
44     } else {
45         Serial.println(F("HX711 nao pronto para leitura."));
46     }
47
48     delay(100);
49 }
```

Listing 11 – main.c