

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Marco Túlio Vilaça Diniz

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE ROTAÇÃO

Betim
2026

MARCO TÚLIO VILAÇA DINIZ

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE ROTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

Betim

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

D585d Diniz, Marco Túlio Vilaça

Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de rotação / Marco Túlio Vilaça Diniz. – 2026.

44 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

1. Sensores. 2. Arduino. 3. Máquinas rotativas. 4. Medição de rotação. 5. Engenharia Mecânica. I. Diniz, Marco Túlio Vilaça. II. Título.

CDU: 681.51



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Mecânica
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 03 dias do mês de fevereiro do ano de 2026, às 20:15, nas dependências do IFMG - *campus* Betim, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Gabriel Mendes de Almeida Carvalho e demais membros, Fagner Guilherme Ferreira Coelho e Adriano Ribeiro Marinho. Nesta ocasião o discente Marco Túlio Vilaça Diniz do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com registro acadêmico de número 0024736 do IFMG – *Campus* Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE ROTAÇÃO” e foi APROVADO, com 80 pontos (oitenta) pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o consequente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 20 dias úteis, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e consequente reprovação.

A sessão foi encerrada às 21h15. Para constar, eu, Gabriel Mendes de Almeida Carvalho, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora.

Assinam abaixo, com autenticidade, os membros da banca.

Documento assinado digitalmente
gov.br GABRIEL MENDES DE ALMEIDA CARVALHO
Data: 11/02/2026 21:34:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

Documento assinado digitalmente
gov.br FAGNER GUILHERME FERREIRA COELHO
Data: 12/02/2026 11:09:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fagner Guilherme Ferreira Coelho

Documento assinado digitalmente
gov.br ADRIANO RIBEIRO MARINHO
Data: 12/02/2026 13:40:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Adriano Ribeiro Marinho

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marisa e Marcos Antônio, por serem a base de tudo. Sem o apoio incondicional, o incentivo nos momentos difíceis e o amor de vocês, eu não teria chegado até aqui. Este trabalho é, acima de tudo, um reflexo dos valores que me ensinaram.

Aos meus professores, em especial àqueles que me acompanham desde 2015. Ao longo desses 10 anos, vocês deixaram de ser apenas mestres para se tornarem mentores, referências e amigos. Agradeço pela paciência, pelo conhecimento compartilhado e por acreditarem no meu potencial desde os meus primeiros passos na instituição.

Ao IFMG Campus Betim, que foi minha segunda casa por tanto tempo. Entre salas de aula, corredores e laboratórios, não apenas me formei profissionalmente, mas cresci como cidadão. Sigo com a gratidão de quem leva o IFMG no coração e na história.

RESUMO

O monitoramento de máquinas rotativas é essencial para a manutenção preditiva e a eficiência industrial. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação de um protótipo de baixo custo para medição de rotação (RPM) utilizando a plataforma Arduino Uno R3 integrada a sensores baseados no Efeito *Hall*. A metodologia consistiu na construção do protótipo e na realização de ensaios experimentais controlados utilizando um torno mecânico de alta precisão (Nardini Nodus 220 Gold) como referência. Foram testados três modelos de sensores — KY-024 (linear analógico/digital), KY-003 e 3144E (digitais chaveadores) — em quatro velocidades distintas (30, 95, 150 e 300 RPM), com cinco repetições cada, totalizando 60 ensaios. Os resultados demonstraram que o sensor KY-024 apresentou desempenho satisfatório em baixas rotações (erro relativo < 4% até 95 RPM), porém exibiu saturação de leitura em aproximadamente 161 RPM quando submetido a rotação de 150 e 300 RPM. Os sensores KY-003 e 3144E apresentaram erro sistemático de subestimação de aproximadamente 50% em toda a faixa testada. A confirmação visual da detecção do campo magnético indicado por um LED combinada com a perda de contagem digital indica que o problema não reside na velocidade de resposta dos componentes — visto que 300 RPM equivale a apenas 5 Hz, muito abaixo da capacidade nominal dos sensores — mas possivelmente em fatores relacionados à configuração da interface sensor-microcontrolador, como detecção de apenas uma borda do sinal (FALLING) ou sensibilidade unipolar aos pólos do ímã. Conclui-se que o Efeito *Hall* é conceitualmente viável para monitoramento de rotação em baixas velocidades, porém a implementação industrial demanda investigação aprofundada da configuração de interrupções e tratamento de sinais digitais.

Palavras-chave: Efeito *Hall*. Arduino. Monitoramento de Rotação. Sensores Industriais. Erro Sistemático.

ABSTRACT

The monitoring of rotating machinery is essential for predictive maintenance and industrial efficiency. This study presents the development of a low-cost prototype for measuring rotations per minute (RPM) using the Arduino Uno R3 platform and Hall Effect sensors. The methodology involved experimental trials using a high-precision lathe (Nardini Nodus 220 Gold) as a reference to validate three sensor models: KY-024, KY-003, and 3144E. Sixty trials were conducted covering speeds of 30, 95, 150, and 300 RPM. The results showed that the linear sensor KY-024 performed best at low speeds but saturated at 300 RPM. Conversely, the digital sensors KY-003 and 3144E exhibited a systematic underestimation error of approximately 50% across all tested ranges. Data analysis, cross-referenced with visual verification of signal LEDs, indicates that the failure does not stem from sensor frequency limitations—since 300 RPM equates to only 5 Hz, well below these components' limits—but rather from inconsistencies in the pulse counting logic and microcontroller interrupt configuration. It is concluded that Hall technology is viable for this application, provided there are improvements in the edge detection algorithm and signal processing to eliminate the identified reading errors.

Keywords: Hall Effect. Arduino. Rotation Monitoring. Industrial Sensors. Systematic Error.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Arduino Uno R3.....	23
Figura 2 - Cabo USB para Arduino.....	23
Figura 3 - Jumpers Macho/Fêmea.....	24
Figura 4 - Módulo Sensor Hall Magnético KY-024.....	24
Figura 5 - Módulo Sensor Hall KY-003.....	25
Figura 6 - Módulo Sensor de Efeito Hall 3144E.....	25
Figura 7 - Ímã permanente.....	27
Figura 8 - Torno mecânico Nardini Nodus 220 Gold.....	27
Figura 9 - Fita isolante.....	28
Figura 10 - Diagrama conexões sensores x arduino.....	28
Figura 11 - Posicionamento do ímã no torno.....	30
Figura 12 - Sensor em funcionamento.....	30
Figura 13 - Torno com aparato posicionado.....	31
Figura 14 - Potenciômetro ajustável no Módulo Sensor Hall Magnético KY-024..	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultados sensor Hall magnético KY-024.....	34
Gráfico 2 – Resultados Módulo Sensor Hall KY-003.....	36
Gráfico 3 – Resultados Módulo Sensor de Efeito Hall 3144E.....	38
Gráfico 4 – Comparação Tornos vs Sensores.....	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação dos Módulos de Sensores utilizados.....	26
Quadro 2 – Leituras do Módulo Sensor Hall Magnético KY-024.....	33
Quadro 3 – Leituras do Módulo Sensor Hall KY-003.....	35
Quadro 4 – Leituras do Módulo Sensor de Efeito Hall 3144E.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

NBR - Normas Técnicas Brasileiras

TCC - Trabalho de Conclusão de Curso

LED - *Light Emitting Diode*

RPM - Rotações Por Minuto

USB - *Universal Serial Bus*

EA - Erro Absoluto

ER - Erro Relativo

ES - Erro Sistemático

LISTA DE SÍMBOLOS

@	Arroba
τ	Constante de tempo do sistema de primeira ordem
©	Copyright
F	Força (referente à força de Lorentz que atua sobre os portadores de carga)
q	Carga (dos portadores, elétrons ou lacunas)
v	Velocidade (vetor de velocidade dos portadores de carga)
B	Campo Magnético (intensidade do campo magnético)
V_H	Tensão Hall (diferença de potencial transversal gerada)
I	Corrente Elétrica
d	Espessura do material condutor
n	Concentração dos portadores de carga
vd	Velocidade de deriva ou de arraste
w	Largura do condutor
A	Área da seção transversal da barra condutora
R_H	Coeficiente Hall
$G(s)$	Função de transferência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Justificativa.....	16
1.2 Objetivos.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 O Efeito Hall: Conceito, Fundamentos Físicos e Aplicações.....	18
2.2 Sensores de Efeito Hall: Tipos, Funcionamento e Características.....	19
2.2.1 Tipos de Sensores.....	19
2.2.2 Princípio de Funcionamento.....	20
2.2.3 Características Técnicas.....	20
2.3 A Necessidade de Dispositivos Contadores de Rotação.....	21
3 METODOLOGIA.....	23
3.1 Materiais Utilizados.....	23
3.2 Método do Desenvolvimento do Protótipo.....	28
3.2.1 Configuração Experimental e Coleta de Dados.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.2 Desempenho do Módulo Sensor Hall KY-003.....	34
4.3 Desempenho do Módulo Sensor de Efeito Hall 3144E.....	36
4.4 Discussão Geral dos Resultados.....	38
5 CONCLUSÃO.....	42
APÊNDICE A – CÓDIGO UTILIZADO NO ARDUINO.....	46

1 INTRODUÇÃO

Segundo Kardec e Nascif (2013), o monitoramento de máquinas rotativas constitui uma prática amplamente consolidada na indústria global, exercendo um papel crucial na preservação da eficiência e da confiabilidade operacional dos sistemas produtivos. Equipamentos como motores, turbinas, bombas e compressores representam elementos vitais em diversos setores, incluindo manufatura, transporte, geração de energia e processamento de materiais.

Essa atividade envolve a aplicação de tecnologias de sensoriamento, selecionadas conforme as particularidades do ambiente industrial e das características operacionais de cada tipo de máquina. Entre os parâmetros mais relevantes acompanhados destaca-se a medição da rotação (RPM), a qual fornece informações essenciais acerca do desempenho, da eficiência e do estado funcional dos equipamentos monitorados (KARDEC; NASCIF, 2013).

A rotação pode ser aferida por meio de diversos princípios físicos e tecnologias, como dínamos, sensores ópticos e indutivos, conforme detalham Thomazini e Albuquerque (2011). A aplicação correta desses dispositivos no monitoramento contínuo oferece benefícios significativos, permitindo a integração a sistemas de manutenção preditiva e a otimização dos processos produtivos. Esses fatores contribuem para uma tomada de decisão mais estratégica, a otimização dos processos produtivos e a redução de custos operacionais.

O aumento da complexidade dos sistemas industriais tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de soluções automatizadas voltadas ao monitoramento de máquinas. Avanços em sensores de alta precisão, interfaces integradas e metodologias inteligentes de controle vêm sendo explorados com o objetivo de elevar os níveis de confiabilidade e eficiência econômica nos processos industriais (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011; KARDEC; NASCIF, 2013).

Nesse contexto, o presente projeto propõe o desenvolvimento de um protótipo de sistema dedicado ao monitoramento e registro da rotação de máquinas industriais, com ênfase na melhoria da eficiência operacional, segurança e

disponibilidade dos equipamentos. O sistema será composto por sensores baseados no efeito *Hall*, integrados a plataformas de processamento como o Arduino, possibilitando a coleta, transmissão, com baixo custo e análise contínua dos dados. Essa abordagem viabiliza o monitoramento remoto e em tempo real das condições de operação, fortalecendo estratégias de manutenção mais inteligentes e eficazes.

1.1 Justificativa

Com o desenvolvimento da indústria, surge a necessidade de verificar e controlar os processos produtivos de maneira cada vez mais rigorosa. Essa necessidade, aliada à inovação tecnológica, evidencia que a coleta de dados por meio de sensores é a melhor base para a tomada de decisões sobre processos produtivos. A implementação desses dispositivos não apenas assegura a melhoria da qualidade dos produtos — ao permitir um monitoramento em tempo real que minimiza variações e defeitos — como também é um fator determinante para a redução de custos operacionais, evitando o desperdício de matéria-prima e otimizando o uso de recursos energéticos e humanos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O propósito deste projeto é a concepção e desenvolvimento de um protótipo destinado ao monitoramento preciso e registro da rotação de máquinas. Este trabalho visa criar uma solução capaz de oferecer uma análise das variáveis críticas durante a operação de uma máquina rotativa, contribuindo assim para aprimorar a qualidade, eficiência e segurança desse procedimento fundamental em diversas indústrias.

1.2.2 Objetivo específico

1. Realizar testes do protótipo em diferentes sensores e parâmetros de rotação para validar sua eficácia e confiabilidade.

2. Integrar tecnologias de comunicação para permitir a transmissão dos dados de monitoramento e registros para análise.

3. Implementar um sistema com sensor que possa ter uma boa exatidão relacionado a referencial para a coleta em tempo real de dados durante o processo de rotação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Fundamentação Teórica deste trabalho apresentará o efeito *Hall* e os princípios físicos que o regem, na tecnologia dos sensores baseados nesse fenômeno e na intrínseca necessidade de sistemas precisos de contagem de rotação em diversos contextos industriais e tecnológicos. Além disso, este capítulo abordará alguns conceitos metrológicos que serão importantes no trabalho.

2.1 O Efeito *Hall*: Conceito, Fundamentos Físicos e Aplicações

O efeito *Hall* é um fenômeno físico caracterizado pelo surgimento de uma diferença de potencial elétrico transversal à corrente elétrica quando um condutor ou semicondutor é atravessado por uma corrente elétrica e submetido a um campo magnético perpendicular. Esse efeito foi descoberto em 1879 por Edwin H. *Hall*, que observou o desvio dos portadores de carga sob a ação de um campo magnético, permitindo identificar se tais portadores possuem carga positiva ou negativa (TIPLER, 2009, p. 330).

De acordo com Rezende Neto et al. (2010, p. 11), o efeito consiste na geração de uma diferença de potencial através de um condutor percorrido por corrente elétrica quando este é submetido a um campo magnético. Isso ocorre devido à força de Lorentz, que atua sobre os portadores de carga (elétrons ou lacunas), desviando-os para um dos lados do material. Essa força é dada por:

$$F = q(v \times B)$$

Esse desvio provoca o acúmulo de cargas em uma das faces do material, resultando em uma tensão transversal ao fluxo da corrente e ao campo magnético, denominada tensão *Hall* (V_H) (TIPLER, 2009, p. 14).

A magnitude da tensão Hall depende diretamente da corrente elétrica (I) e da intensidade do campo magnético (B), e inversamente da espessura do material (d) e da concentração dos portadores de carga (n). Uma das expressões que descrevem a tensão *Hall* é:

$$V_H = vdBw$$

onde v_d é a velocidade de deriva e w é a largura do condutor. A corrente elétrica pode ser expressa como:

$$|I| = |q|nvdA$$

para uma barra com seção transversal $A = w \cdot d$. O coeficiente *Hall*, definido como $R_H = \frac{V_H}{I}$, é amplamente utilizado para determinar a concentração dos portadores de carga no material (TIPLER, 2009, p. 14).

O efeito *Hall* é fundamental para o desenvolvimento de diversos dispositivos, especialmente sensores magnéticos. Um sistema baseado no efeito *Hall* e microcontroladores como o Arduino permite medir valores da intensidade do campo magnético com precisão (REZENDE NETO et al., 2010, p. 1–2). A automação da medição, por meio de sensores móveis em trilhos com controle milimétrico, garante maior precisão e confiabilidade nos resultados do que métodos manuais, além de facilitar a visualização de conceitos relacionados à distribuição espacial de campos magnéticos (REZENDE NETO et al., 2010, p. 2).

2.2 Sensores de Efeito *Hall*: Tipos, Funcionamento e Características

Os sensores de efeito *Hall* são dispositivos eletrônicos que convertem a presença ou a intensidade de um campo magnético em um sinal elétrico. Eles são amplamente utilizados devido à sua robustez, precisão, tamanho compacto e custo relativamente baixo.

2.2.1 Tipos de Sensores

Sensores Digitais (Chaveadores): Funcionam como interruptores que geram sinais digitais (nível alto ou baixo) quando o campo magnético ultrapassa um limiar. São ideais para detecção de posição, contagem de pulsos, medição de

velocidade angular, entre outros. Geralmente incluem circuitos com *Schmitt Trigger*, oferecendo histerese para evitar comutação indevida em campos instáveis.

Sensores Analógicos (Lineares): Produzem um sinal de saída proporcional à intensidade do campo magnético. São utilizados em aplicações que exigem medição contínua e precisa, como sensores de corrente, detecção de nível de líquidos e controle de motores.

2.2.2 Princípio de Funcionamento

Um sensor típico é composto por uma camada fina de material semicondutor (como silício, arsenieto de gálio ou germânio), pela qual passa uma corrente constante. Quando um campo magnético é aplicado perpendicularmente a essa camada — por exemplo, com a aproximação de um ímã — forma-se uma tensão *Hall* transversal. Essa tensão é amplificada e tratada por circuitos integrados no encapsulamento do sensor, gerando o sinal de saída.

2.2.3 Características Técnicas

Sensibilidade: Capacidade de detectar variações sutis no campo magnético.

Linearidade: Grau de correspondência entre a intensidade do campo e a saída do sensor (para sensores analógicos).

Histerese: Diferença entre os pontos de ativação e desativação nos sensores digitais, que evita oscilações indesejadas.

Faixa de Operação: Intervalo de intensidades do campo magnético que o sensor pode detectar com precisão.

Tempo de Resposta: Velocidade com que o sensor reage às mudanças no campo magnético.

Imunidade a Ruídos: Capacidade de operar em ambientes com interferências eletromagnéticas.

Temperatura de Operação: Faixa térmica dentro da qual o sensor mantém suas características.

A escolha do sensor mais adequado depende dos requisitos de aplicação, ambiente de uso e restrições de custo.

2.3 A Necessidade de Dispositivos Contadores de Rotação

Segundo Thomazini e Albuquerque (2011), o monitoramento da rotação é essencial em diversos processos industriais e tecnológicos. Dispositivos contadores de rotação — como tacômetros e *encoders* — são indispensáveis para garantir eficiência, segurança, precisão e durabilidade dos sistemas. A seguir, destacam-se suas principais funções:

Controle de Qualidade e Processos: A velocidade de rotação em motores e esteiras influencia diretamente a qualidade do produto final. Monitoramento contínuo garante parâmetros ideais e reduz defeitos.

Manutenção Preditiva: Alterações na rotação podem indicar falhas mecânicas eminentes, como desgaste, desalinhamento ou problemas em rolamentos. Sensores permitem a detecção precoce e reduzem paradas inesperadas.

Segurança Operacional: Em máquinas pesadas, a rotação fora dos limites pode causar acidentes ou falhas críticas. Sistemas de contagem fornecem *feedback* em tempo real, permitindo desligamento automático ou alertas preventivos.

Eficiência Energética: Controlar a rotação de motores é essencial para evitar desperdícios e otimizar o consumo de energia, promovendo sustentabilidade e economia.

Automação e Robótica: A precisão no controle de rotação é vital para o funcionamento de sistemas automatizados e robóticos, garantindo sincronia e posicionamento exato.

Desenvolvimento de Protótipos: Em fase de testes, a medição da rotação é crucial para validar o desempenho e ajustar o projeto de novos equipamentos.

A capacidade do efeito *Hall* de converter campos magnéticos em sinais elétricos, aliada à facilidade de acoplamento de ímãs a eixos rotativos, torna os sensores de efeito *Hall* uma solução eficiente para sistemas de contagem de rotação. A implementação de um protótipo com essa tecnologia, conforme proposto neste trabalho, atende diretamente à demanda por monitoramento confiável e de alta precisão em diversos setores.

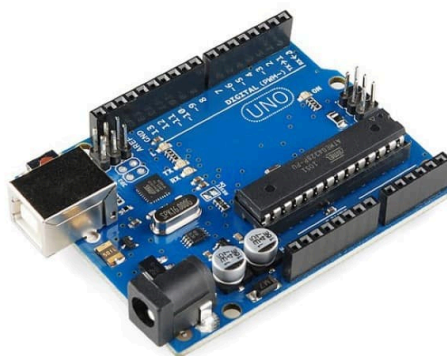
3 METODOLOGIA

A metodologia adotada focou na construção de um protótipo e na realização de testes experimentais para validar a viabilidade do uso de sensores *Hall* nesse contexto. Este capítulo apresentará primeiramente os materiais e a metodologia

3.1 Materiais Utilizados

Arduino Uno R3: Placa microcontroladora principal.

Figura 1 – Arduino Uno R3



Fonte: MAKERHERO, [20--].

Cabo USB para Arduino: Para alimentação e comunicação com o computador.

Figura 2 – Cabo USB para Arduino



Fonte: CABO USB para Arduino, [20--].

Jumpers Macho / Fêmea : Para as conexões elétricas entre os componentes.

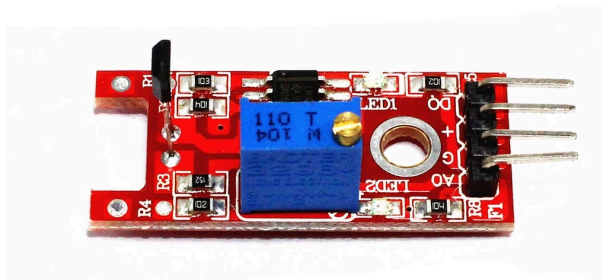
Figura 3 – Jumpers Macho/Fêmea



Fonte: JUMPERS Macho/Fêmea, [20--].

Módulo Sensor *Hall* Magnético KY-024: Um dos sensores de campo magnético testados.

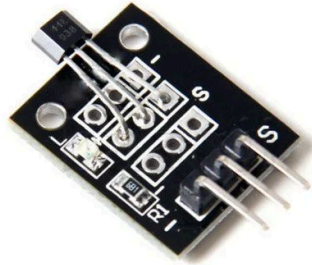
Figura 4 - Módulo Sensor *Hall* Magnético KY-024



Fonte: ELECTRONILAB, [20--].

Módulo Sensor *Hall* KY-003: Outro sensor de campo magnético testado.

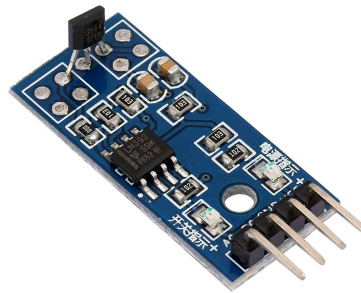
Figura 5 – Módulo Sensor *Hall* KY-003



Fonte: ELETROGATE, [20--].

Módulo Sensor de Efeito *Hall* 3144E: O terceiro sensor de campo magnético testado.

Figura 6 – Módulo Sensor de Efeito *Hall* 3144E



Fonte: ELETROPEÇAS, [20--]

Quadro 1 – Comparação dos Módulos de Sensores utilizados

Parâmetro	KY-024 (Módulo Linear)	KY-003 (Módulo <i>Switch</i>)	Módulo 3144E (<i>Switch</i> Unipolar)
Tensão de operação	3,3V a 5V	3,3V a 5V	4,5V a 24V
Tipo (Saída)	Dual: Analógica e Digital	Digital: Chave/ <i>Switch</i>	Digital: Coletor Aberto
Sensibilidade ajustável	Sim: via potenciômetro manual	Não	Não: fixa por hardware
Sensibilidade mínima (25 °C)	50 Gauss	50 Gauss	70 Gauss
Sensibilidade (Variações)	Alta, permite detectar mudanças sutis no campo linear.	Otimizada para detecção de presença/ausência.	Alta/Fixa: projetada para atuar com ímãs pequenos.
Linearidade	Sim (Analógica): sinal proporcional à intensidade.	Não aplicável: saída binária.	Não aplicável: saída binária.
Histerese	Dupla: do sensor e do comparador LM393.	Nativa: evita oscilações no chaveamento.	20 a 55 Gauss: garante chaveamento limpo .
Faixa de Operação	Relativa ao ajuste do usuário (proximidade).	Detecta campos para atuar como interruptor.	Unipolar: ativa com polos específicos (N ou S).
Tempo de Resposta	Depende do circuito do amplificador/comparador .	Rápido para detecção em tempo real.	2,0µs: tempo de subida e descida do sinal.
Imunidade a Ruídos	Alta: filtragem via comparador e histerese.	Boa: tecnologia de estado sólido.	Superior: possui regulador e proteção interna.
Temperatura de Operação	Padrão de eletrônica comum (0°C a 70°C est.).	Padrão de eletrônica comum.	-40°C a +85°C (Sufixo E) .

Fonte: Adaptado de Allegro Microsystems (2002) e Joy-IT (2018, 2021).

Ímã de Neodímio N35 ($\varnothing$ 12x2 mm): Fonte de indução magnética para os sensores. Apresenta densidade de fluxo de 2000 a 2600 Gauss em sua superfície em um único disco, garantindo o acionamento confiável dos dispositivos de efeito *Hall*.

Figura 7 – Ímã permanente



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Torno mecânico *Nardini Nodus 220 Gold*: Equipamento de precisão utilizado para gerar rotações controladas.

Figura 8 – Torno mecânico *Nardini Nodus 220 Gold*



Fonte: NARDINI, [2026]

Fita isolante: Utilizada para fixar o sensor próximo ao ímã.

Figura 9 - Fita isolante

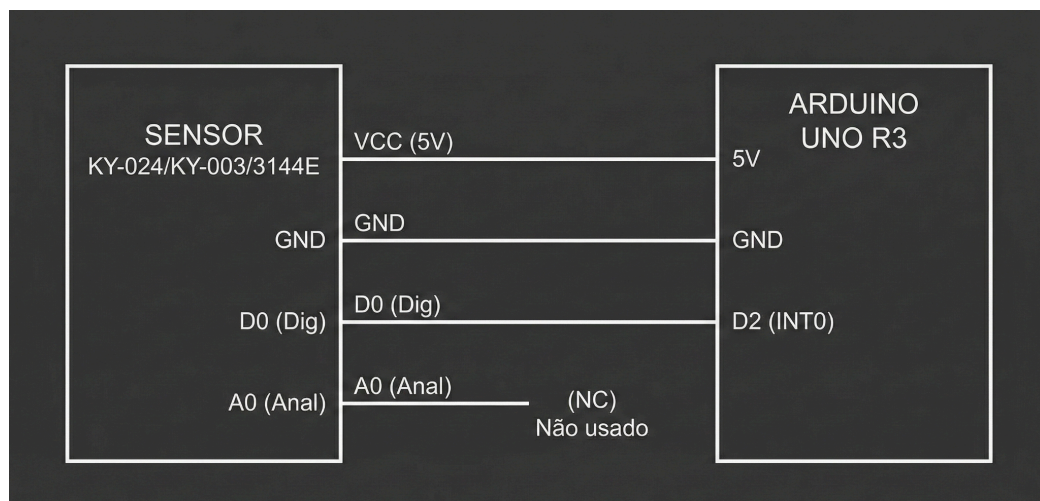


Fonte: ELASTOBOR, [20--]

3.2 Método do Desenvolvimento do Protótipo

O protótipo foi concebido como um sistema integrado, tendo como base a plataforma Arduino Uno R3. Este microcontrolador foi escolhido por sua capacidade de processamento, flexibilidade na programação (código no apêndice A) e ampla compatibilidade com diversos módulos e sensores. Para a alimentação e comunicação com o computador, utilizou-se um cabo USB.

Figura 10 – Diagrama conexões sensores x arduino



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

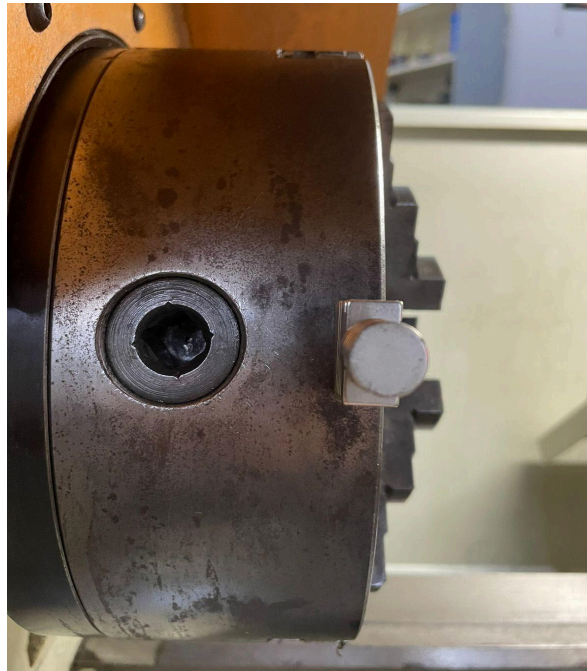
A detecção dos campos magnéticos foi realizada por meio de sensores *Hall*, que são dispositivos capazes de gerar uma tensão proporcional à intensidade de um campo magnético. Para a experimentação e comparação de desempenho, foram empregados três modelos distintos de sensores Hall: o Módulo Sensor Hall Magnético KY-024, o Módulo Sensor Hall KY-003 e o Módulo Sensor de Efeito Hall 3144E. Essa escolha visou identificar qual dos modelos apresentaria a maior precisão e confiabilidade na detecção e contagem dos eventos de campo magnético. A conexão dos sensores ao Arduino Uno R3 foi realizada utilizando jumpers macho/fêmea de 20cm, garantindo a flexibilidade na montagem dos circuitos.

3.2.1 Configuração Experimental e Coleta de Dados

Para simular um ambiente de máquina rotativa e permitir a aferição precisa, um ímã permanente foi firmemente fixado em um torno mecânico de alta precisão. A utilização do torno mecânico foi crucial para o experimento, pois garantiu rotações controladas e conhecidas, servindo como um parâmetro de referência confiável para a validação do sistema desenvolvido.

O sensor Hall foi posicionado a uma distância aproximada de 20 mm do ímã, permitindo a detecção do campo magnético a cada rotação completa do torno. Para fins de monitoramento, utilizou-se o LED integrado ao módulo, que se aciona automaticamente ao identificar a presença do campo no posicionamento.

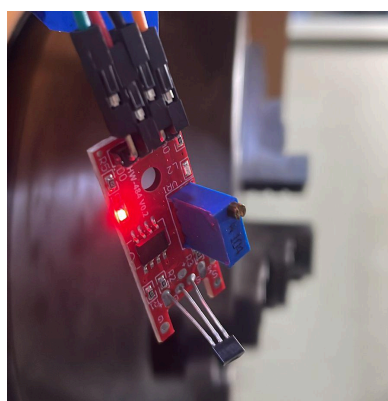
Figura 11 – Posicionamento do ímã no torno



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A cada passagem do ímã pelo sensor, um pulso elétrico era gerado e enviado para o Arduino Uno R3.

Figura 12 – Sensor em funcionamento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O microcontrolador foi programado para contabilizar esses pulsos, o que permitiu determinar o número de rotações por minuto (RPM) em tempo real. Essa abordagem possibilitou a análise da viabilidade do uso do sensor Hall para monitorar

as rotações do maquinário, comparando as contagens do sistema com as RPMs predefinidas e aferidas do torno mecânico.

Figura 13 – Torno com aparato posicionado



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

3.3 Protocolo de Testes e Análise de Desempenho

Para avaliar o desempenho e a precisão dos diferentes sensores Hall, foram estabelecidas quatro velocidades de rotação em torno mecânico: 300 RPM, 150 RPM, 95 RPM e 30 RPM. Para cada uma dessas velocidades, o experimento foi repetido com cada um dos três sensores Hall individualmente. Cada módulo de sensor Hall foi testado 5 vezes em cada velocidade de rotação do torno, totalizando 60 ensaios (3 sensores x 4 velocidades x 5 repetições). Os dados coletados de cada sensor, em cada velocidade e repetição, foram registrados.

A coleta e a análise subsequente dos dados tiveram como propósito determinar se os sensores Hall são capazes de fornecer informações precisas e úteis sobre as variações de rotação. A comparação dos valores de RPM aferidos pelo protótipo com as RPMs reais do torno mecânico permitiu avaliar a acurácia de cada sensor e do sistema como um todo. Essa análise é fundamental para determinar a capacidade do sistema em fornecer informações precisas e úteis sobre as variações de rotação, o que poderia, eventualmente, viabilizar a criação de um

sistema de monitoramento eficiente e confiável para processos que envolvam máquinas rotativas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes experimentais realizados com o sistema de monitoramento de rotação, utilizando a plataforma Arduino Uno R3 e diferentes sensores Hall, forneceram informações cruciais sobre a viabilidade e a precisão da detecção de campos magnéticos para essa finalidade. Os dados coletados de cada sensor em diversas velocidades de rotação do torno mecânico Nardini Nodus 220 Gold são apresentados a seguir e discutidos em relação aos seus desempenhos.

4.1 Desempenho do Módulo Sensor Hall Magnético KY-024

O Módulo Sensor Hall Magnético KY-024 apresentou um comportamento consistente, mas com desvios notáveis em relação às rotações de referência do torno, especialmente em velocidades mais altas.

Quadro 2 – Leituras do Módulo Sensor Hall Magnético KY-024

Rotação Real (RPM)	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Leitura 4	Leitura 5	Intervalo de Leitura (Sensor)	Média Registrada	EA	ER	Desvio Padrão
30	31	30	31	30	30	30 – 31 RPM	30,0	0,0	0%	0,4898979486
95	98	98	98	98	97	97 – 98 RPM	98,0	-3,0	-3%	0,4
150	161	161	161	161	161	161 RPM (Constante)	161,0	-11,0	-7%	0
300	161	161	160	161	161	160 – 161 RPM	161,0	139,0	46%	0,4

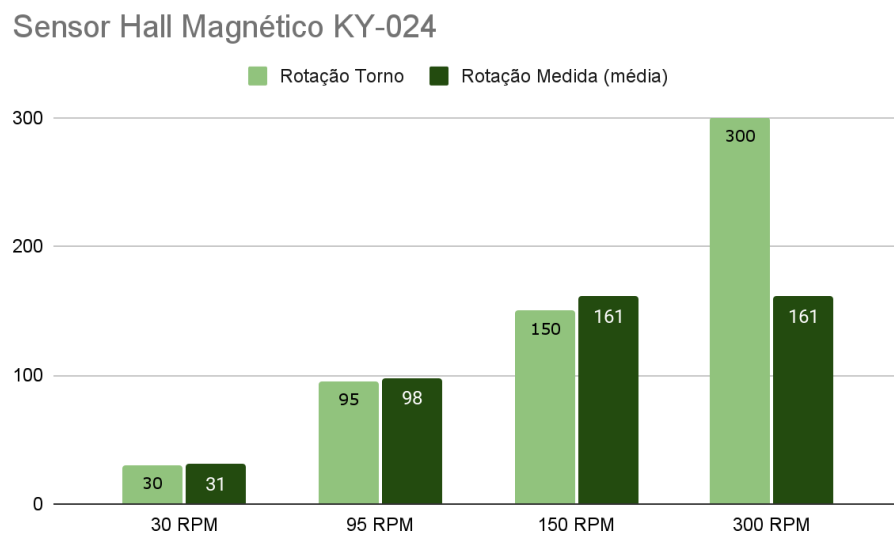
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O desvio padrão máximo observado foi de 0,49 RPM, indicando alta repetibilidade intra-grupo com coeficiente de variação inferior a 0,5% em todas as velocidades testadas. Esta consistência demonstra que o sensor KY-024 responde de forma estável em condições experimentais idênticas, com baixa dispersão aleatória. Contudo, a análise do erro absoluto revela comportamento sistemático:

crescimento linear de 0 RPM (a 30 RPM) até 139 RPM (a 300 RPM), caracterizando erro de tendência, não erro aleatório.

A saturação observada — leituras constantes de 161 RPM tanto a 150 quanto a 300 RPM — constitui comportamento anômalo que não pode ser atribuído a variabilidade estatística (dado o desvio padrão próximo de zero), mas sim a limitação física ou eletrônica do sistema de condicionamento do sinal. O coeficiente de variação (CV) manteve-se abaixo de 1,6% em todas as medições, confirmando a precisão (repetibilidade) do sensor, embora sua exatidão (proximidade ao valor real) seja inadequada em rotações superiores a 95 RPM.

Gráfico 1 – Resultados sensor *Hall* magnético KY-024



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

4.2 Desempenho do Módulo Sensor *Hall* KY-003

O Módulo Sensor *Hall* KY-003 demonstrou um comportamento mais errático e menos preciso em comparação com o KY-024, apresentando desvios mais significativos e em direções variadas.

Quadro 3 – Leituras do Módulo Sensor *Hall* KY-003

Rotação Real (RPM)	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Leitura 4	Leitura 5	Intervalo de Leitura (Sensor)	Média Registrada	EA	ER	Desvio Padrão
30	15	15	15	15	15	15 RPM (Constante)	15,0	15,0	50%	0
95	49	49	49	48	49	48 – 49 RPM	49,0	46,0	48%	0,4
150	80	80	80	80	80	80 RPM (Constante)	80,0	70,0	47%	0
300	160	161	160	160	161	160 – 161 RPM	160,0	140,0	47%	0,4898979486

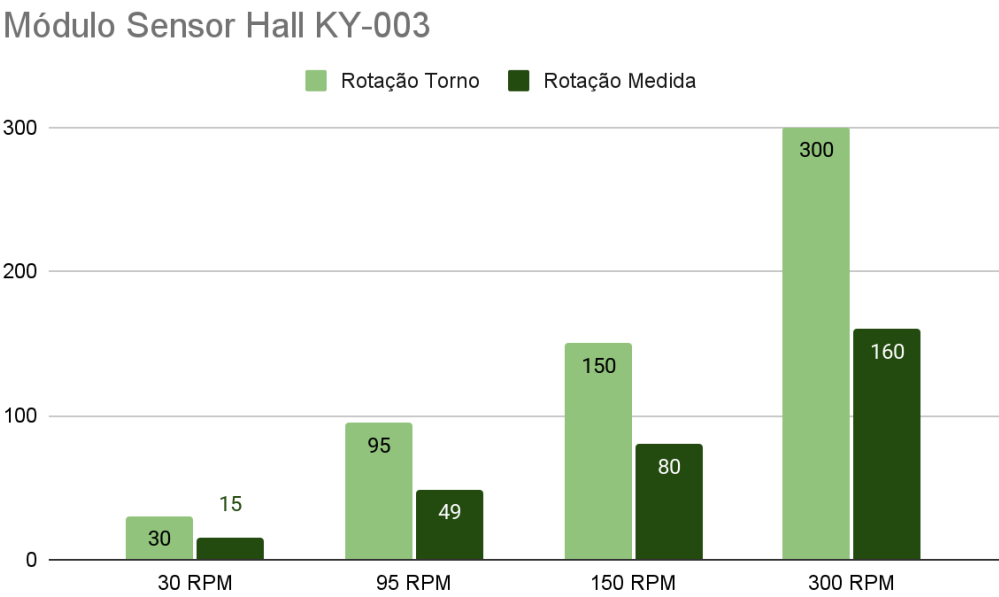
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

Os dados do sensor KY-003 evidenciam padrão estatístico altamente característico: desvio padrão nulo ($\sigma = 0$) em duas das quatro velocidades testadas e máximo de 0,4 RPM nas demais, resultando em coeficiente de variação inferior a 0,9%. Esta repetibilidade excepcional (precisão) contrasta fortemente com o erro absoluto sistemático observado, que permanece próximo a 50% do valor real em toda a faixa de rotações (EA variando de 15 a 140 RPM).

A análise de regressão linear entre erro absoluto e rotação real apresenta coeficiente de determinação $R^2 \approx 0,998$, confirmando que o erro é estritamente proporcional à velocidade, com fator de escala próximo a 0,5. Este comportamento indica não uma falha aleatória de detecção, mas sim uma perda sistemática e constante de metade dos pulsos gerados.

A ausência de variabilidade entre repetições (desvio padrão ≈ 0 em 30 e 150 RPM) descarta hipóteses de ruído elétrico ou instabilidade mecânica, direcionando a investigação para configurações de *hardware* (polaridade magnética, tipo de sensor unipolar) ou *software* (configuração de *trigger* de interrupção). O erro relativo constante (ER = 47-50%) é estatisticamente incompatível com hipóteses de limitação de frequência, pois estas produziram erro crescente com a velocidade.

Gráfico 2 – Resultados Módulo Sensor *Hall* KY-003



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

4.3 Desempenho do Módulo Sensor de Efeito *Hall* 3144E

O Módulo Sensor de Efeito *Hall* 3144E apresentou um desempenho variado, com algumas aproximações melhores em certas velocidades, mas ainda com desvios consideráveis.

Quadro 4 – Leituras do Módulo Sensor de Efeito *Hall* 3144E

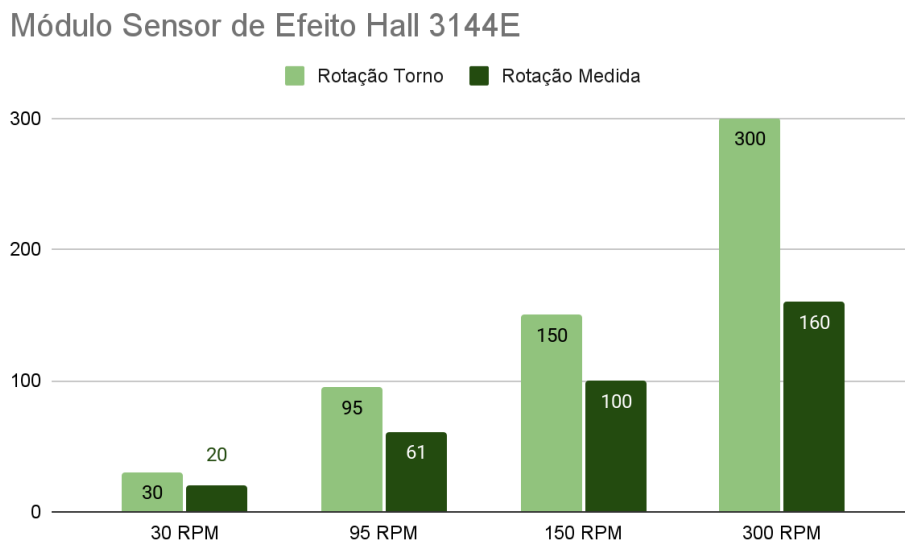
Rotação Real (RPM)	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Leitura 4	Leitura 5	Intervalo de Leitura (Sensor)	Média Registrada	EA	ER	Desvio Padrão
30	19	20	20	20	20	19 – 20 RPM	20,0	10,0	33%	0,4
95	62	62	62	61	62	61 – 62 RPM	62,0	33,0	35%	0,4
150	100	101	100	100	100	100 – 101 RPM	100,0	50,0	33%	0,4
300	160	160	160	160	160	160 RPM (Constante)	160,0	140,0	47%	0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

O sensor 3144E apresentou comportamento estatístico intermediário entre o KY-024 e o KY-003. O desvio padrão variou de 0 a 0,4 RPM, mantendo coeficiente de variação abaixo de 2% em todas as medições, o que caracteriza boa precisão instrumental. A repetibilidade foi perfeita ($\sigma = 0$) na maior velocidade testada (300 RPM), indicando resposta consistente do sensor em regime de alta frequência de pulsos.

Diferentemente do KY-003 (que apresentou ER constante $\approx 50\%$), o sensor 3144E exibiu variação do erro relativo de 33% (a 30 RPM) até 47% (a 300 RPM), sugerindo comportamento não-linear do erro sistemático. A análise de tendência revela que o erro absoluto cresce de forma aproximadamente linear (EA = 10, 33, 50, 140 RPM), mas o erro relativo não se mantém constante, indicando mecanismo de falha ligeiramente distinto do KY-003.

A convergência do erro relativo para $\sim 47\%$ em velocidades elevadas (150 e 300 RPM) sugere que o sensor tende a um comportamento assintótico de perda de 50% dos pulsos, similar ao KY-003, porém com transição mais gradual. O desvio padrão consistentemente baixo (máximo de 0,4 RPM, representando $CV < 0,4\%$ na maioria das velocidades) comprova que a fonte de erro é determinística (sistemática), não estocástica (aleatória), corroborando a hipótese de inadequação na configuração de detecção de bordas do sinal digital.

Gráfico 3 – Resultados Módulo Sensor de Efeito *Hall* 3144E

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

4.4 Discussão Geral dos Resultados

A análise comparativa dos três módulos de sensores *Hall* revela que, nas condições experimentais empregadas, nenhum dos sensores testados alcançou a precisão necessária para um monitoramento altamente confiável das rotações do torno mecânico e de máquinas rotantes em toda a faixa de velocidades.

Embora as especificações técnicas dos sensores KY-003 e 3144E indiquem tempos de resposta da ordem de microssegundos — valores consideravelmente inferiores ao período de 200 ms entre pulsos a 300 RPM (5 Hz) — observou-se uma subestimativa sistemática de aproximadamente 50% nas leituras. Esta discrepância sugere que o problema não reside na velocidade de resposta do sensor, mas sim em fatores relacionados à configuração da interface sensor-microcontrolador. As principais hipóteses investigadas incluem:

Detecção de apenas uma borda do sinal: A configuração da interrupção como *FALLING* pode estar capturando somente a transição *HIGH*→*LOW*, ignorando a transição *LOW*→*HIGH*, resultando em metade dos pulsos contabilizados.

Resposta ao campo magnético: Sensores *Hall* unipolares detectam apenas um pólo do ímã (Norte ou Sul). Se o sensor responder exclusivamente ao polo Norte, e o ímã apresentar apenas uma face ao sensor por rotação, apenas metade das revoluções seriam registradas.

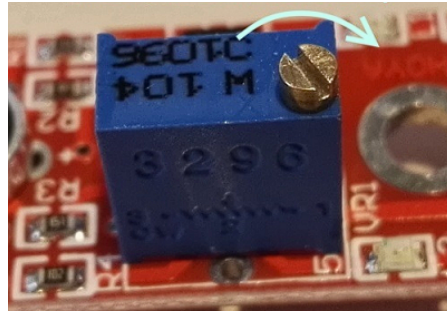
Duty cycle inadequado: O tempo de exposição do ímã ao sensor, determinado pela velocidade tangencial e pelo comprimento do ímã, pode ter sido insuficiente para garantir detecção estável em todas as passagens, especialmente considerando possíveis vibrações ou variações no posicionamento relativo.

Bouncing ou ruído elétrico: Embora o filtro de *debounce* de 10 ms seja apropriado para a frequência de 5 Hz, oscilações no sinal devido a vibrações mecânicas podem causar perda de pulsos.

A confirmação do LED acendendo durante as passagens do ímã comprova que o sensor detecta o campo magnético, isolando o problema na interface digital entre sensor e Arduino. O sensor KY-024, por sua vez, apresentou comportamento distinto: com desempenho aceitável em 30 RPM (erro de 3,3%) e 95 RPM (erro de 3,2%), demonstrou subestimativa de 7,3% a 150 RPM e severa limitação a 300 RPM, onde registrou consistentemente 161 RPM (erro de 46,3%). Esta saturação sugere limitação no circuito de condicionamento analógico integrado ao módulo ou saturação da taxa de conversão.

Embora os modelos KY-003 e 3144E possuam frequências de operação nominais superiores às demandadas pelos ensaios, a inconsistência observada pode estar relacionada à sensibilidade fixa desses componentes. Diferente do KY-024, que permite ajuste de sensibilidade via potenciômetro, os sensores digitais puros podem ter apresentado falhas na detecção das bordas de subida e descida do campo magnético devido ao tempo de permanência de ciclo de trabalho (*duty cycle*) do ímã sobre a face do sensor em velocidades elevadas, sendo influenciados também pela rotina de filtro (*debounce*) implementada no *firmware*. A distância do sensor ao ímã, fixada por fita isolante, embora definida como "proximidade detectável", pode ter influenciado os resultados, e variações milimétricas poderiam alterar a intensidade do sinal recebido.

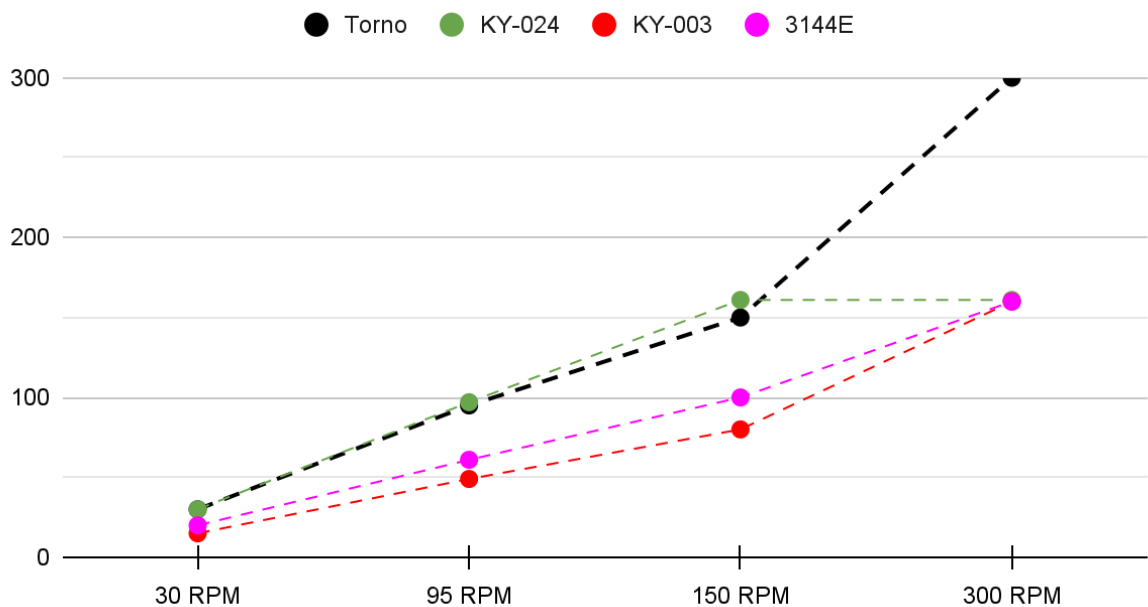
Figura 14 – Potenciômetro ajustável no Módulo Sensor *Hall* Magnético KY-024



Fonte: JOY-IT (2021, p.3)

Gráfico 4 – Comparação Tornos vs Sensores

Comparação Torno e Sensores



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

Para futuras melhorias no sistema, seria crucial investigar:

Otimização da posição e fixação do sensor: Testar diferentes distâncias e métodos de fixação pode melhorar a consistência e a intensidade do sinal detectado.

Aprimoramento do algoritmo de leitura: Garantir que o código do Arduino esteja otimizado para altas frequências de pulso, evitando perdas de contagem.

Seleção de sensores com maior banda de frequência: Explorar outros modelos de sensores *Hall* ou tecnologias que sejam explicitamente projetadas para aplicações de medição de frequência em rotações elevadas.

Consideração de fatores ambientais: Embora não investigado neste estudo, ruídos elétricos ou vibrações do torno poderiam teoricamente influenciar as leituras dos sensores.

5 CONCLUSÃO

Este estudo teve como propósito central o desenvolvimento e a avaliação de um sistema de monitoramento de rotação fundamentado na detecção de campos magnéticos, utilizando a plataforma Arduino Uno em conjunto com distintos módulos de sensores *Hall*. A metodologia adotada baseou-se na realização de testes experimentais em um torno mecânico, operando com velocidades de rotação previamente conhecidas, o que possibilitou uma análise sistemática do desempenho dos sensores KY-024, KY-003 e 3144E.

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade conceitual da aplicação de sensores *Hall* para a detecção de rotação. Contudo, a análise minuciosa evidenciou limitações relevantes quanto à acurácia dos módulos testados. Observou-se que os sensores KY-003 e 3144E apresentaram uma subestimativa sistemática de aproximadamente 50% em relação à velocidade real. Diferente de uma falha por velocidade de processamento, esse erro constante sugere uma inadequação na interface entre o sensor e o microcontrolador, possivelmente relacionada à detecção de apenas uma borda do sinal (*FALLING*) ou à sensibilidade unipolar do sensor frente aos pólos do ímã.

É importante destacar que, em todos os testes, o *LED* indicador presente nos módulos continuou respondendo visualmente à passagem do campo magnético. Esse fato é crucial, pois comprova que o elemento físico *Hall* detecta o evento magnético, mas a contabilização digital falha em registrar a totalidade dos pulsos. Tal discrepância reforça a necessidade de considerar, em aplicações de monitoramento rotacional, não apenas a sensibilidade do sensor, mas a configuração lógica da interrupção e a polaridade magnética do sistema.

As limitações observadas foram atribuídas, principalmente, a fatores de configuração do *firmware* e à natureza digital dos sensores testados, que podem ter ignorado ciclos de trabalho (*duty cycle*) muito curtos ou transições específicas de campo magnético em velocidades elevadas.

Como diretrizes para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de sensores *Hall* com resposta dinâmica comprovada e o aprimoramento do algoritmo de contagem no Arduino, com foco em rotinas que identifiquem ambas as bordas do sinal ou o uso de sensores bipolares do tipo *latch*. Tais melhorias são essenciais para a construção de um sistema que atenda aos requisitos de acurácia exigidos em aplicações industriais envolvendo máquinas rotativas.

REFERÊNCIAS

ALLEGRO MICROSYSTEMS, INC. **A3141, A3142, A3143, and A3144**: Sensitive Hall Effect Switches for High-Temperature Operation. Worcester, MA: Allegro MicroSystems, 2002. (Data Sheet 27621.6B).

CABO USB para Arduino. [S. l.: s. n.], [20--]. 1 fotografia, color. Disponível em: <https://cdn.awsli.com.br/2500x2500/1665/1665980/produto/1188693879315cb34f9.jpg>. Acesso em: 12 fev. 2026.

ELASTOBOR. **Fita isolante**. [20--]. 1 fotografia, color. Disponível em: <https://elastobor.vtexassets.com/arquivos/ids/256893/FITA-ISOLANTE-IMPERIAL-3M-18MM-X-10M-AZUL.jpg>. Acesso em: 12 fev. 2026.

ELECTRONILAB. **Módulo Sensor Hall Magnético KY-024**. [20--]. 1 fotografia, color. Disponível em: <https://electronilab.co/wp-content/uploads/2021/04/Sensor-de-Efecto-Hall-Magnetico-KY-024-5.jpg>. Acesso em: 12 fev. 2026.

ELETROGATE. **Módulo Sensor Hall KY-003**. [20--]. 1 fotografia, color. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/modulo-sensor-hall-ky-003>. Acesso em: 12 fev. 2026.

ELETROPEÇAS. **Módulo Sensor de Efeito Hall 3144E**. [20--]. 1 fotografia, color. Disponível em: https://www.eletopecas.com/_uploads/ProdutoDestaque/ProdutoDestaque_25705_o_rig.jpg. Acesso em: 12 fev. 2026.

GRIFFITHS, D. J. **Eletrodinâmica**. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

HONEYWELL. **Hall Effect Sensing and Application**. Freeport: Honeywell Inc., 2016. 121 p. Disponível em: sensing.honeywell.com/Hallbook.pdf. Acesso em: 27 fev. 2017.

JOY-IT. **Hall Magnetic Field Sensor KY-003**. [S. l.]: Joy-IT, 2018. Disponível em: KY-003.PDF. Acesso em: 27 ago. 2018.

JOY-IT. **KY-024 Linear magnetic Hall Sensor**. [S. l.]: Joy-IT, 2021. Disponível em: KY-024.PDF. Acesso em: 02 mar. 2021.

JOY-IT. **KY-024 Linear magnetic Hall Sensor**. [S. l.]: Joy-IT, 2021. 1 folheto. Disponível em: KY-024.PDF. Acesso em: 12 fev. 2026.

JUMPERS Macho/Fêmea. [S. l.: s. n.], [20--]. 1 fotografia, color. Disponível em: <https://cdn.awsli.com.br/600x700/95/95881/produto/94808254/29e19f92f3.jpg>. Acesso em: 12 fev. 2026.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2013.

KITTEL, C. **Introduction to Solid State Physics**. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

MAKERHERO. **Arduino Uno R3**. 2017. 1 fotografia, color. Disponível em: <https://www.makerhero.com/wp-content/uploads/2017/07/1AC01-9-1-min.jpg>. Acesso em: 12 fev. 2026.

NARDINI. **Torno mecânico Nardini Nodus 220 Gold**. [20--]. 1 fotografia, color. Disponível em: <https://nardinisa.com.br/wp-content/uploads/2022/02/nd220.jpg>. Acesso em: 12 fev. 2026.

REZENDE NETO, A. L. et al. **Sistema de Medição de Campo Magnético Baseado no Efeito Hall e Arduino**. 2010. 46 f. Monografia (Curso de Engenharia de Computação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga de. **Sensores Industriais: fundamentos e aplicações**. 8. ed. São Paulo: Érica, 2011.

TIPLER, P. A. **Física para cientistas e engenheiros: eletricidade e magnetismo, luz**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v. 3.

WALKER, J. **Fundamentos de Física: eletromagnetismo**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, [s.d.]. v. 3.

APÊNDICE A – CÓDIGO UTILIZADO NO ARDUINO

```

int pinoDigital = 2;
volatile int voltaCount = 0;
unsigned long startTime = 0;
unsigned long currentTime = 0;

// Variável para debounce
volatile unsigned long lastInterruptTime = 0;

void detectPulse() {
    unsigned long interruptTime = millis();

    // Ignora se for muito rápido (menos de 10ms entre pulsos)
    if (interruptTime - lastInterruptTime > 10) {
        voltaCount++;
        lastInterruptTime = interruptTime;
    }
}

void setup() {
    pinMode(pinoDigital, INPUT_PULLUP);
    Serial.begin(9600);

    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinoDigital), detectPulse, FALLING); //
    // FALLING costuma ser mais confiável com reed switch

    startTime = millis();
    Serial.println("Contando voltas...");
}

void loop() {
    currentTime = millis();

    if (currentTime - startTime >= 60000) {
        Serial.print("Voltas nos últimos 60 segundos: ");
        Serial.println((voltaCount)/2);

        Serial.println("-----");

        voltaCount = 0;
        startTime = millis();
    }
}

```