

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

BRUNO MOTA PULS DA SILVEIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE UM *DATALOGGER* PARA MEDIÇÃO DE
CAMPOS MAGNÉTICOS VARIANTES NO TEMPO**

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

BRUNO MOTA PULS DA SILVEIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE UM *DATALOGGER* PARA MEDIÇÃO DE
CAMPOS MAGNÉTICOS VARIANTES NO TEMPO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador:
Prof. Matheus Leitzke Pinto, M.Sc. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2026.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Silveira, Bruno

**Estudo da viabilidade do uso de um datalogger para
medição de campos magnéticos variantes no tempo / Bruno Silveira;
orientação de Matheus Leitzke Pinto.** - Florianópolis,
SC, 2026.
66 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Eletrônica. Departamento Acadêmico
de Eletrônica.
Inclui Referências.**

**1. Datalogger. 2. Magnetismo. 3. Ansys. 4. Filtros.
I. Leitzke Pinto, Matheus . II. Instituto Federal de
Santa Catarina. III. Estudo da viabilidade do uso de
um datalogger para medição de campos magnéticos variantes
no tempo.**

ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE UM *DATALOGGER* PARA MEDIÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS VARIANTES NO TEMPO

BRUNO MOTA PULS DA SILVEIRA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 14 de julho de 2026.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MATHEUS LEITZKE PINTO**
Data: 13/08/2026 12:15:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Matheus Leitzke Pinto, M.Sc. Eng.

Documento assinado digitalmente
 **RENAN AUGUSTO STARKE**
Data: 13/08/2026 11:09:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Renan Augusto Starke, Dr. Eng.

Documento assinado digitalmente
 **DANIEL LOHMANN**
Data: 13/08/2026 11:34:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Daniel Lohmann, M.Sc. Eng.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, que sempre esteve presente ao longo da minha trajetória, oferecendo apoio, conselhos e ideias para que eu continuasse seguindo em frente. Mesmo nos momentos em que talvez não parecesse, sempre escutei, absorvi e valorizei tudo aquilo que me foi dito.

Ao meu orientador, Matheus Leitzke Pinto, agradeço por ter acolhido a minha ideia e por todo o auxílio prestado durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação foi fundamental para a construção e evolução deste estudo.

Agradeço também a todos os meus amigos, entre eles os colegas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, por sempre me ouvirem, apoiarem e contribuírem de alguma forma ao longo desta caminhada.

Por fim, agradeço à empresa ESSS, onde atuo profissionalmente, por todo o aprendizado adquirido nos últimos três anos. Sem os conhecimentos desenvolvidos nesse período, certamente eu não teria a base necessária para aplicar, neste trabalho, muitos dos conceitos utilizados ao longo da pesquisa.

RESUMO

Neste trabalho, investiga-se a viabilidade do uso de um *datalogger* experimental para a medição de campos magnéticos variantes no tempo, propondo-se uma metodologia de ensaio capaz de caracterizar a resposta do equipamento e comparar os resultados obtidos experimentalmente com cálculos analíticos e simulações numéricas. Para isso, foi desenvolvida uma bancada experimental composta por bobinas de teste, gerador de funções, sistema de monitoramento de corrente e *software* de leitura do *datalogger*. O posicionamento do equipamento em relação às bobinas foi cuidadosamente definido, buscando reduzir dispersões no campo magnético e aumentar a repetibilidade das medições. A bancada experimental também foi modelada no *software* Ansys Maxwell, utilizando o método dos elementos finitos, permitindo representar numericamente as condições aplicadas nos ensaios. Os resultados simulados apresentaram boa concordância com os cálculos analíticos clássicos para o campo magnético produzido por solenoides finitos, verificando-se a coerência entre as duas referências adotadas. A partir da comparação entre os resultados experimentais, analíticos e numéricos, foi possível avaliar o comportamento do *datalogger* ao longo da faixa de frequências estudada. Os resultados indicaram que o equipamento foi capaz de identificar corretamente as componentes de frequência do campo magnético alternado; entretanto, foram observadas diferenças na amplitude medida em relação aos valores esperados, evidenciando a necessidade de calibração dependente da frequência para o uso quantitativo do sistema de medição. Dessa forma, o estudo contribui para a avaliação experimental do *datalogger* e para a compreensão de suas limitações na medição de campos magnéticos variantes no tempo.

Palavras-chave: Datalogger. Magnetismo. Ansys. Filtros.

ABSTRACT

This work investigates the feasibility of using an experimental datalogger for measuring time-varying magnetic fields, proposing a testing methodology capable of characterizing the equipment response and comparing experimentally obtained results with analytical calculations and numerical simulations. For this purpose, an experimental setup was developed, consisting of test coils, a function generator, a current monitoring system, and the datalogger reading software. The positioning of the equipment in relation to the coils was carefully defined, aiming to reduce magnetic field dispersion and improve measurement repeatability. The experimental setup was also modeled in Ansys Maxwell software using the finite element method, allowing the test conditions to be numerically represented. The simulated results showed good agreement with the classical analytical calculations for the magnetic field produced by finite solenoids, verifying the consistency between the two adopted references. Based on the comparison between experimental, analytical, and numerical results, it was possible to evaluate the behavior of the datalogger over the studied frequency range. The results indicated that the equipment was able to correctly identify the frequency components of the alternating magnetic field; however, differences were observed in the measured amplitude when compared to the expected values, highlighting the need for calibration, compensation, or further characterization of the measurement system. Thus, this study contributes to the experimental evaluation of the datalogger and to the understanding of its limitations in measuring time-varying magnetic fields.

Keywords: Datalogger. Magnetism. Ansys. Filters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do solenoide finito.	18
Figura 2 – Componentes principais para medição.	24
Figura 3 – Especificações do arquivo “magnetometer.ini”.	24
Figura 4 – Primeiro protótipo do teste de bancada.	26
Figura 5 – Esquemático circuital da bancada.	27
Figura 6 – Exemplo de resultado entregue pelo código descrito.	29
Figura 7 – Disposição da bobina para impressão.	32
Figura 8 – Comparação entre o CAD e a bobina finalizada.	33
Figura 9 – Bancada de testes com a nova bobina.	33
Figura 10 – Medição da indutância em L1.	34
Figura 11 – Medição da indutância em L2.	35
Figura 12 – Medição da indutância em L3.	35
Figura 13 – Bobina desenhada no <i>software</i> Ansys Maxwell.	37
Figura 14 – Seção transversal da bobina.	38
Figura 15 – Adição da peça metálica.	39
Figura 16 – Adição do ferrite na parte central.	40
Figura 17 – Adição do ponto de cálculo na simulação.	41
Figura 18 – Primeiras curvas de resposta do <i>datalogger</i> sem suavização.	43
Figura 19 – Primeira curva de resposta suavizada.	44
Figura 20 – Diferença entre frequência do gerador e <i>datalogger</i>	45
Figura 21 – Investigação da taxa de amostragem no <i>datalogger</i>	46
Figura 22 – Indutância na bobina calculada pelo <i>software</i>	48
Figura 23 – Ponto de cálculo da bobina.	49
Figura 24 – Resultado da simulação sem ferrite no Ansys Maxwell.	49
Figura 25 – Aplicação do ferrite na simulação.	50
Figura 26 – Resultado da simulação com ferrite no Ansys Maxwell.	50
Figura 27 – Resultado da bancada da bobina L1 sem ferrite.	52
Figura 28 – Resultado da bancada da bobina L2 sem ferrite.	52
Figura 29 – Resultado da bancada da bobina L3 sem ferrite.	53
Figura 30 – Resultado da bancada da bobina L1 com ferrite.	54
Figura 31 – Resultado da bancada da bobina L2 com ferrite.	54
Figura 32 – Resultado da bancada da bobina L3 com ferrite.	55
Figura 33 – Resultados dos testes sem ferrite.	56
Figura 34 – Erro da média dos testes sem ferrite.	57
Figura 35 – Resultados dos testes com ferrite.	58
Figura 36 – Erro da média dos testes com ferrite.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores iniciais da primeira tabela de testes.	42
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico-Digital (<i>Analog-to-Digital Converter</i>)
AWG	<i>American Wire Gauge</i> (padrão norte-americano de bitola de fios)
CAD	Projeto Assistido por Computador (<i>Computer-Aided Design</i>)
EMBRAPII	Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial
FEM	Método dos Elementos Finitos (<i>Finite Element Method</i>)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
FIR	<i>Finite Impulse Response</i> (resposta ao impulso finita)
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IIR	<i>Infinite Impulse Response</i> (resposta ao impulso infinita)
LabCEM	Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética
LCR	Medidor de Indutância (L), Capacitância (C) e Resistência (R)
LP AE	Laboratório de Pesquisa Avançada em Eletrônica
LPEE	Laboratório de Processamento Eletrônico de Energia
PDS	Processamento Digital de Sinais
PKL	<i>Python Pickle</i> (formato de arquivo de serialização de dados)
PLA	Poliácido Láctico (<i>Polylactic Acid</i>)
RMS	Valor Eficaz (<i>Root Mean Square</i>)
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (barramento serial universal)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	10
1.2	Definição do Problema	11
1.3	Objetivo geral	12
1.4	Objetivos específicos	12
1.5	Estrutura do trabalho	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Os <i>dataloggers</i>	14
2.2	Teorema da amostragem de <i>Nyquist</i>	15
2.3	Spline cúbica de suavização	15
2.4	Cálculo do campo magnético em uma bobina	17
2.5	Impedância em uma bobina	18
2.6	Efeito pelicular	19
2.7	Bobinas concêntricas e soma vetorial do campo magnético	20
2.8	Cálculo de campo da bobina	21
3	METODOLOGIA	23
3.1	<i>Software</i> de leitura do <i>datalogger</i>	23
3.2	A bancada inicial	25
3.2.1	Leitura de dados	28
3.3	Construção de uma nova bancada de testes	30
3.3.1	Construção de três bobinas nominalmente idênticas	33
3.4	Simulações desenvolvidas no <i>Ansys Maxwell</i>	36
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	42
4.1	Resposta do ensaio preliminar e influência da taxa de amostragem	42
4.1.1	Investigação da taxa de amostragem	45
4.2	Resultado do cálculo de campo da bobina	46
4.3	Comparação dos resultados calculados com a simulação	47
4.4	Resultados da bancada experimental	50
4.5	Comparação dos resultados para a bancada sem ferrite	55
4.6	Comparação dos resultados para a bancada com ferrite	57
4.7	Avaliação crítica do desempenho do <i>Datalogger</i>	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	62
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

Sensores magnéticos vêm sendo amplamente empregados para monitorar variações de campo associadas a anomalias em sistemas elétricos e mecânicos, permitindo a identificação precoce de falhas e contribuindo para estratégias de manutenção preditiva (WEG, 2026).

Nesse contexto, os *dataloggers* desempenham uma função essencial, pois integram sensores, circuitos de aquisição de sinais e módulos de processamento e transmissão de dados (ALTUS, 2026). Esses dispositivos são capazes de coletar, armazenar e transmitir informações *online*, viabilizando o monitoramento contínuo das condições de funcionamento de máquinas e instalações industriais, aumentando assim a confiabilidade e a eficiência dos processos.

No âmbito da engenharia preditiva, uma das aplicações de *dataloggers* é o monitoramento contínuo de campos magnéticos para a identificação precoce de falhas e degradações em sistemas elétricos e mecânicos. Variações anômalas no campo podem indicar desalinhamentos, curtos-circuitos parciais, sobrecargas ou falhas em enrolamentos, permitindo intervenções preventivas antes que danos mais severos ocorram (ZAMUDIO-RAMÍREZ et al., 2022).

Para atender a uma demanda de mercado e de pesquisa científica, a empresa Dynamox e o Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética (LABCEM), vinculado à Unidade EMBRAPPI do IFSC Câmpus Florianópolis, desenvolveram o projeto intitulado “Prova de conceito experimental para detecção de falhas em cabeamento elétrico de forma não invasiva”. No âmbito desse projeto, iniciou-se o desenvolvimento de uma metodologia destinada à avaliação de um *datalogger* experimental adaptado à medição de campos magnéticos.

Diante desse contexto, o presente trabalho apresenta e aplica uma metodologia para avaliar a resposta em frequência desse *datalogger* na medição de campos magnéticos variantes no tempo, considerando sinais de até aproximadamente 10 kHz. Para isso, os resultados experimentais obtidos em bancada são comparados com resultados provenientes de cálculos analíticos e simulações numéricas, o que permite analisar o comportamento do dispositivo no intervalo de frequências investigado.

1.1 Justificativa

Em sistemas reais de aquisição, as medições realizadas por *dataloggers* podem ser afetadas por ruídos elétricos, interferências ambientais e características da própria cadeia de medição, incluindo o elemento sensor, o condicionamento analógico, a conversão analógico-digital e o processamento digital do sinal (DINIZ; SILVA; NETTO, 2014). Esses efeitos tornam-se particularmente relevantes na medição de

campos magnéticos de baixa magnitude, nos quais pequenas perturbações ou variações de ganho podem representar uma parcela significativa do valor medido (DINÇER; SEMCZUK, 2023).

Nesse contexto, caracterizar o comportamento do sistema de medição em diferentes frequências de operação e condições magnéticas é fundamental para avaliar sua capacidade de detectar e quantificar campos de baixa magnitude. A análise da resposta do equipamento, inclusive na presença de materiais de elevada permeabilidade magnética, permite identificar desvios dependentes da frequência e compreender as limitações do sistema nas condições avaliadas.

Assim, o presente trabalho justifica-se pelo desenvolvimento de uma bancada de caracterização destinada à avaliação de um *datalogger* experimental na medição de campos magnéticos de baixa magnitude. A proposta utiliza bobinas de geometria conhecida como fontes controladas de campo, associadas a cálculos analíticos e simulações numéricas como referências de comparação (JIN, 2015). Essa abordagem permite avaliar separadamente a capacidade do equipamento de identificar a frequência do campo aplicado e de estimar sua magnitude, contribuindo para a determinação de sua resposta em frequência e para a identificação de possíveis limitações de medição.

1.2 Definição do Problema

A avaliação experimental de medições de campos magnéticos é um requisito para o emprego desses dispositivos em aplicações de monitoramento de sistemas elétricos e mecânicos. A medição dessas grandezas apresenta interesse por poder ser realizada sem contato elétrico direto com o sistema analisado, caracterizando-se como uma alternativa não invasiva para a identificação de alterações associadas ao funcionamento de equipamentos (ZAMUDIO-RAMÍREZ et al., 2022).

O protótipo avaliado neste trabalho possui arquitetura interna fechada: não são conhecidas a resposta em frequência do elemento sensor, a eventual presença de filtros *anti-aliasing*, as características do conversor analógico-digital nem o processamento digital aplicado internamente. Como consequência, não existe uma curva de resposta em frequência levantada para a sua função de medição magnética, permanecendo desconhecidos o erro de magnitude do conjunto na faixa de interesse e a frequência a partir da qual a atenuação se torna relevante. Sem essa caracterização, os valores registrados não podem ser interpretados quantitativamente, o que restringe seu uso à detecção de variações relativas.

Métodos de simulação numérica são amplamente utilizados para representar o comportamento de campos magnéticos em sistemas eletromagnéticos, permitindo estimar a distribuição do campo gerado por diferentes geometrias e condições

de operação (JIN, 2015). Neste trabalho, essas simulações são empregadas em conjunto com cálculos analíticos e ensaios experimentais em bobinas, com o objetivo de fornecer referências para a avaliação das medições realizadas pelo *datalogger*.

Dessa forma, surge a seguinte questão de pesquisa: qual é a resposta em frequência do sistema de medição magnética integrado ao *datalogger* entre 63 Hz e 9 kHz, considerando os erros de identificação de frequência e de magnitude em relação às referências analítica e numérica obtidas sob as mesmas condições geométricas e elétricas?

1.3 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral caracterizar, entre 63 Hz e 9 kHz, a resposta em frequência do sistema de medição magnética integrado a um *datalogger* experimental, quantificando os erros de identificação de frequência e de magnitude em relação a referências analíticas e numéricas obtidas sob as mesmas condições geométricas e elétricas.

1.4 Objetivos específicos

Com base no objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos que orientam o desenvolvimento deste trabalho:

- a) Compreender os fenômenos eletromagnéticos que fundamentam o princípio de medição e apresentar os conceitos teóricos e de programação utilizados no cálculo dos campos magnéticos.
- b) Desenvolver uma bancada de testes que assegure a confiabilidade e a repetibilidade dos resultados experimentais, aplicando uma frequência fixa em cada medição de campo magnético.
- c) Analisar e determinar a resposta em frequência do campo magnético medido pelo *datalogger*.
- d) Modelar o comportamento dinâmico e a resposta padrão do sistema de medição baseado no *datalogger*.
- e) Comparar os resultados analíticos, numéricos e experimentais, quantificando por frequência o erro de magnitude em diferença de ganho e em erro relativo percentual, e concluir um parecer sobre a qualidade de medição do *datalogger*.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, abordando a motivação do estudo, a justificativa para sua realização, a definição do problema, os objetivos estabelecidos e a estrutura geral adotada para o desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 2 corresponde à fundamentação teórica, na qual são apresentados os conceitos essenciais relacionados ao eletromagnetismo. Também são abordados os fundamentos dos métodos analíticos aplicados.

O Capítulo 3 descreve a metodologia empregada no desenvolvimento do trabalho, detalhando a construção da bancada de testes, os procedimentos experimentais realizados, o método de análise adotado para o processamento dos dados do *data logger* e o processo de simulação utilizando o método dos elementos finitos (MEF).

No Capítulo 4, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos a partir das medições e simulações, comparando os dados experimentais, analíticos e numéricos. São analisadas as curvas de resposta do *data logger*, as discrepâncias observadas entre os diferentes métodos e as propostas de correção aplicadas aos resultados experimentais.

Por fim, o Capítulo 5 reúne as considerações finais do trabalho, destacando as conclusões alcançadas, a contribuição do estudo para a área de engenharia eletrônica e sugestões para trabalhos futuros que visem aprofundar o entendimento e aprimorar as metodologias de estudo dos campos magnéticos variantes no tempo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos fundamentais para a compreensão e o desenvolvimento deste trabalho. O capítulo está organizado em três blocos. O primeiro trata do instrumento e do processo de aquisição, abrangendo as características dos *dataloggers* e o teorema da amostragem. O segundo apresenta o tratamento aplicado aos valores medidos, com a spline cúbica de suavização utilizada exclusivamente para representar a tendência dos resultados. O terceiro reúne as bases eletromagnéticas necessárias para estabelecer o campo de referência da bancada, partindo do modelo de solenoide finito, passando pelos fenômenos que alteram a impedância do enrolamento com a frequência até a expressão aplicada à bobina multicamadas efetivamente construída. Esses conceitos formam o alicerce necessário para a análise dos resultados obtidos.

2.1 Os *dataloggers*

Um *datalogger* é um registrador de dados autônomo, geralmente compacto e de baixo custo, projetado para monitorar e registrar informações *online*. Esses dispositivos são frequentemente utilizados em aplicações que demandam longos períodos de registro contínuo e não exigem altas taxas de amostragem (DEWESoft, 2025).

Os *dataloggers* podem ser caracterizados por diversos parâmetros, dentre os quais se destacam: taxa de amostragem, tipos de entrada, número de canais, capacidade de armazenamento, duração da gravação, interface de usuário, possibilidade de monitoramento local, sistema de alimentação e custo.

Neste trabalho, as características mais relevantes são a taxa de amostragem e a capacidade de armazenamento. A taxa de amostragem é particularmente crítica, pois um procedimento amostral inadequado pode introduzir ruídos e comprometer a interpretação dos resultados. A utilização de amostras que produzam estimativas confiáveis e livres de distorções é um objetivo fundamental em qualquer estudo experimental. Para isso, é necessário que o pesquisador planeje, execute, valide e analise corretamente as etapas do procedimento adotado (BOLFARINE, 2005).

Quanto ao armazenamento, os *dataloggers* geralmente registram os dados em memória interna não volátil, permitindo que a informação coletada seja posteriormente transferida para um computador externo para análise detalhada. Esse procedimento possibilita a inspeção dos dados em um ambiente adequado de processamento, garantindo maior flexibilidade no tratamento e interpretação das medições (DEWESoft, 2025).

O equipamento avaliado neste trabalho é o Dynalogger, *datalogger* desenvolvido pela empresa Dynamox. A unidade utilizada não corresponde a um produto

comercial: trata-se de um protótipo, em fase de desenvolvimento, adaptado para registrar exclusivamente campos magnéticos variantes no tempo. Por essa razão, não há especificação publicada de sua resposta em frequência para essa função de medição.

2.2 Teorema da amostragem de Nyquist

O teorema de *Nyquist* garante que, para recuperar toda a informação contida em um sinal contínuo, não é necessário registrar todas as variações de sua amplitude ao longo do tempo; basta que a amostragem seja realizada em intervalos regulares e suficientemente pequenos, de forma a representar adequadamente o comportamento temporal do sinal (OPPENHEIM; SCHAFER, 2014).

O teorema pode ser expresso pela Equação 1, tal que um sinal com largura de banda limitada, isto é, que não contenha componentes de frequência acima de um valor máximo B , pode ser reconstruído de forma completa a partir de suas amostras, desde que a frequência de amostragem f_s seja maior que o dobro da maior frequência presente no sinal, conforme a relação:

$$f_s > 2B \quad (1)$$

Essa relação, conhecida como critério de *Nyquist*, define a frequência mínima necessária para que o processo de amostragem preserve todas as informações do sinal original, evitando o fenômeno de *aliasing*, que ocorre quando componentes de alta frequência são interpretadas erroneamente como frequências mais baixas, distorcendo o sinal digitalizado (OPPENHEIM; SCHAFER, 2014).

No contexto deste projeto, a aplicação do teorema de *Nyquist* é essencial para assegurar que a frequência de amostragem seja suficientemente alta para identificar corretamente as componentes de frequência do campo magnético. É importante delimitar, contudo, o alcance desse critério: o atendimento à condição $f_s > 2B$ evita o *aliasing* e garante a correta identificação da frequência, mas não garante exatidão na estimativa de amplitude nem resposta plana da cadeia de medição, propriedades que dependem também do sensor, do condicionamento analógico, de eventuais filtros *anti-aliasing*, do conversor analógico-digital e do processamento aplicado. Cabe registrar ainda que o limite superior do espectro representável é a frequência de *Nyquist*, $f_N = f_s/2$, e não a própria f_s .

2.3 Spline cúbica de suavização

Neste trabalho, os valores utilizados na caracterização da resposta em frequência são os dados brutos fornecidos pelo *datalogger*, sem qualquer filtragem. O

tratamento estatístico é utilizado apenas como recurso auxiliar de visualização da tendência dos resultados, sendo aplicado sobre as médias obtidas em cada frequência de ensaio.

Para representar a tendência dos dados experimentais, foi utilizada uma spline cúbica de suavização (*cubic smoothing spline*). Esse método permite obter uma curva suave a partir de um conjunto de dados experimentais, buscando um equilíbrio entre a aproximação aos pontos medidos e a suavidade da curva (WAHBA, 1990).

Para cada frequência, inicialmente é calculada a média das medições realizadas, conforme:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2)$$

tal que,

- $\bar{x}$ é a média das medições;
- x_i corresponde a cada valor medido;
- N corresponde ao número de medições realizadas.

Além da média, é utilizado o desvio padrão para representar a dispersão das medições em cada frequência. O desvio padrão amostral é calculado por (MONTGOMERY; RUNGER, 2014):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (3)$$

em que s representa o desvio padrão das medições.

A spline cúbica de suavização é então aplicada sobre os valores médios obtidos em cada frequência. Como as frequências utilizadas nos ensaios não apresentam espaçamento uniforme e os resultados são apresentados em escala logarítmica, o ajuste é realizado utilizando o logaritmo da frequência:

$$x = \log_{10}(f) \quad (4)$$

em que f corresponde à frequência do sinal analisado.

A implementação foi realizada em Python utilizando as bibliotecas NumPy, Pandas, Matplotlib e SciPy. Para a obtenção da curva suavizada foi utilizada a função *make_smoothing_spline*, disponível na biblioteca SciPy (VIRTANEN et al., 2020).

Dessa forma, a spline não é aplicada diretamente ao sinal adquirido pelo *datalogger*, mas somente aos valores médios calculados para cada frequência de ensaio. Portanto, os dados originais permanecem inalterados e a curva suavizada é utilizada apenas para facilitar a visualização da tendência da resposta em frequência.

2.4 Cálculo do campo magnético em uma bobina

Os cálculos analíticos têm por função fornecer uma referência de primeira ordem, utilizada para verificar a coerência dos resultados obtidos via simulação, que posteriormente serão comparados com os resultados encontrados na prática. Cabe registrar que a concordância entre uma expressão analítica simplificada e um modelo numérico constitui uma verificação cruzada, e não uma validação integral do modelo, uma vez que ambos compartilham as mesmas hipóteses geométricas e simplificações de material. A bobina utilizada na bancada experimental possui espiras distribuídas ao longo de um mesmo eixo. Nesse caso, utiliza-se o modelo de solenoide finito, cuja geometria, ilustrada na Figura 1, considera a distribuição das espiras ao longo do eixo da bobina (GRIFFITHS, 2013).

Adota-se o eixo z coincidente com o eixo geométrico da bobina, com origem no centro do enrolamento, e considera-se que o ponto de observação está sobre esse eixo, isto é, $x = 0$ e $y = 0$; fora do eixo a formulação deixa de ser aplicável. Sob essas condições, e assumindo enrolamento uniformemente distribuído, corrente prescrita e regime magnético quase-estático, a densidade de fluxo magnético de um solenoide finito sem núcleo magnético ao longo de seu eixo pode ser expressa por (GRIFFITHS, 2013):

$$B(z) = \frac{\mu_0 N I}{2L} \left[\frac{z + \frac{L}{2}}{\sqrt{R^2 + (z + \frac{L}{2})^2}} - \frac{z - \frac{L}{2}}{\sqrt{R^2 + (z - \frac{L}{2})^2}} \right] \quad (5)$$

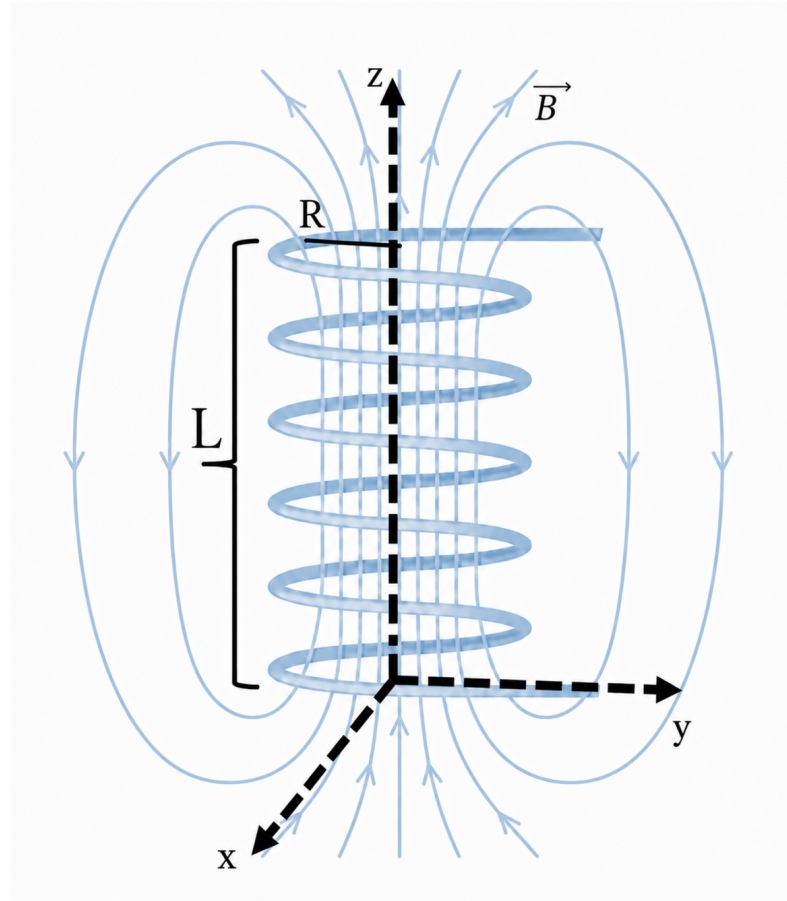
tal que,

- $B(z)$ é o campo magnético ao longo do eixo do solenoide, na posição axial z , em tesla (T);
- μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, igual a $4\pi \times 10^{-7}$ H/m;
- N é o número total de espiras do solenoide;
- I é a corrente elétrica que percorre o enrolamento, em ampères (A);
- L é o comprimento total (altura) do solenoide, em metros (m);
- R é o raio do solenoide (distância do centro ao fio), em metros (m);

- z é a coordenada axial medida a partir do centro geométrico do solenoide;

As principais grandezas geométricas utilizadas no modelo, como o comprimento L , o raio R e a coordenada axial z , são ilustradas na Figura 1.

Figura 1 – Representação do solenoide finito.



Fonte: Autoral.

2.5 Impedância em uma bobina

A impedância é a grandeza que caracteriza a relação entre corrente e tensão em circuitos de corrente alternada. No caso de uma bobina, a parcela indutiva dessa oposição surge devido à variação temporal do fluxo magnético associado ao enrolamento e aumenta proporcionalmente à frequência do sinal aplicado, sendo um fenômeno fundamental na análise de circuitos em corrente alternada.

Para uma bobina ideal, a impedância indutiva é dada por (WENTWORTH, 2007):

$$Z_L = j2\pi fL \quad (6)$$

tal que,

- Z_L : impedância complexa da bobina indutiva, em ohms (Ω);
- j : unidade imaginária, definida como $j^2 = -1$;
- 2π : fator de conversão entre frequência em hertz e frequência angular em radianos por segundo;
- f : frequência do sinal de corrente alternada, em hertz (Hz);
- L : indutância da bobina, em henry (H).

Através dessa equação é possível observar que a frequência e a impedância indutiva são grandezas diretamente proporcionais. Dessa forma, conforme a frequência do sinal aumenta, a impedância da bobina também se eleva. Essa relação, contudo, descreve apenas um indutor ideal: uma bobina real possui ainda resistência do fio, perdas dependentes da frequência e capacitâncias parasitas, de modo que a oposição total é mais bem representada por $Z(j\omega) = R_{ac}(\omega) + j\omega L(\omega)$. É o módulo dessa impedância que determina a corrente efetivamente fornecida pela fonte, o que justifica o monitoramento direto da corrente na bancada em vez de sua estimativa a partir da tensão configurada no gerador.

2.6 Efeito pelicular

A expressão da impedância indutiva apresentada na Equação 6 pressupõe que a corrente se distribui uniformemente pela seção do condutor. Em corrente alternada, essa hipótese deixa de ser válida: o campo magnético variável no interior do próprio condutor induz correntes parasitas que concentram a densidade de corrente próximo à superfície. Esse fenômeno é denominado efeito pelicular (*skin effect*) e sua extensão é caracterizada pela profundidade de penetração, definida por (SADIKU, 2010; HAYT; BUCK, 2013):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (7)$$

tal que,

- δ : profundidade de penetração, em metros (m), correspondente à distância a partir da superfície na qual a densidade de corrente decai a $1/e$ de seu valor superficial;
- ω : frequência angular, em radianos por segundo (rad/s), com $\omega = 2\pi f$;
- μ : permeabilidade magnética do condutor, em henry por metro (H/m);

- σ : condutividade elétrica do condutor, em siemens por metro (S/m).

Como δ diminui com a raiz quadrada da frequência, a área efetivamente disponível para a condução reduz-se à medida que a frequência aumenta, elevando a resistência do enrolamento e contribuindo para a parcela $R_{ac}(\omega)$ mencionada na seção anterior. Em enrolamentos multicamadas, soma-se ainda o efeito de proximidade, no qual o campo das espiras vizinhas redistribui a corrente em cada condutor (DOWELL, 1966).

2.7 Bobinas concêntricas e soma vetorial do campo magnético

Bobinas concêntricas são estruturas compostas por duas ou mais bobinas posicionadas de forma que compartilham o mesmo eixo geométrico central. Quando múltiplas bobinas concêntricas são percorridas por corrente elétrica, cada enrolamento produz individualmente um campo magnético. O campo magnético resultante no espaço corresponde à soma vetorial dos campos produzidos por cada bobina. Dessa forma, a intensidade e a direção do campo total dependem da contribuição individual de cada enrolamento, considerando parâmetros como corrente elétrica, número de espiras, geometria da bobina, distância do ponto analisado e sentido da corrente aplicada (GRIFFITHS, 2013).

A soma vetorial dos campos magnéticos ocorre conforme o princípio da superposição, no qual o vetor campo magnético total é obtido pela soma dos vetores individuais produzidos por cada bobina. Matematicamente, essa relação pode ser expressa por (GRIFFITHS, 2013):

$$\vec{B}_{total} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \cdots + \vec{B}_n \quad (8)$$

tal que,

- $\vec{B}_{total}$: campo magnético resultante;
- $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3$: campos magnéticos produzidos individualmente por cada bobina;
- n : número total de bobinas consideradas no sistema.

Quando as correntes circulam no mesmo sentido, os campos magnéticos tendem a se somar construtivamente, aumentando a intensidade do campo resultante. Em sistemas compostos por bobinas multicamadas ou múltiplos enrolamentos concêntricos, a análise da soma vetorial do campo magnético é fundamental para determinar o comportamento eletromagnético do conjunto. Esse procedimento permite

estimar com maior precisão a distribuição espacial do campo magnético, sendo amplamente utilizado tanto em modelagens analíticas quanto em simulações computacionais por elementos finitos (GRIFFITHS, 2013).

2.8 Cálculo de campo da bobina

Como forma de verificar a coerência do *setup* utilizado na simulação numérica, foi realizado o cálculo analítico do campo magnético gerado por um solenoide finito, conforme apresentado na Equação 5. Esse cálculo foi aplicado individualmente a cada camada da bobina física, considerando suas respectivas dimensões geométricas. Em seguida, as contribuições individuais de campo foram somadas, conforme a Equação 8, a fim de obter o campo magnético resultante no interior da estrutura. A partir desses fundamentos, estabeleceu-se a relação utilizada para comparação com os resultados experimentais, apresentada na Equação 9.

Foram realizados cálculos do solenoide finito para cada camada da bobina, considerando o aumento progressivo do raio em função do diâmetro do fio.

$$B_{\text{tot}}(z) = \sum_{n=1}^{N_{\text{cam}}} \frac{\mu_0 N I}{2L} \left[\frac{z + \frac{L}{2}}{\sqrt{(R + (n-1)d_{\text{avg}})^2 + (z + \frac{L}{2})^2}} - \frac{z - \frac{L}{2}}{\sqrt{(R + (n-1)d_{\text{avg}})^2 + (z - \frac{L}{2})^2}} \right] \quad (9)$$

tal que,

- $B_{\text{tot}}(z)$: densidade de fluxo magnético resultante no eixo da bobina, em tesla (T);
- N_{cam} : número de camadas do enrolamento;
- n : índice da camada, variando de 1 até N_{cam} ;
- N : número de espiras de cada camada, e não o total da bobina;
- I : corrente elétrica que percorre o enrolamento, em ampères (A);
- L : comprimento axial ocupado pelo enrolamento, em metros (m);
- R : raio da primeira camada, em metros (m);
- d_{avg} : diâmetro externo do fio, em metros (m), responsável pelo incremento radial entre camadas consecutivas, de modo que o raio da camada n é $R + (n-1)d_{\text{avg}}$;
- z : coordenada axial do ponto de observação, em metros (m), com $x = y = 0$ e origem no centro do enrolamento.

O modelo considera camadas concêntricas uniformes e espiras igualmente distribuídas ao longo do comprimento L . Entretanto, ao se tratar de um enrolamento

construído manualmente, podem existir pequenas divergências geométricas em relação às condições idealizadas, especialmente quanto ao espaçamento entre espiras e ao posicionamento das camadas. Essas variações constituem uma possível fonte de incerteza no valor obtido pelo cálculo analítico.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos adotados ao longo do desenvolvimento do projeto, descrevendo as etapas realizadas desde o planejamento inicial até a implementação da bancada de testes final. As atividades foram conduzidas utilizando os recursos disponíveis nos Laboratórios de Compatibilidade Eletromagnética (LabCEM), de Pesquisa Avançada em Eletrônica (LPAE) e de Processamento Eletrônico de Energia (LPEE) do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).

A metodologia proposta teve como principal objetivo obter e analisar a curva de resposta do *datalogger*, avaliando seu comportamento frente a diferentes frequências de campo magnético variante no tempo e parâmetros de aquisição. Para isso, foram estabelecidas etapas de configuração do sistema de medição, aquisição dos sinais e tratamento digital dos dados.

Ao longo deste capítulo, são detalhados os procedimentos experimentais, os equipamentos utilizados, as configurações de *software* e *hardware* aplicadas e as técnicas de processamento digital de sinais empregadas para interpretação dos resultados obtidos, de forma a garantir reprodutibilidade, precisão e confiabilidade nas medições realizadas.

3.1 *Software* de leitura do *datalogger*

O *datalogger* adotado como estudo de caso deste trabalho foi disponibilizado pela empresa Dynamox, acompanhado de um guia de usuário contendo as instruções para aquisição de dados. Por se tratar de documento interno da empresa, não disponibilizado publicamente, o guia não é reproduzido nem anexado a este trabalho, sendo descritos apenas os procedimentos necessários à compreensão dos ensaios realizados. A etapa de montagem do sistema de testes envolveu quatro componentes principais, conforme apresentado na Figura 2: o gravador de *firmware* (1), o *header* com *jumper* de conexão (2), o equipamento *datalogger* (3) e um cabo USB para a interface com o computador.

Figura 2 – Componentes principais para medição.

Fonte: Autoral.

A aquisição dos dados foi realizada por meio de um *software*, disponibilizado pela Dynamox, o qual operava diretamente no sistema operacional Windows da máquina utilizada. Esse programa fazia uso do *driver* J-Link, responsável pela comunicação entre o gravador de *firmware* e o dispositivo, permitindo a leitura e o armazenamento dos dados do *datalogger*.

Antes de iniciar as medições, era necessário definir os parâmetros de configuração utilizados pelo *software* durante a aquisição. Essas configurações estavam armazenadas em um arquivo denominado “magnetometer.ini”, também disponibilizado pelo fabricante, que, ao ser aberto, apresentava as seguintes opções de ajuste, conforme a Figura 3.

Figura 3 – Especificações do arquivo “magnetometer.ini”.

```
[DYL_MAGNETOMETER]
  axis_config      = z
  range            = MAG_RANGE_25MT
  sampling_freq    = 20000

[DYL_WAVEFORM]
  scheduled_time   = 2
  0_samples        = 102399
```

Fonte: Autoral.

Os parâmetros observados na Figura 3 são:

- *axis_config* – parâmetro que define os eixos de medição habilitados no *datalogger*;

- *range* – faixa nominal de medição do *datalogger*, em mT (neste caso ± 25 mT de amplitude total);
- *sampling_freq* – frequência de amostragem utilizada na aquisição dos dados, em Hz (adotado em todos os ensaios o valor máximo de 20000);
- *0_samples* – número de amostras armazenadas para o canal ou registro identificado pelo índice 0, em amostras;

O número máximo de amostras totais permitido pelo sistema é de 102.399. Quando a medição é realizada nos três eixos simultaneamente (X, Y e Z), esse total é dividido igualmente entre os eixos, resultando em aproximadamente 34.133 amostras por eixo. Em termos práticos, o sistema mantém o limite global de 102.399 amostras, porém o número efetivo de leituras disponíveis para cada eixo é reduzido proporcionalmente à quantidade de canais ativos durante a aquisição.

Ao aumentar o número de amostras, observou-se também um acréscimo proporcional no tempo total de coleta dos dados de campo. Considerando que o tempo máximo de aquisição era de aproximadamente 4 minutos, optou-se por manter o número máximo de amostras em todos os testes.

A frequência de amostragem determinava, neste contexto, o limite superior do espectro representável, dado pela frequência de Nyquist $f_N = f_s/2$, sendo sempre maior que o dobro da frequência máxima do sinal de campo magnético, de modo a atender ao Teorema da Amostragem de Nyquist.

3.2 A bancada inicial

A primeira etapa experimental teve caráter exploratório, com o objetivo de verificar a funcionalidade básica do *datalogger* e identificar suas limitações antes do desenvolvimento de uma bancada definitiva. Os resultados obtidos nesta fase não se destinam à validação quantitativa do equipamento mas justificam as decisões de projeto que orientaram a sua construção. A validação é conduzida na bancada construída posteriormente, com parâmetros geométricos e elétricos plenamente conhecidos.

Buscando testar o dispositivo *datalogger*, procurou-se uma forma de concentrar o campo magnético em um único eixo, utilizando correntes de baixa intensidade. Para isso, foi empregada uma bobina multifilar já disponível no LabCEM, embora com número de espiras desconhecido, uma vez que o objetivo inicial era apenas verificar a funcionalidade e resposta de medição do equipamento em diferentes frequências.

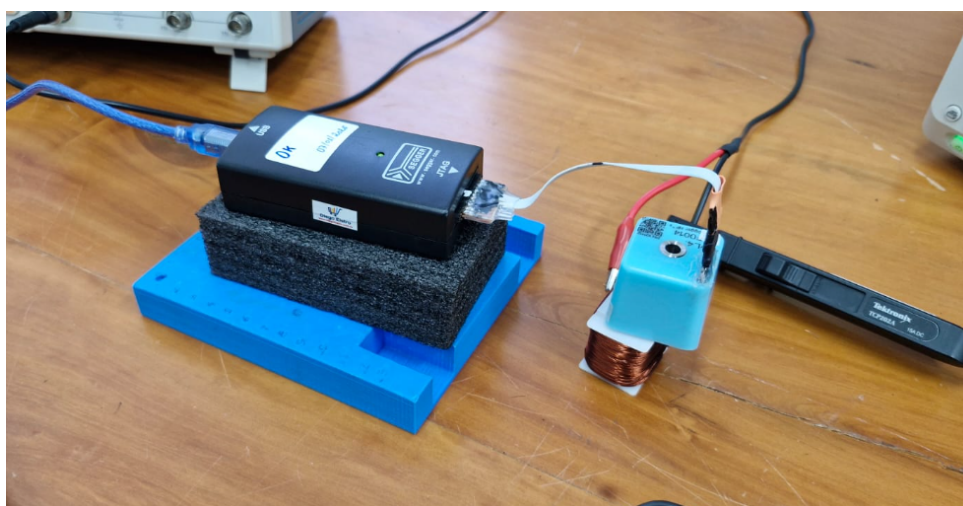
O gerador de funções foi configurado para fornecer uma tensão senoidal ao circuito da bobina, cuja corrente resultante depende da impedância total do circuito

e dos limites de saída do equipamento, sendo por isso monitorada pela ponteira de corrente e ajustada pelo potenciômetro. Variando a frequência do sinal de excitação, foi possível obter as primeiras respostas consistentes no espectro do campo magnético medido.

Esse espectro é obtido pela Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*), algoritmo que converte o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, permitindo identificar as componentes espectrais presentes no sinal medido e, com isso, analisar a frequência e a amplitude do campo magnético alternado. Cabe esclarecer que esse cálculo não foi implementado neste trabalho: a FFT é executada internamente pelo *software* de leitura disponibilizado pela Dynamox, do qual foram recuperados os resultados já processados. Não se teve acesso ao código-fonte nem à documentação detalhada dessa implementação.

Na Figura 4, é apresentada a configuração inicial da bancada experimental. O *datalogger* encontra-se conectado à interface J-Link e posicionado sobre a bobina, que, por sua vez, está conectada ao gerador de funções Tektronix AFG3021B por meio de ponteiras do tipo jacaré. No condutor de entrada da bobina, foi posicionada a ponteira de corrente Tektronix P6021A, conectada ao osciloscópio Tektronix MDO3014.

Figura 4 – Primeiro protótipo do teste de bancada.



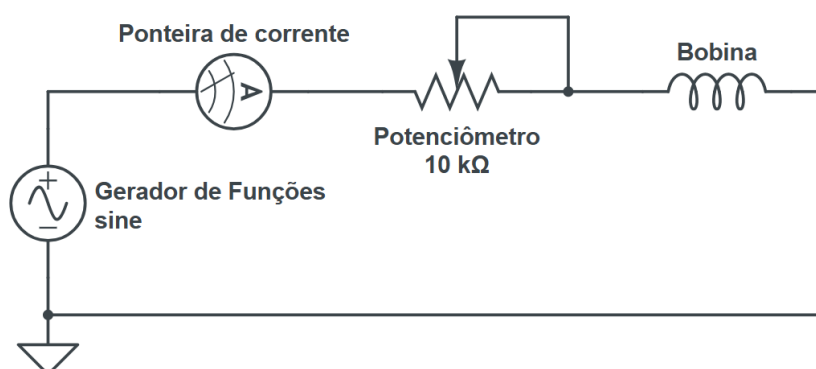
Fonte: Autoral.

A ponteira de corrente ao osciloscópio foi utilizada para monitorar a corrente alternada aplicada à bobina, permitindo a medição precisa da corrente instantânea responsável pela geração do campo magnético. Essa etapa foi fundamental para correlacionar quantitativamente a corrente de excitação com a resposta registrada pelo *datalogger*.

Do ponto de vista circuital, a bancada de testes pode ser representada de forma simplificada conforme apresentado na Figura 5. Nessa representação, o gera-

dor de funções fornece o sinal senoidal de excitação aplicado à bobina, enquanto o potenciômetro de $10k\Omega$ é utilizado para ajustar a amplitude da corrente no circuito. A ponteira de corrente é posicionada no condutor de alimentação da bobina, permitindo o monitoramento da corrente aplicada sem a necessidade de interromper o circuito. Dessa forma, a bobina atua como a carga responsável pela geração do campo magnético alternado analisado nos ensaios experimentais.

Figura 5 – Esquemático circuital da bancada.



Fonte: Autoral.

Com o intuito de controlar a amplitude da corrente aplicada, foi adicionado ao circuito um potenciômetro de $10k\Omega$, esse valor foi definido a partir de testes preliminares com potenciômetros de diferentes resistências, sendo selecionado por proporcionar uma faixa de ajuste adequada e maior facilidade no controle fino da corrente aplicada. Essa implementação tornou-se necessária, pois a impedância intrínseca da bobina aumenta com a frequência do sinal aplicado, o que provoca uma redução natural da corrente. Assim, o potenciômetro permitiu compensar essa variação, garantindo um controle adequado da intensidade do campo magnético ao longo de todo o espectro de frequências analisado.

Além das limitações físicas da bancada, o gerador de funções impunha um limite superior à corrente aplicada à bobina e, conseqüentemente, à intensidade do campo magnético gerado. O fabricante não especifica uma corrente máxima de saída para o AFG3021B; o que a limita é a combinação entre a amplitude máxima, de 20 V_{p-p} em circuito aberto, e a impedância de saída de 50 ohm (TEKTRONIX, 2009). Nessas condições, a corrente de curto-circuito teórica é de 200 mA de pico, aproximadamente 141 mA RMS, valor que constitui o teto absoluto da fonte. Na bancada, com a bobina e

o potenciômetro conectados, a maior corrente que pôde ser mantida de forma estável foi de 135 mA RMS, medida pela ponteira de corrente.

Como a impedância da bobina varia em função da frequência, a definição da corrente de ensaio foi realizada considerando a condição mais crítica da faixa analisada, isto é, a maior frequência de estudo. Dessa forma, adotou-se como referência o maior valor de corrente que pôde ser mantido de forma segura na frequência de 9,7 kHz, correspondente a 102 mA RMS. Esse valor foi então utilizado em todas as frequências avaliadas, garantindo maior consistência entre os ensaios e permitindo comparar a resposta do *datalogger* sob a mesma condição de corrente aplicada.

A faixa de frequência adotada, de 100 Hz a 9,7 kHz, foi definida para os ensaios preliminares por abranger aproximadamente duas décadas de frequência, permitindo uma avaliação inicial representativa da resposta do *datalogger* em baixas e altas frequências dentro do intervalo de interesse. Assim, foi possível observar o comportamento do equipamento ao longo de uma faixa suficientemente ampla para caracterizar sua resposta frente a campos magnéticos alternados.

Para cada variação de frequência, a corrente aplicada à bobina foi ajustada manualmente por meio do potenciômetro. Esse ajuste era realizado observando-se, no osciloscópio, o valor RMS da corrente medido pela ponteira de corrente. Assim, a cada alteração na frequência do sinal de excitação, o potenciômetro era reajustado até que a corrente retornasse ao valor de referência adotado para o ensaio. Essa calibração individual em cada ponto de frequência foi necessária para compensar a variação da impedância da bobina com a frequência, garantindo que a amplitude da corrente aplicada e, conseqüentemente, do campo magnético gerado, permanecesse aproximadamente constante ao longo de toda a faixa analisada.

O sinal de excitação foi fornecido por um gerador de funções, configurado para emitir uma onda senoidal com amplitude de 20 V pico a pico. Esse valor foi escolhido por corresponder à maior amplitude permitida pelo equipamento utilizado, permitindo maximizar a corrente aplicada à bobina e, conseqüentemente, a intensidade do campo magnético gerado. Dessa forma, buscou-se obter uma resposta mais significativa do sistema de medição, mantendo a operação dentro dos limites especificados para a bancada experimental.

3.2.1 Leitura de dados

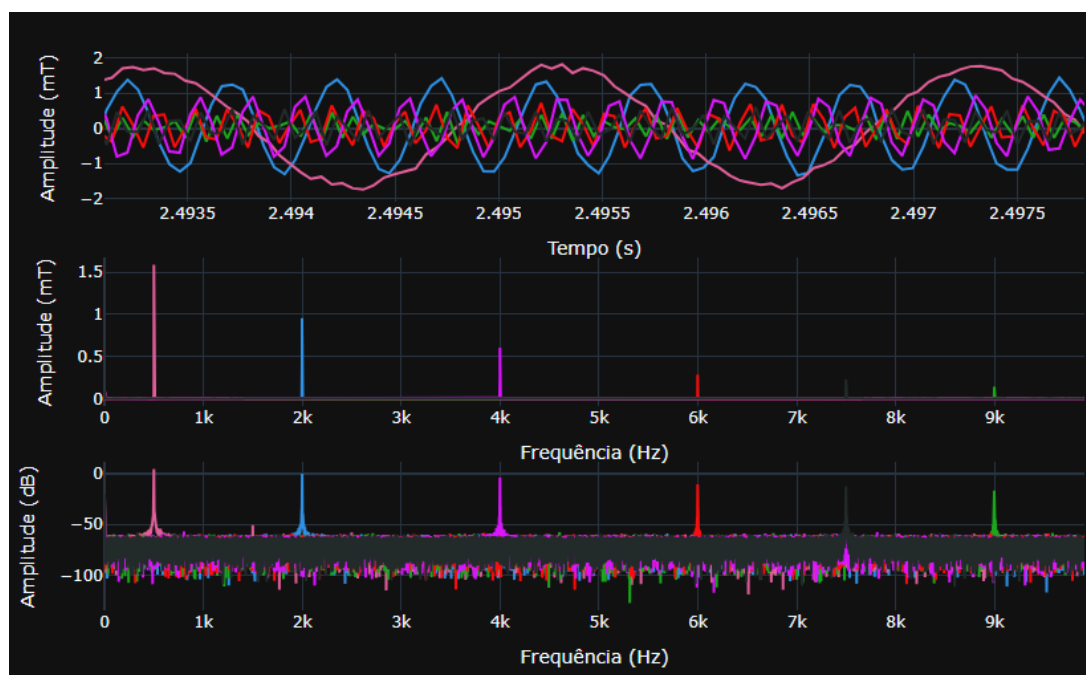
A leitura dos dados gerados pelo *datalogger* resultava em um arquivo no formato PKL (*Python Pickle*), contendo as informações brutas de amplitude e tempo. Esse arquivo era posteriormente processado por um código em linguagem Python, o qual realizava a decodificação, organização e visualização gráfica dos dados adquiridos. O processamento foi mantido idêntico em todos os ensaios e consistiu na seleção

do eixo de análise, na remoção da componente contínua do registro, no cálculo da FFT unilateral com a devida normalização pelo número de amostras, na conversão da amplitude para militesla e na identificação do valor de pico na vizinhança da frequência de excitação.

O código implementado permitia a geração automática de três representações distintas do sinal medido, exemplificadas na Figura 6:

- Amplitude (mT) $\times$ Tempo (s) – exibindo o comportamento temporal do campo magnético;
- Amplitude (mT) $\times$ Frequência (Hz) – obtida por meio da FFT, mostrando a distribuição espectral do sinal em termos de intensidade;
- Amplitude (dB) $\times$ Frequência (Hz) – representando a mesma análise espectral em escala logarítmica, o que facilitava a identificação de picos de resposta e componentes harmônicas de menor magnitude.

Figura 6 – Exemplo de resultado entregue pelo código descrito.



Fonte: Autoral.

O primeiro conjunto de ensaios foi realizado utilizando o *datalogger*, totalizando 69 variações de frequência. A faixa de análise foi definida entre 100 Hz e 9.700 Hz por representar, nos testes preliminares, um intervalo suficientemente amplo para avaliar o comportamento inicial da resposta em frequência do equipamento, abrangendo aproximadamente as duas primeiras décadas da curva de operação analisada.

Inicialmente, a varredura foi conduzida de 100 Hz a 4.100 Hz, com incrementos de 100 Hz entre cada medição, permitindo uma observação mais detalhada da resposta em baixas e médias frequências. Em seguida, a faixa foi estendida de 4.100 Hz até 9.700 Hz, adotando-se incrementos de 200 Hz, de modo a ampliar a análise para frequências mais elevadas sem aumentar excessivamente o número de medições. Essa metodologia permitiu caracterizar de forma preliminar a curva de resposta em frequência do *datalogger* ao longo da faixa de interesse.

Visto que o objetivo principal era caracterizar a curva de resposta, utilizando os valores máximos de magnitude observados na FFT, foram elaboradas planilhas de correlação contendo as frequências estudadas, os valores obtidos de amplitude e as correntes aplicadas durante os ensaios, utilizadas para o controle e comparação dos resultados.

Cada coluna da tabela representa uma grandeza física relevante para a análise da resposta do *datalogger*:

- Frequência (Hz) Gerador: corresponde à frequência do sinal senoidal aplicado à bobina pelo gerador de funções.
- Frequência (Hz) *Datalogger*: representa a frequência efetivamente detectada pelo *datalogger*, obtida a partir da análise espectral via FFT.
- Amplitude (mT) *Datalogger*: indica o valor de pico da densidade de fluxo magnético medida, expressa em miliTesla (mT).
- Amplitude (dB) *Datalogger*: corresponde à amplitude do mesmo sinal expressa em escala logarítmica (decibéis), permitindo comparar variações relativas de intensidade.
- Corrente RMS (mA) Osciloscópio: valor eficaz da corrente alternada que percorreu a bobina, medido pelo osciloscópio.
- Corrente PP (mA) Osciloscópio: valor de corrente de pico a pico.

A tabela de dados obtida foi posteriormente aplicada em um código desenvolvido em linguagem Python, executado na plataforma Google Colaboratory, escolhida por permitir acesso remoto. Com base nesses dados, foi gerada a primeira curva de caracterização do *datalogger*.

3.3 Construção de uma nova bancada de testes

Com o objetivo de realizar comparações diretas com os resultados obtidos no *setup* preliminar da primeira bobina, desenvolveu-se uma nova bobina de teste com

geometria otimizada para o eixo Z. O projeto dessa bobina foi elaborado de forma a maximizar o acoplamento magnético com o *datalogger*, garantindo maior densidade de fluxo no ponto de medição e, conseqüentemente, leituras mais representativas e consistentes.

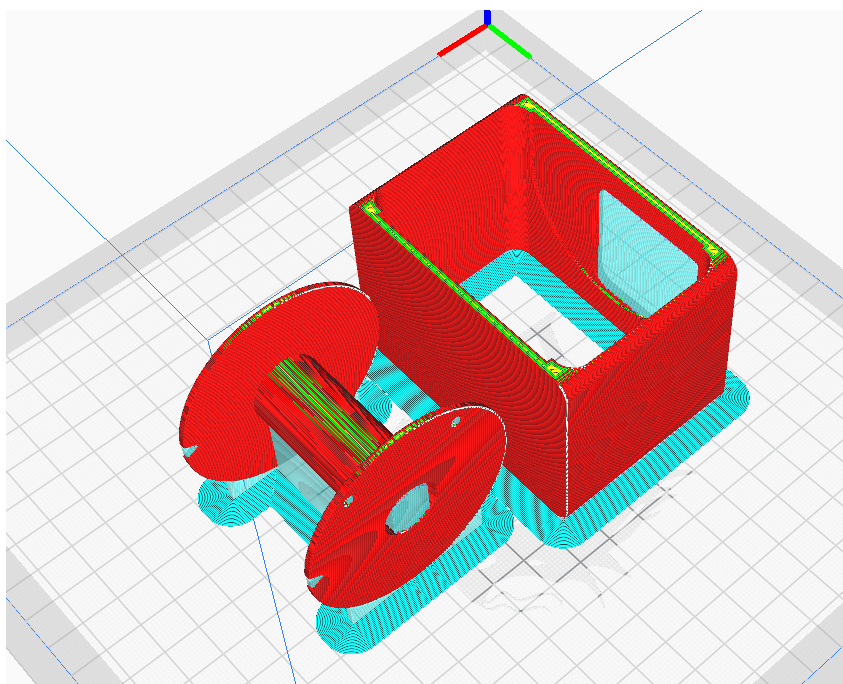
Além disso, a estrutura da bobina foi projetada com espaço interno para a inserção de um núcleo de ferrite IP06, com 15 mm de diâmetro e 50 mm de altura, cuja função é concentrar o campo magnético gerado pelas espiras condutoras. O núcleo foi, portanto, o elemento definidor das dimensões internas do carretel: o diâmetro do furo central foi estabelecido a partir do diâmetro do ferrite, com folga mínima para o encaixe, e a altura útil do enrolamento foi ajustada à altura do núcleo.

A utilização desse material de alta permeabilidade magnética contribui para reduzir perdas de dispersão e direcionar o fluxo ao longo do eixo principal, buscando proporcionar uma melhor definição da resposta do equipamento durante os testes experimentais. Ressalta-se que a permeabilidade de um ferrite depende da frequência e possui componente de perdas, de modo que o ganho proporcionado pelo núcleo não deve ser assumido constante ao longo de toda a faixa avaliada.

A curva de permeabilidade do material IP06 em função da frequência, suas perdas e a faixa de operação recomendada não foram disponibilizadas pelo fabricante. Por essa razão, não foi possível incorporar a dependência com a frequência ao modelo numérico nem estimar a contribuição desse efeito para as diferenças observadas nos ensaios. A referência adotada para a configuração com núcleo é, portanto, um valor único obtido por simulação para uma única condição de material, e sua utilização como valor constante ao longo de toda a faixa de frequência constitui uma limitação declarada deste trabalho.

O projeto da bobina de teste foi desenvolvido utilizando o *software* de CAD técnico Creo Parametric, que possibilitou a criação de um modelo tridimensional detalhado, permitindo ajustes precisos na geometria e no posicionamento do núcleo de ferrite. A estrutura física foi posteriormente fabricada por meio de impressão 3D, utilizando filamento de PLA.

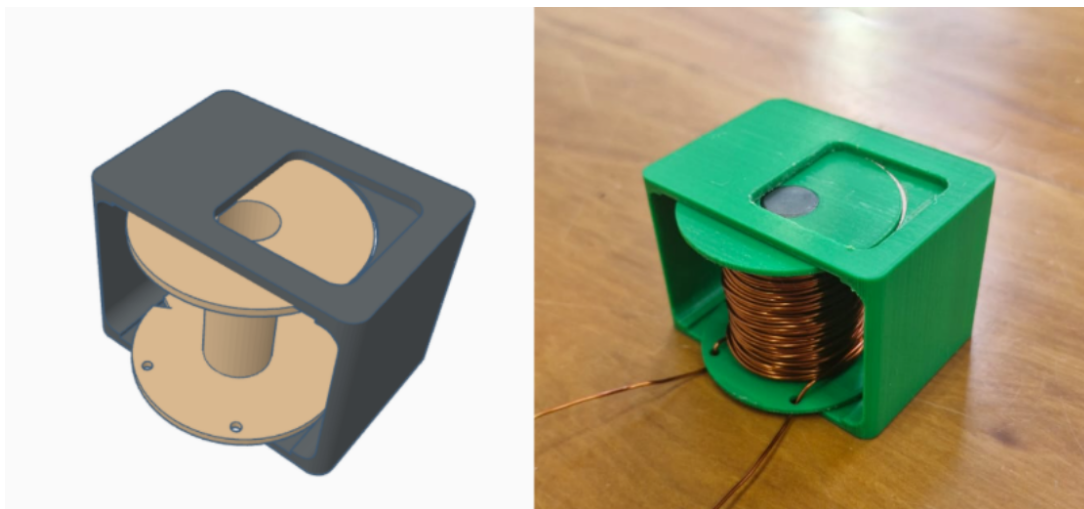
Durante o processo de fabricação, o modelo foi orientado na mesa de impressão de forma estratégica, buscando minimizar pontos de tensão mecânica e reduzir potenciais regiões de ruptura, garantindo assim maior robustez e integridade estrutural ao componente impresso, conforme ilustra a Figura 7. Essa abordagem contribuiu para a obtenção de um suporte resistente e mecanicamente estável, adequado para sustentar o conjunto bobina–núcleo durante os ensaios experimentais.

Figura 7 – Disposição da bobina para impressão.

Fonte: Autoral.

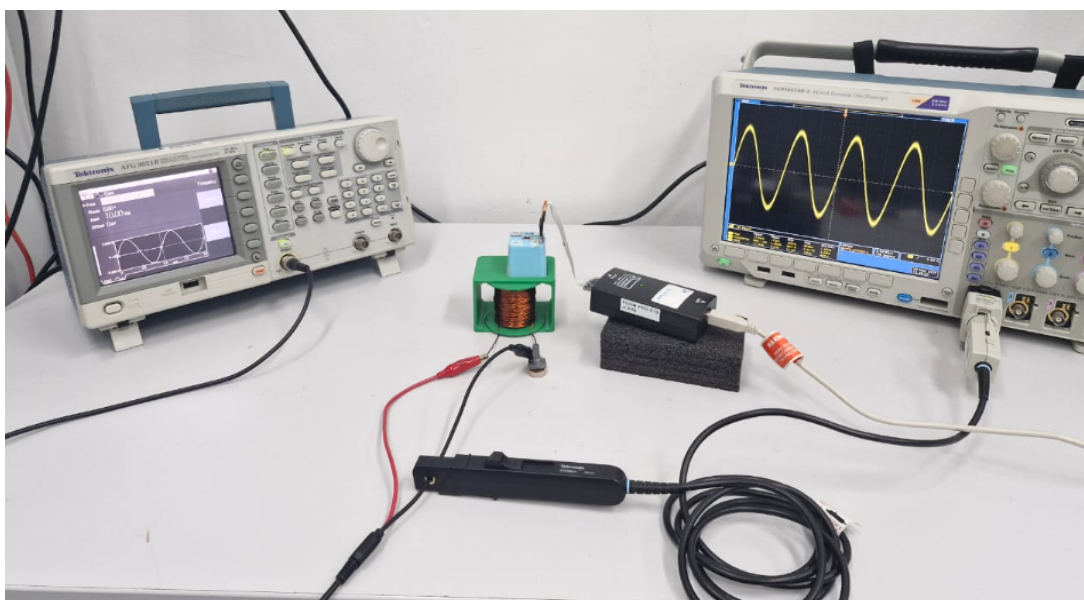
Para a construção da bobina, utilizou-se fio condutor AWG 18, de diâmetro externo igual a 1,024 mm, bitola escolhida por apresentar resistência suficientemente baixa para os níveis de corrente empregados nos ensaios. Como as medições são conduzidas em corrente alternada até 9 kHz, essa escolha foi verificada quanto ao efeito pelicular: aplicando a Equação 7 ao cobre, obtém-se $\delta \approx 8,3$ mm em 63 Hz e $\delta \approx 0,70$ mm em 9 kHz, valores superiores ao raio do condutor, de 0,512 mm, em toda a faixa avaliada. A densidade de corrente pode, portanto, ser considerada aproximadamente uniforme na seção do fio, o que sustenta duas hipóteses adotadas adiante: a representação de cada camada do enrolamento por um raio único no cálculo analítico e a atribuição do campo produzido diretamente à corrente medida pela ponteira, sem correção por redistribuição de corrente no interior do condutor.

A bobina foi enrolada com um total de 230 espiras, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Comparação entre o CAD e a bobina finalizada.

Fonte: Autoral.

A bancada de testes, já configurada com a nova bobina desenvolvida, está ilustrada na Figura 9, representando o arranjo final utilizado para a realização dos experimentos.

Figura 9 – Bancada de testes com a nova bobina.

Fonte: Autoral.

3.3.1 Construção de três bobinas nominalmente idênticas

Como as bobinas utilizadas na bancada experimental foram construídas manualmente, pequenas variações construtivas podem ocorrer durante o processo de fabricação, mesmo quando se busca manter os mesmos parâmetros geométricos e elétricos. Diferenças no espaçamento entre espiras, na tensão aplicada ao fio durante

o enrolamento e no posicionamento das camadas podem influenciar a indutância e, consequentemente, o campo magnético gerado por cada bobina.

Com o objetivo de reduzir a influência dessas variações e permitir uma análise comparativa entre os resultados experimentais, foram construídas três bobinas nominalmente idênticas, identificadas como L1, L2 e L3. Todas foram produzidas seguindo o mesmo procedimento de fabricação, mantendo-se constantes o tipo de fio, o número de espiras, a geometria do enrolamento e as dimensões do suporte utilizado.

Após a construção das bobinas, foi realizada a medição da indutância de cada uma delas utilizando um medidor LCR, modelo Politem 422. O valor de indutância obtido com esse tipo de instrumento depende da frequência e do nível do sinal de teste, do modelo equivalente adotado e da compensação dos cabos, condições que devem acompanhar o resultado. Os valores obtidos foram de $471\ \mu H$ para a bobina L1 (Figura 10), $470\ \mu H$ para a bobina L2 (Figura 11) e $469\ \mu H$ para a bobina L3 (Figura 12). A diferença máxima observada entre as bobinas foi de $2\ \mu H$, correspondente a aproximadamente 0,43% em relação ao valor médio de $470\ \mu H$. Ressalta-se que a proximidade entre indutâncias medidas em uma única condição de teste não demonstra, por si só, equivalência geométrica entre as unidades nem equivalência do campo produzido no ponto de medição, verificação que é retomada no Capítulo 4 a partir dos resultados experimentais das três bobinas.

Figura 10 – Medição da indutância em L1.



Fonte: Autoral.

Figura 11 – Medição da indutância em L2.

Fonte: Autoral.

Figura 12 – Medição da indutância em L3.

Fonte: Autoral.

Dessa forma, as três bobinas foram consideradas adequadas para os ensaios comparativos, permitindo avaliar a resposta do *data logger* em condições experi-

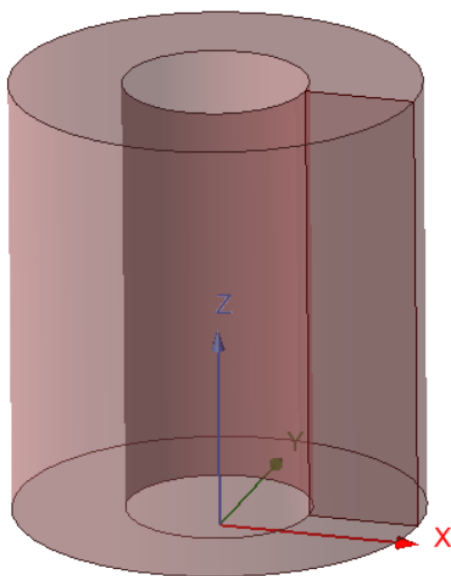
mentais semelhantes e verificar a consistência dos resultados obtidos com diferentes unidades de bobina.

3.4 Simulações desenvolvidas no Ansys Maxwell

Com todos os parâmetros da bobina devidamente definidos, foi possível desenvolver uma simulação completa da bancada no *software* Ansys Maxwell. Nesse ambiente, delimita-se um espaço computacional que, por meio do Método dos Elementos Finitos (FEM, do inglês *Finite Element Method*), é discretizado para permitir a resolução numérica das equações de Maxwell, possibilitando o cálculo do campo magnético variante no tempo.

Para a realização da simulação, algumas considerações foram adotadas. Inicialmente, utilizou-se o solucionador AC Magnetic, apropriado para a análise de campos magnéticos alternados. As dimensões da bobina foram obtidas experimentalmente com o auxílio de um paquímetro, de modo a representar sua geometria de forma mais próxima à construção real.

No modelo computacional, a bobina foi representada como um cilindro perfurado, sendo o número de espiras definido na seção transversal, conforme ilustrado na Figura 13. Essa forma de modelagem é comumente utilizada nesse tipo de solucionador, pois permite representar o comportamento eletromagnético do enrolamento sem a necessidade de modelar individualmente cada espira. A partir dessa configuração, o *software* realiza os cálculos considerando a excitação aplicada, a geometria do modelo, os materiais definidos e o número total de espiras da bobina.

Figura 13 – Bobina desenhada no software Ansys Maxwell.

Fonte: Autoral.

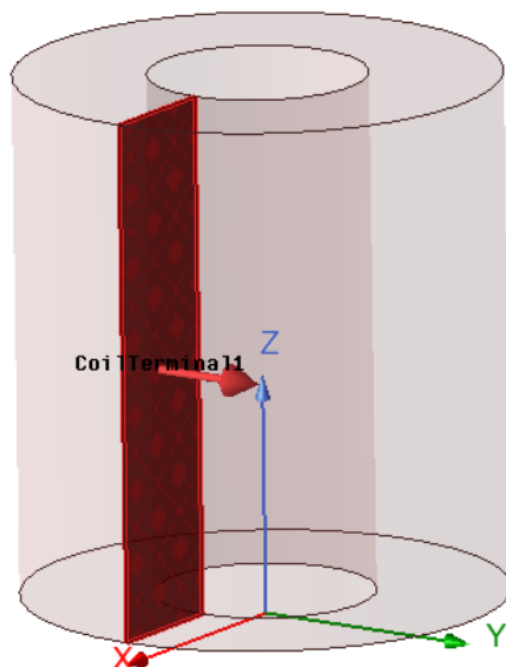
A excitação aplicada ao modelo corresponde à mesma corrente medida no osciloscópio durante os testes de bancada. No solucionador *AC Magnetic*, a corrente não é atribuída ao volume da bobina, mas a uma face de seção transversal do enrolamento, definida como terminal de bobina (*coil terminal*) e visível na Figura 14. Essa face funciona como a superfície através da qual a corrente entra no condutor, e o vetor normal a ela estabelece o sentido de circulação ao longo do caminho fechado formado pelo cilindro perfurado.

Ao terminal são associados dois parâmetros: o valor da corrente, informado como amplitude de pico, e o número de condutores que atravessam a seção, igual ao número total de espiras da bobina. O produto entre ambos define as ampère-espiras efetivamente aplicadas ao modelo, o que dispensa a representação individual de cada espira e permite tratar o enrolamento como um meio condutor equivalente. Adotou-se a configuração de enrolamento do tipo *stranded*, na qual a densidade de corrente é assumida uniforme ao longo de toda a seção, hipótese coerente com a verificação de efeito pelicular, uma vez que a profundidade de penetração permanece superior ao raio do condutor em toda a faixa de frequência avaliada. A frequência de análise, por sua vez, não é atribuída à excitação, mas definida na configuração da solução, sendo alterada a cada ponto da varredura.

O espaçamento da bobina originado pela estrutura de suporte também foi considerado no dimensionamento. Porém, essa estrutura não foi incluída no modelo geométrico, pois é feita em PLA, material não magnético e, portanto, sem influência

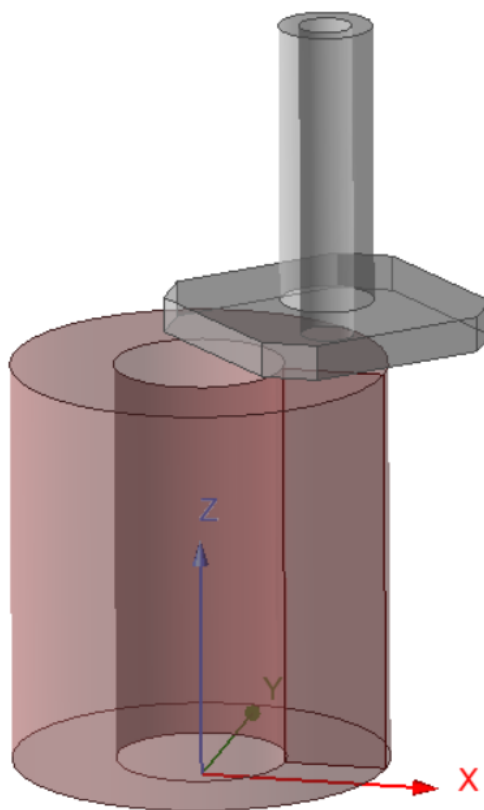
relevante sobre o campo.

Figura 14 – Seção transversal da bobina.



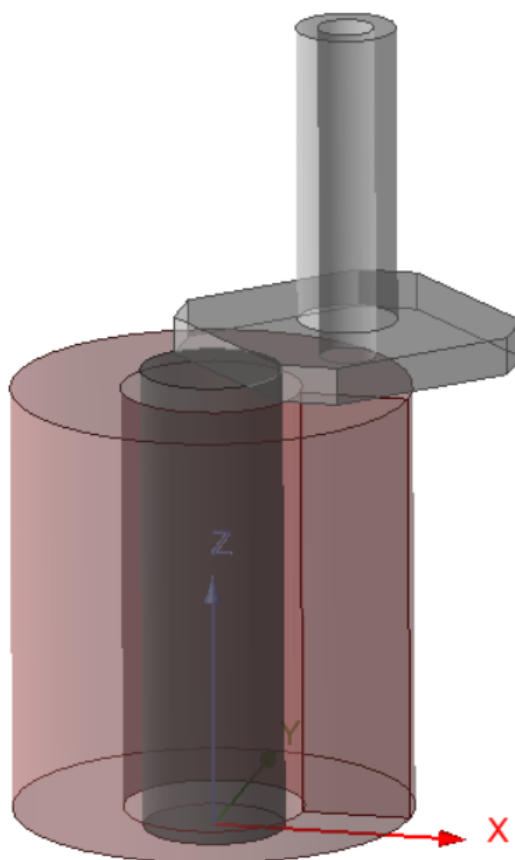
Fonte: Autoral.

Por outro lado, a estrutura metálica central do *data logger*, confeccionada em aço inox e utilizada para fixar o *data logger*, foi devidamente representada no modelo (Figura 15), uma vez que é um material metálico e pode alterar as linhas de campo ao redor da bobina.

Figura 15 – Adição da peça metálica.

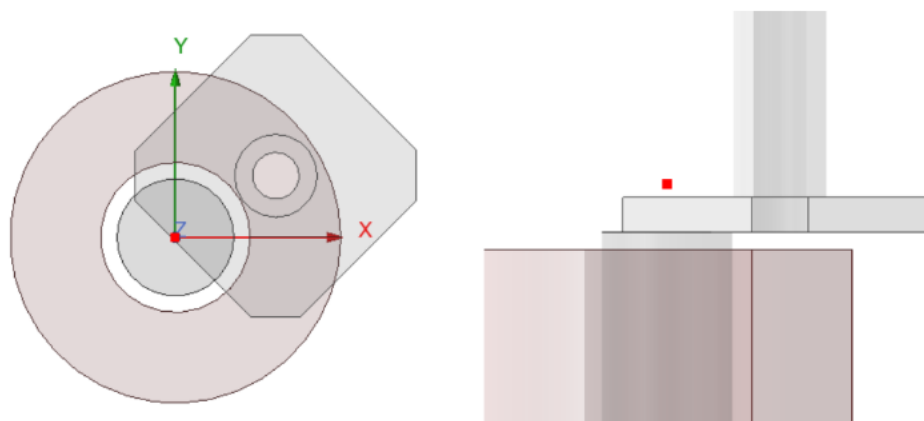
Fonte: Autoral.

Foi incluído ainda no modelo o núcleo de ferrite (Figura 16), considerando o espaçamento imposto pelo carretel. Essa configuração permite habilitar ou remover facilmente o ferrite na simulação, possibilitando análises comparativas do comportamento do sistema com e sem núcleo.

Figura 16 – Adição do ferrite na parte central.

Fonte: Autoral.

Por fim, para obter o valor do campo magnético, foi definido no modelo um ponto de observação (Figura 17), no qual o *software* calcula o fluxo magnético ao longo do tempo. A posição desse ponto corresponde à do elemento sensor no interior do *datalogger*, informada previamente pela Dynamox, uma vez que o encapsulamento do equipamento não permite sua identificação externa. Como o campo decai rapidamente ao longo do eixo em pontos externos ao enrolamento, a coincidência entre o ponto de cálculo e a posição aproximada do sensor é condição necessária para que o valor simulado seja comparável ao medido.

Figura 17 – Adição do ponto de cálculo na simulação.

Fonte: Autoral.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos pelas abordagens teórica, numérica e experimental aplicadas à bancada de testes construída.

4.1 Resposta do ensaio preliminar e influência da taxa de amostragem

Os ensaios preliminares, realizados na bancada inicial com a bobina multifilar, revelaram as primeiras limitações do sistema de medição. Embora o *data logger* identificasse corretamente a frequência do sinal, a magnitude registrada apresentou variações perceptíveis mesmo quando o ensaio era repetido sob condições idênticas de frequência, corrente e montagem. Como a corrente foi mantida constante, esperava-se uma resposta de magnitude estável; as oscilações irregulares observadas, na forma de picos e vales fora do padrão contínuo esperado, indicaram uma instabilidade no comportamento do equipamento.

A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros registrados durante os testes, organizados de forma a permitir a análise conjunta das grandezas medidas pelo gerador de sinal, pelo *data logger* e pelo osciloscópio.

Tabela 1 – Valores iniciais da primeira tabela de testes.

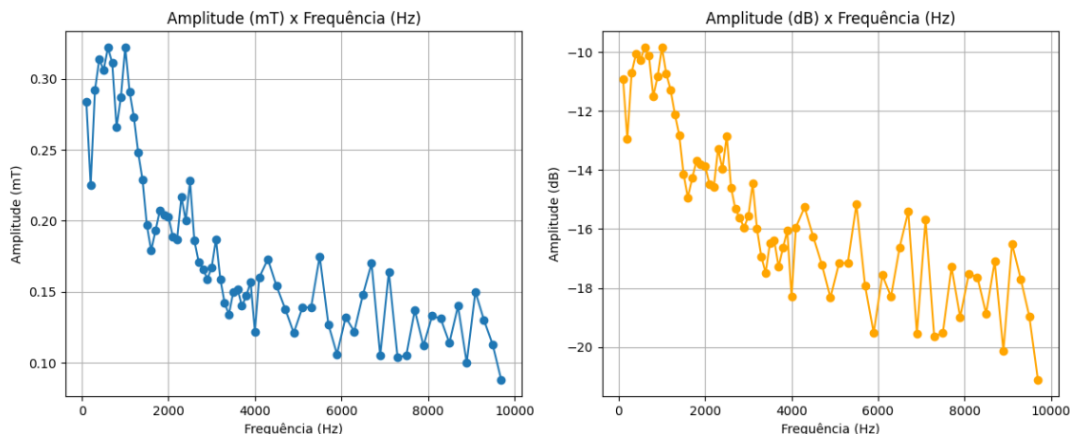
Frequência(Hz) Gerador	Frequência(Hz) Magnetometro	Amplitude(mT) Magnetometro	Amplitude(dB) Magnetometro	CorrenteRMS(mA) Osciloscópio	CorrentePP(mA) Osciloscópio
100	100,023	0,284	-10,91	102	312
200	200,016	0,225	-12,95	102	312
300	299,85	0,292	-10,7	102	312
400	399,84	0,314	-10,07	102	312
500	499,87	0,306	-10,29	101	310
600	599,78	0,322	-9,85	102	312
700	699,83	0,311	-10,13	102	312
800	799,64	0,266	-11,5	102	312
900	899,63	0,287	-10,84	102	312
1000	999,64	0,322	-9,85	102	312
1100	1099,59	0,291	-10,73	102	312
1200	1199,65	0,273	-11,28	102	312
1300	1299,65	0,248	-12,11	102	312
1400	1399,41	0,229	-12,81	102	312
1500	1499,62	0,197	-14,13	102	312
1600	1599,33	0,179	-14,93	102	312
1700	1699,28	0,193	-14,28	101	312
1800	1799,46	0,207	-13,69	101	312
1900	1899,18	0,204	-13,8	102	312
2000	1999,12	0,203	-13,86	102	312
2100	2099,21	0,189	-14,48	102	312

Fonte: Autoral.

Os valores apresentados na tabela foram utilizados para a construção de

gráficos, permitindo uma visualização contínua do comportamento dos resultados ao longo da faixa de frequência analisada. Foram representadas tanto a amplitude do campo magnético em mT quanto a amplitude em dB, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Primeiras curvas de resposta do *datalogger* sem suavização.



Fonte: Autoral.

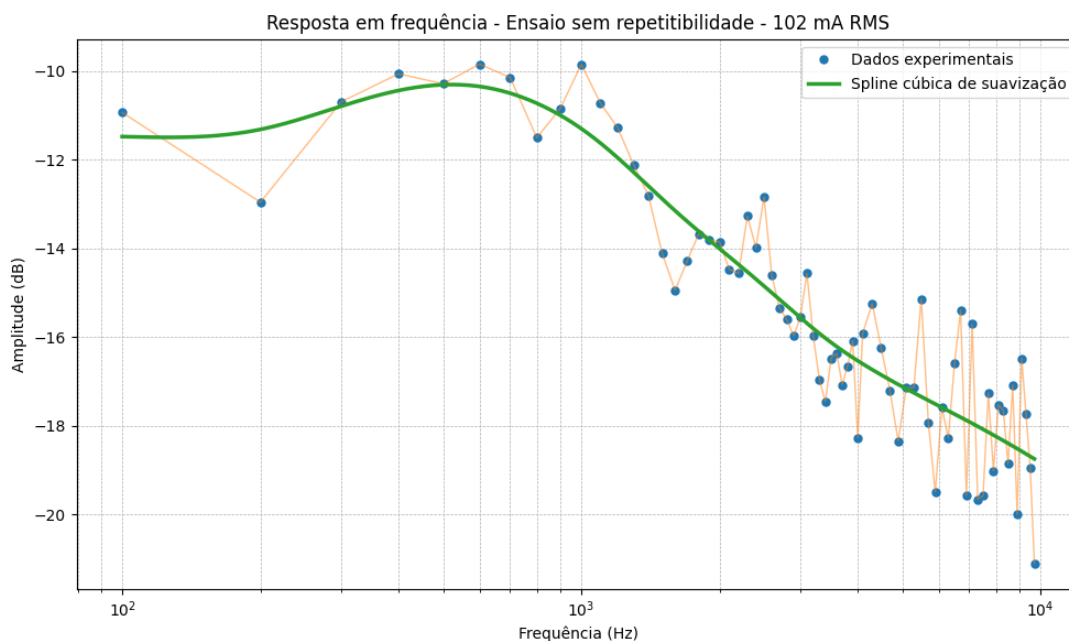
Os dois painéis da Figura 18 representam a mesma medição em escalas distintas. Na escala linear, a amplitude registrada parte de aproximadamente 0,32 mT nas frequências mais baixas e decresce até cerca de 0,10 mT em 9,7 kHz; na escala logarítmica, essa mesma variação corresponde a uma queda de aproximadamente -10 dB para cerca de -21 dB. Como a corrente foi mantida constante em 102 mA RMS em todos os pontos, a resposta esperada seria uma reta horizontal, de modo que a inclinação observada já indica, nos ensaios preliminares, uma dependência da magnitude medida com a frequência.

Além da tendência decrescente, os gráficos evidenciam uma dispersão ponto a ponto que se acentua com a frequência. Até aproximadamente 2 kHz, os pontos consecutivos permanecem relativamente próximos entre si; acima dessa região, medições realizadas em frequências vizinhas chegam a diferir entre 2 e 3 dB, produzindo picos e vales que não podem ser atribuídos ao comportamento físico da bobina, cuja resposta ao longo da faixa é contínua e suave. Como o ensaio foi repetido sob condições idênticas de frequência, corrente e montagem, essa inconsistência de magnitude indica uma possível instabilidade no comportamento do equipamento, e não uma característica da fonte de campo.

Para evidenciar a tendência geral por trás dessa dispersão, os pontos experimentais foram ajustados por uma spline cúbica de suavização, conforme descrito no Capítulo 2. Cabe reforçar que esse ajuste não altera os dados adquiridos nem participa do cálculo de qualquer erro apresentado adiante: ele é aplicado exclusivamente

sobre os valores já obtidos, com a finalidade de representar a tendência da resposta em frequência. Todas as comparações quantitativas deste capítulo utilizam os valores medidos, e não a curva ajustada. Adicionalmente, a utilização de uma escala logarítmica em ambos os eixos contribuiu para uma visualização mais clara das diferenças de magnitude ao longo da faixa de frequências analisada.

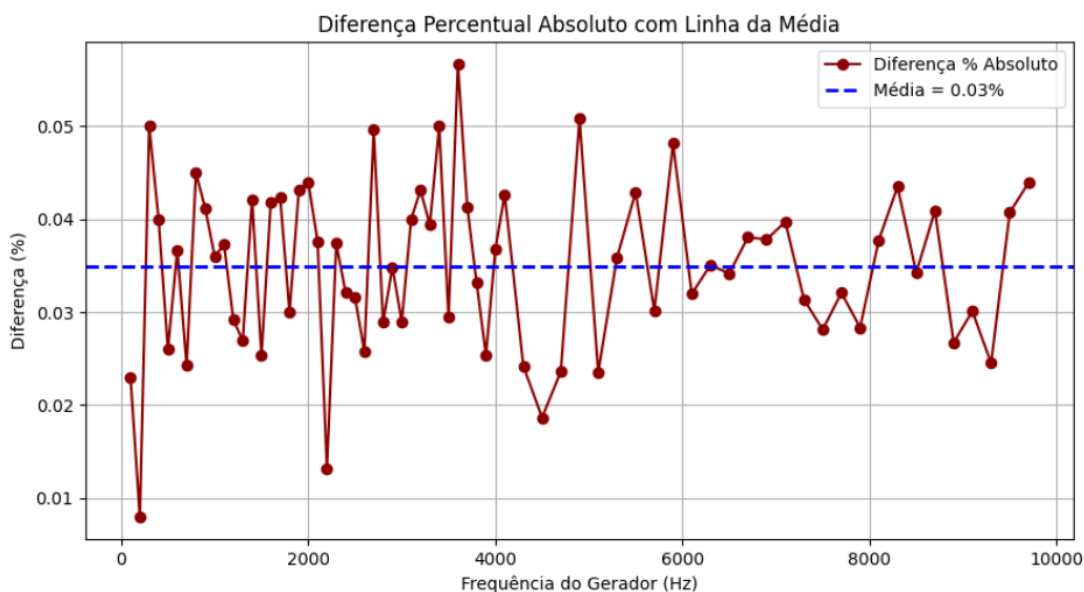
Figura 19 – Primeira curva de resposta suavizada.



Fonte: Autoral.

A curva ajustada da Figura 19 permite identificar duas regiões distintas de comportamento. Entre aproximadamente 300 Hz e 800 Hz, a tendência permanece praticamente plana, em torno de -10 dB, com uma leve redução nos pontos abaixo de 200 Hz. A partir de cerca de 1 kHz, a curva passa a decrescer, atingindo aproximadamente -19 dB no extremo superior da faixa, o que corresponde a uma queda de cerca de 9 dB ao longo de uma década de frequência. Esse comportamento, obtido em um ensaio sem repetição, motivou a adoção de medições repetidas na bancada definitiva.

Adicionalmente, foi realizada a análise da diferença entre a frequência medida pelo *datalogger* e a frequência configurada no gerador de funções, a fim de avaliar a precisão do sistema de aquisição. Aplicou-se uma linha média sobre os dados obtidos, permitindo observar a distribuição dos desvios ao longo do espectro analisado, conforme a Figura 20.

Figura 20 – Diferença entre frequência do gerador e *datalogger*.

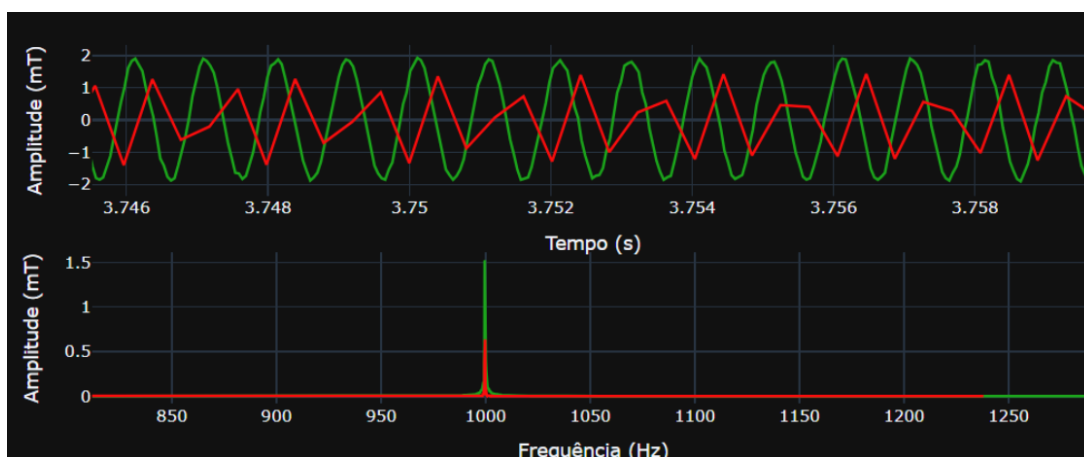
Fonte: Autoral.

Na Figura 20, a diferença percentual absoluta entre as duas frequências permanece inferior a 0,06 % em todos os pontos avaliados, com valor médio de aproximadamente 0,03 %, indicado pela linha tracejada. Os desvios distribuem-se de forma aparentemente aleatória em torno dessa média, sem tendência crescente ou decrescente ao longo do espectro. Estabelece-se, assim, um contraste que se mantém em todo o trabalho: a identificação da frequência é precisa, ao passo que a estimativa de magnitude apresenta desvios de vários decibéis.

4.1.1 Investigação da taxa de amostragem

Com o objetivo de ilustrar o efeito da relação entre a taxa de amostragem e a frequência do sinal sobre a estimativa de amplitude, realizou-se um ensaio demonstrativo por meio de dois testes de medição utilizando diferentes ajustes de aquisição.

A Figura 21 apresenta um teste de comparação realizado com um sinal de 1 kHz, em que foram configurados dois limites distintos de banda de leitura: 10 kHz (curva verde) e 1,2 kHz (curva vermelha). Cabe esclarecer que esses valores correspondem ao limite de banda ajustado no equipamento, e não à taxa de amostragem: em cada caso a taxa adotada é o dobro do limite configurado, resultando em $f_s = 20$ kHz e $f_s = 2,4$ kHz, respectivamente. Ambas as condições atendem, portanto, ao critério de Nyquist para o sinal de 1 kHz. Observa-se uma diferença expressiva nas magnitudes obtidas, ainda que a frequência tenha sido corretamente identificada em ambos os casos. Este ensaio é apresentado como demonstração do efeito da proximidade entre a frequência do sinal e o limite de banda configurado sobre a estimativa de amplitude.

Figura 21 – Investigação da taxa de amostragem no *datalogger*.

Fonte: elaboração própria (2026).

Adicionalmente, observa-se uma diferença visual expressiva na resolução temporal da forma de onda, fator que aparenta impactar diretamente no valor de magnitude do sinal medido. Na onda verde, correspondente ao limite de banda de 10 kHz, há aproximadamente 20 amostras por período, o que mostra uma representação adequada e fiel da forma de onda. Por outro lado, na onda vermelha, cujo limite de banda foi restringido a 1,2 kHz, o número de amostras por período reduz-se para cerca de 2.

4.2 Resultado do cálculo de campo da bobina

Para essa etapa, foi considerado a bobina em condição isolada, ou seja, sem a presença do núcleo de ferrite e sem a peça metálica central do *datalogger*.

Utilizando a Equação 9, a soma das contribuições individuais de cada camada permitiu determinar o valor do campo magnético no ponto localizado em $z = 30,5$ mm sobre o eixo central da bobina, com $x = y = 0$. Essa posição corresponde ao ponto estimado de medição do *datalogger*, definido experimentalmente com o auxílio de um paquímetro.

Essa coordenada decorre diretamente da geometria da bancada. Como a origem do eixo z foi fixada no centro geométrico do enrolamento, a posição do ponto de medição corresponde à soma de duas parcelas: a metade da altura do enrolamento, igual a 25 mm, e a distância de 5,5 mm entre o topo do enrolamento e o elemento sensível do *datalogger* no interior do *datalogger*. Obtém-se, assim, $z = 25 + 5,5 = 30,5$ mm. O registro explícito dessa composição é necessário para a reprodução do cálculo, uma vez que, em pontos externos ao enrolamento, o campo decai rapidamente ao longo do eixo e pequenos deslocamentos do ponto de observação produzem variações relevantes no valor obtido.

Para realizar o cálculo aproximado do campo magnético gerado pela bo-

bobina, apresentada na Equação 9, considerou-se a distribuição das espiras em camadas concêntricas. Com base nas características construtivas do enrolamento, verificou-se que cada camada comporta aproximadamente 38 espiras. Esse valor corresponde à quantidade de espiras que pode ser acomodada ao longo do carretel em uma única camada, sendo limitado pelas dimensões físicas da estrutura utilizada para o enrolamento.

Assim, ao dividir o total de 230 espiras pela quantidade aproximada de 38 espiras por camada, obteve-se um total de aproximadamente 6 camadas completas. Além disso, considerando o diâmetro do fio AWG 18, igual a 1,024 mm, foi aplicada uma correção progressiva no raio de cada camada. Dessa forma, a cada nova camada, o raio considerado no cálculo foi incrementado pelo diâmetro do fio, permitindo representar de maneira mais fiel a distância radial das espiras em relação ao eixo central da bobina.

Para a obtenção dos resultados, o campo magnético total foi calculado, no ponto localizado a 30,5 mm no eixo central da bobina, mantendo-se a corrente constante em 155,6 mA pico, conforme discutido na Seção 4.4. Como o campo magnético gerado pela bobina é diretamente dependente da corrente aplicada, e esta foi mantida constante ao longo de toda a análise, esperava-se que o valor calculado do campo permanecesse inalterado para todas as frequências avaliadas. Dessa forma, obteve-se um campo magnético de 215,66 μT em toda a faixa de frequência considerada. Cabe ressaltar que essa constância é uma propriedade do modelo adotado, no qual todos os parâmetros são independentes da frequência.

4.3 Comparação dos resultados calculados com a simulação

Antes da simulação do campo magnético, foi realizada no *software* uma análise da indutância da bobina (Figura 22), com o objetivo de comparar os valores obtidos numericamente com aqueles medidos experimentalmente. Essa etapa permitiu verificar a coerência entre o modelo computacional e a bobina construída antes da análise do campo magnético gerado.

Figura 22 – Indutância na bobina calculada pelo software.

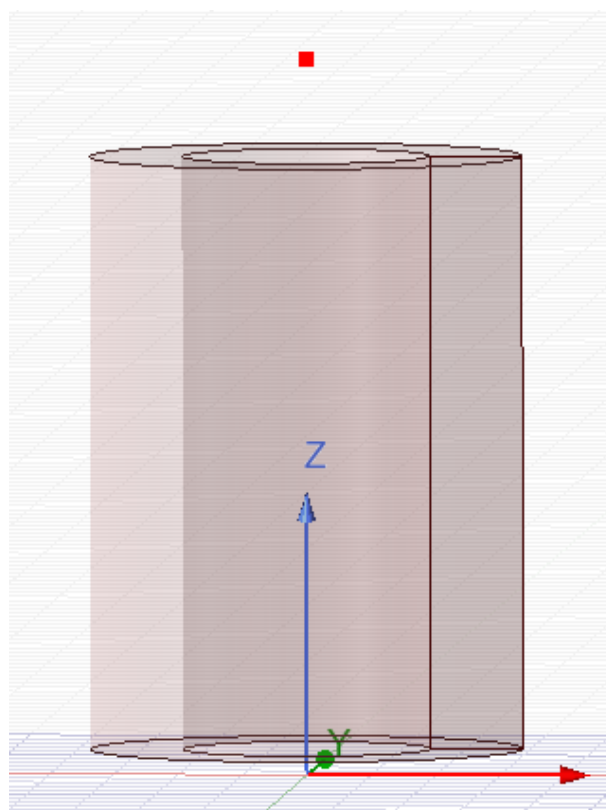
The screenshot shows a software interface for calculating inductance. It features several dropdown menus and buttons. The 'Parameter' dropdown is set to 'Matrix1', 'Type' is 'Inductance', 'Pass' is '2', and 'Inductance Units' is 'uH'. There is a 'PostProcessed' checkbox which is unchecked. Below these are buttons for 'View', 'Format', and 'Export'. At the bottom, there is a table with two columns: the first column lists 'Winding1' and the second column shows the value '475.35'.

	Winding1
Winding1	475.35

Fonte: Autoral.

O valor médio de indutância obtido experimentalmente para as bobinas foi de $470\mu\text{H}$. Ao comparar esse resultado com o valor determinado por simulação numérica, igual a $475\mu\text{H}$, verifica-se uma diferença absoluta de $5\mu\text{H}$, correspondente a um erro relativo de aproximadamente 1,05%. Esse baixo desvio indica boa concordância entre o modelo computacional e as bobinas construídas, considerando que estas foram construídas de forma artesanal, demonstrando que a geometria e os parâmetros adotados na simulação representam adequadamente o comportamento indutivo do sistema experimental.

Na simulação foi utilizada apenas a bobina operando em regime magnético quase-estático. A Figura 23 ilustra o ponto de simulação para comparação com os resultados calculados.

Figura 23 – Ponto de cálculo da bobina.

Fonte: Autoral.

Assim como nos cálculos teóricos, considerando a aplicação sem ferrite, foi aplicada à bobina uma corrente de 155,6 mA pico. A Figura 24 apresenta os resultados obtidos por simulação, com o valor de 202,74 μT .

Figura 24 – Resultado da simulação sem ferrite no Ansys Maxwell.

Mag_B [uTesla]
Setup1 : LastAdaptive
Phase='0deg'
202.737847

Fonte: Autoral.

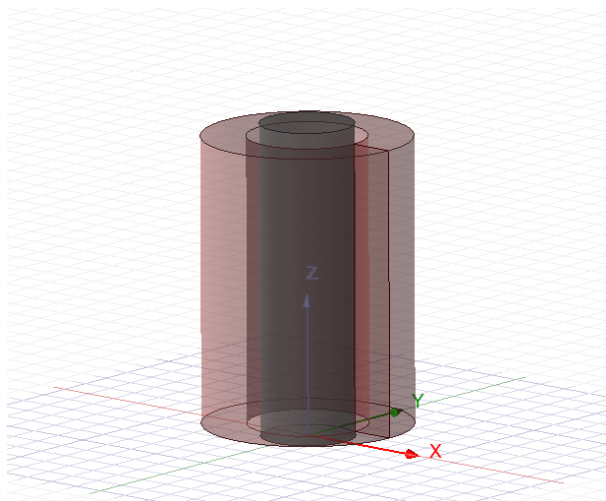
A partir dos valores obtidos, foi realizada a comparação entre o resultado analítico, de 215,66 μT , e o resultado da simulação numérica, de 202,74 μT . O erro relativo entre os dois métodos foi de aproximadamente 5,99%.

Com a coerência da simulação verificada por meio do cálculo analítico no cenário sem núcleo de ferrite, foi possível inserir o núcleo de ferrite no modelo computacional, reproduzindo a condição avaliada experimentalmente. Entretanto, nessa configuração, a obtenção de um valor analítico direto torna-se mais complexa, pois o

campo magnético passa a se distribuir em um meio composto por materiais com diferentes permeabilidades magnéticas, incluindo o ar e o ferrite. Dessa forma, a definição de uma única permeabilidade equivalente para representar todo o caminho do campo não seria adequada sem a adoção de simplificações adicionais.

Por esse motivo, para a condição com núcleo de ferrite, adotou-se como referência apenas o resultado obtido por simulação numérica. Considerando o mesmo ponto de análise e mantendo as mesmas condições de operação, apenas alterando a corrente para 62,2 mA de pico, equivalente aos 44 mA RMS aplicados nos ensaios práticos, a simulação com a presença do núcleo de ferrite resultou em um campo magnético de 361,92 μT (Figuras 25 e 26).

Figura 25 – Aplicação do ferrite na simulação.



Fonte: Autoral.

Figura 26 – Resultado da simulação com ferrite no Ansys Maxwell.

Mag_B [uTesla] Setup1 : LastAdaptive Phase='0deg'
361.915066

Fonte: Autoral.

4.4 Resultados da bancada experimental

A partir dos ensaios preliminares, verificou-se que não havia necessidade de realizar medições em uma quantidade tão elevada de frequências distintas, uma vez que a curva obtida já permitia identificar o comportamento geral do equipamento. Entretanto, observou-se certa instabilidade nas medições pontuais, o que indicou a

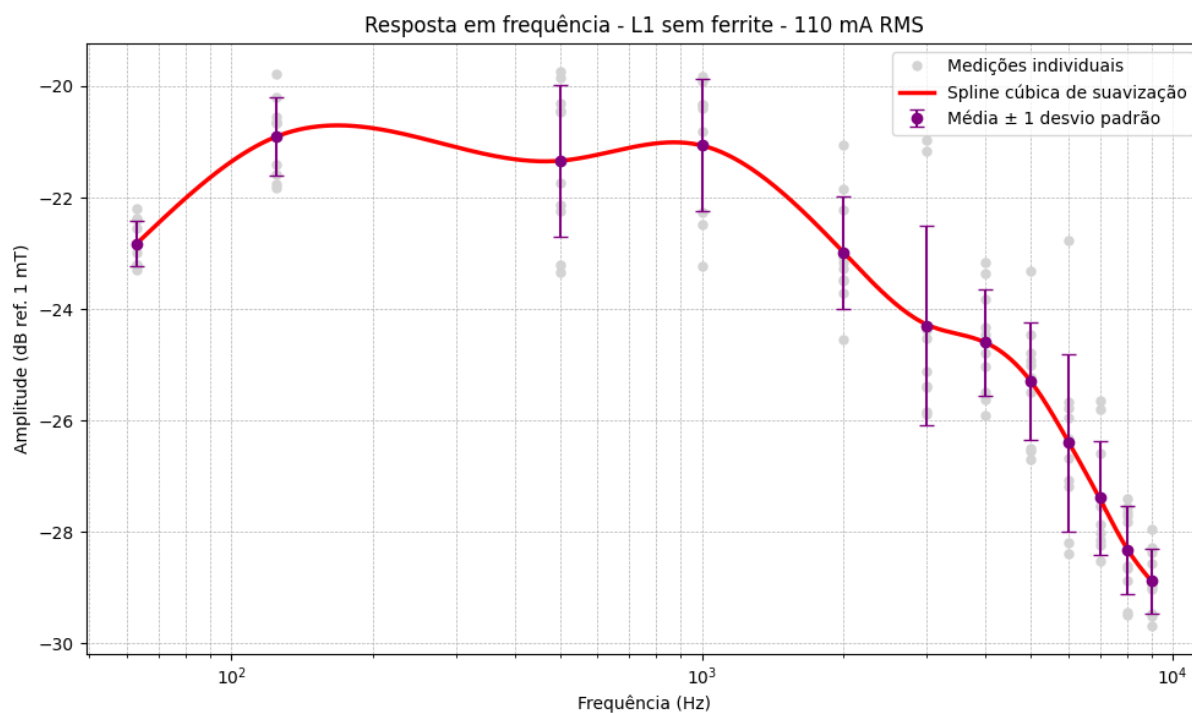
necessidade de priorizar a repetibilidade dos ensaios. Dessa forma, reduziu-se o número de frequências analisadas, evitando uma discretização excessiva da curva, e foram acrescentadas repetições em cada ponto de frequência. Assim, o procedimento passou de 69 medições individuais, sem repetição, para um conjunto de 130 medições totais, permitindo uma avaliação mais consistente da resposta do equipamento.

As medições foram realizadas nas frequências de 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz e, posteriormente, de 1 kHz a 9 kHz com incremento de 1 kHz. No total, foram efetuadas 130 medições, correspondendo a 10 ensaios para cada frequência. O valor final apresentado para cada ponto da curva corresponde à média dessas 10 medições.

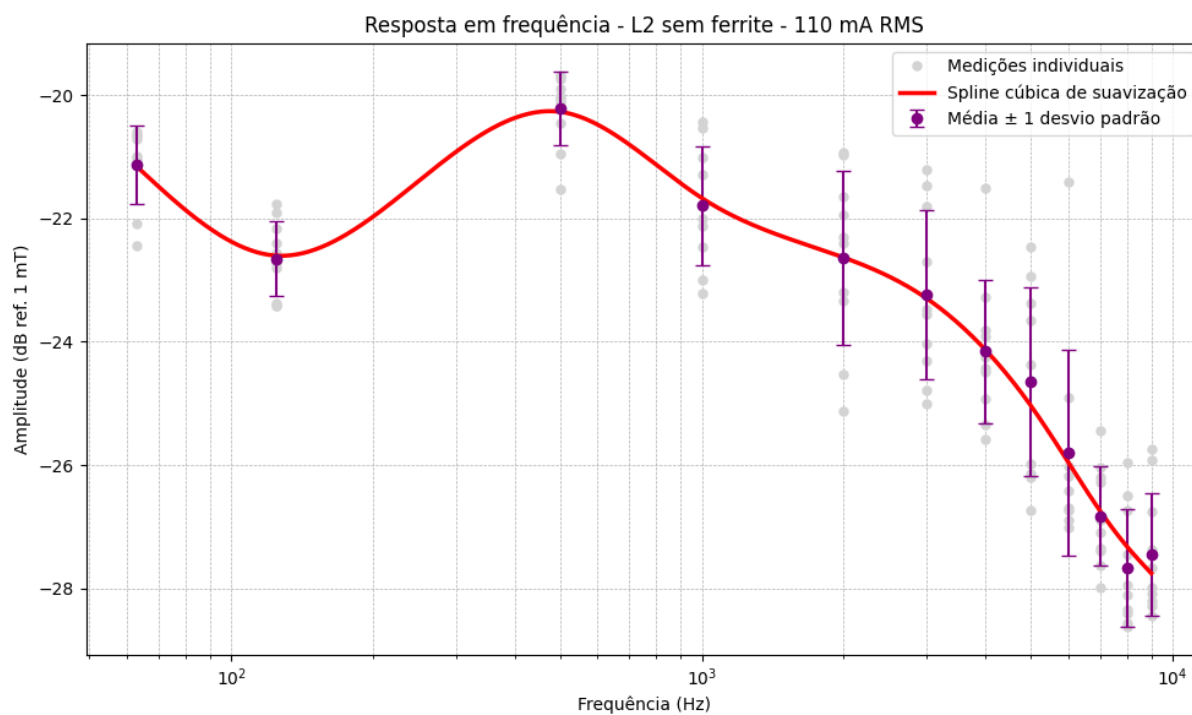
Para cada uma das três bobinas, foram realizadas duas baterias de ensaios experimentais, sendo uma com a inserção do núcleo de ferrite e outra sem a presença do núcleo. Dessa forma, foram totalizadas 780 medições. Considerando que cada medição adquiriu aproximadamente 102,4 mil amostras, os resultados práticos apresentados neste trabalho foram obtidos a partir de aproximadamente 79,9 milhões de amostras de campo magnético variante no tempo.

Nos ensaios experimentais, a corrente aplicada foi definida com base no maior valor que poderia ser mantido até a maior frequência analisada. Dessa forma, para os testes sem núcleo de ferrite, foi utilizada uma corrente de 110 mA RMS, enquanto, para os testes com núcleo de ferrite, foi adotada uma corrente de 44 mA RMS. Para sinais senoidais, esses valores correspondem, respectivamente, a 155,6 mA e 62,2 mA de amplitude de pico, que são as excitações aplicadas nas simulações; trata-se, portanto, da mesma condição elétrica expressa em convenções distintas, e não de correntes diferentes entre experimento e simulação. Como a corrente foi mantida constante ao longo de toda a faixa de frequência estudada, esperava-se que o campo magnético resultante também apresentasse comportamento aproximadamente constante.

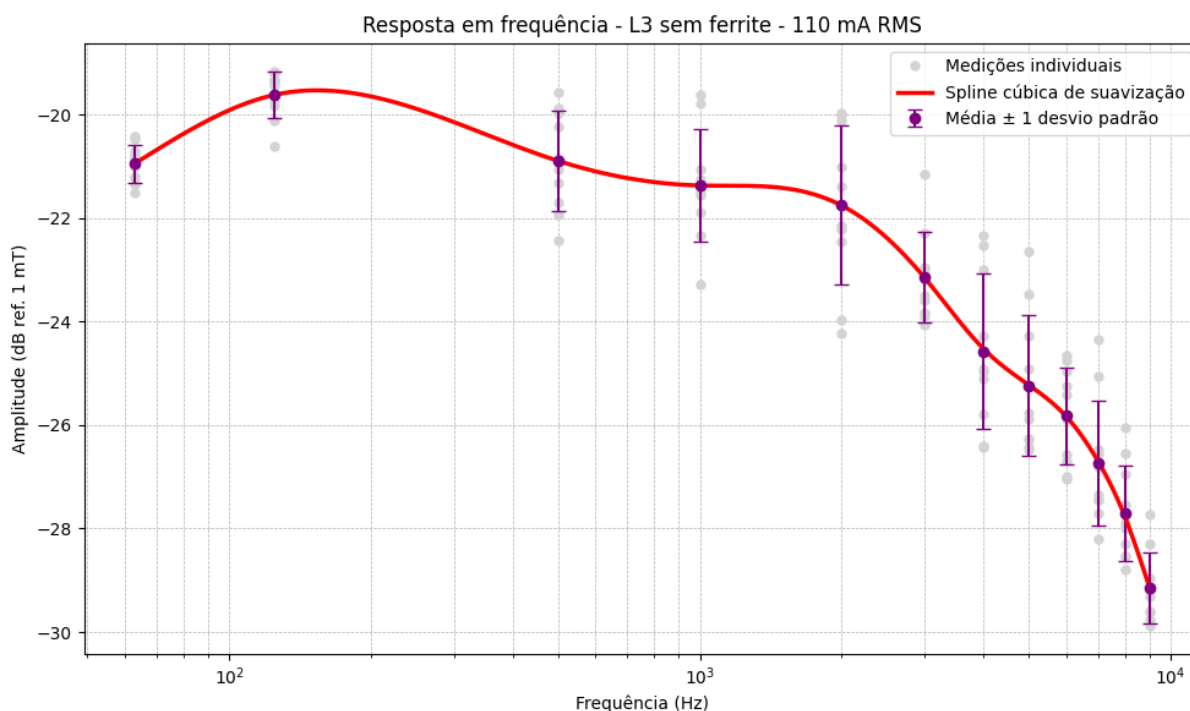
Os resultados obtidos individualmente para as três bobinas, na configuração sem núcleo de ferrite, são apresentados nas Figuras 27, 28 e 29. Cada gráfico reúne três representações: as dez medições individuais de cada frequência, correspondentes aos valores de pico identificados por meio da FFT; a média dessas medições, acompanhada de barras de ± 1 desvio padrão; e a spline cúbica de suavização ajustada sobre os valores médios. Reitera-se que a spline cumpre função exclusivamente de visualização da tendência, não sendo empregada em nenhum dos cálculos de erro apresentados nas seções seguintes.

Figura 27 – Resultado da bancada da bobina L1 sem ferrite.

Fonte: Autoral.

Figura 28 – Resultado da bancada da bobina L2 sem ferrite.

Fonte: Autoral.

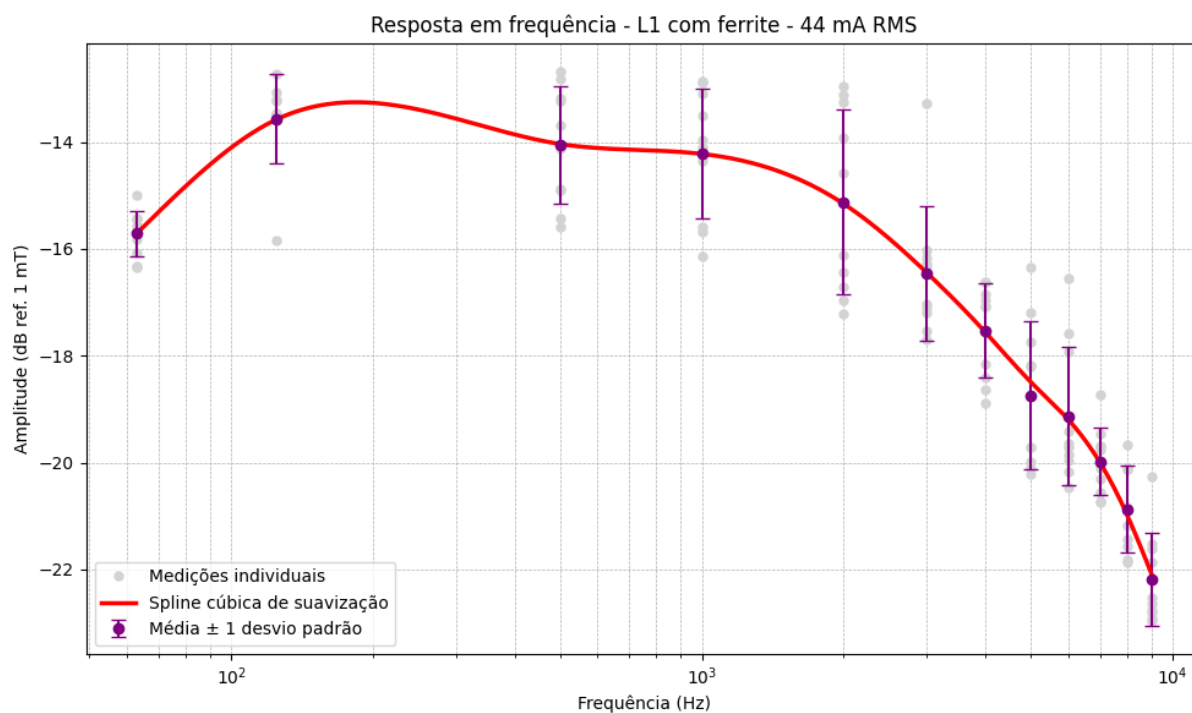
Figura 29 – Resultado da bancada da bobina L3 sem ferrite.

Fonte: Autoral.

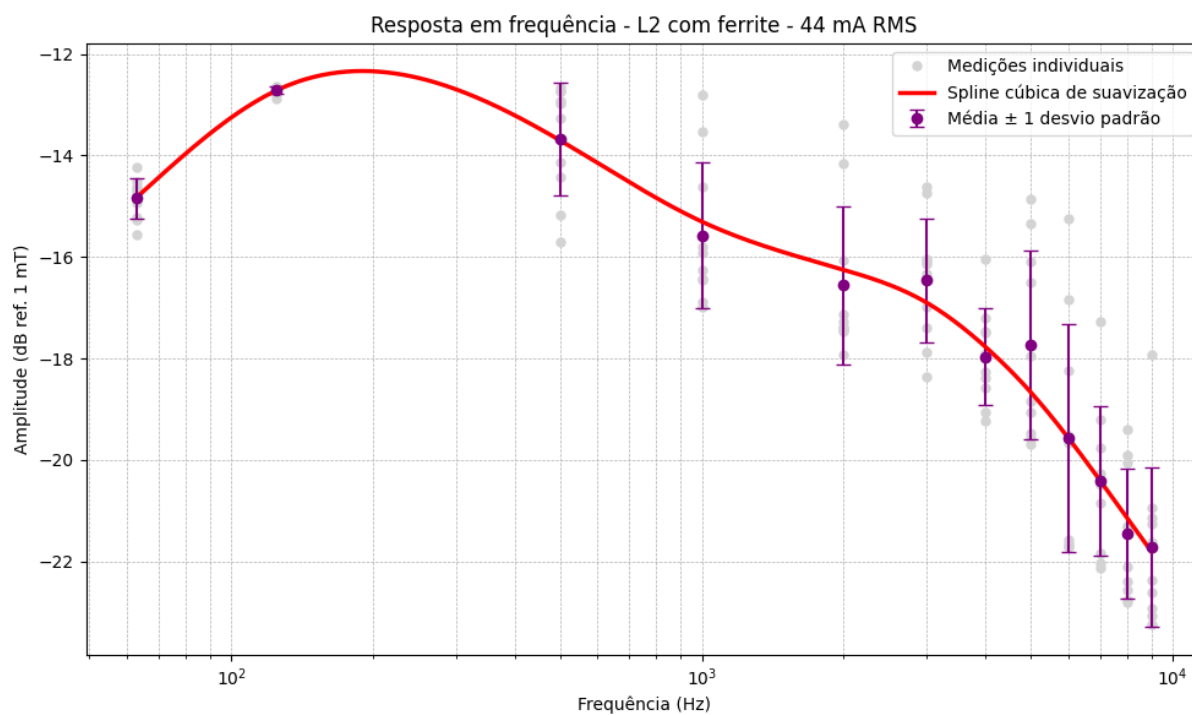
As três curvas sem núcleo de ferrite compartilham a mesma forma geral: uma região de baixa frequência em que a amplitude permanece aproximadamente estável, entre $-19,6$ e $-22,9$ dB conforme a unidade ensaiada, seguida de um decaimento que se inicia em torno de 1 kHz e prossegue até o extremo superior da faixa, onde as três bobinas convergem para valores entre $-27,5$ e -29 dB em 9 kHz. A queda acumulada é, portanto, da ordem de 6 a 8 dB entre a região plana e 9 kHz, em uma condição na qual a corrente foi mantida constante e o campo produzido deveria ser invariante com a frequência.

As barras de desvio padrão não são uniformes ao longo da faixa. Nos pontos de 63 Hz e 125 Hz, a dispersão entre as dez repetições é pequena, da ordem de $\pm 0,5$ dB, enquanto em 500 Hz, 1 kHz e nas frequências acima de 3 kHz ela chega a aproximadamente $\pm 1,5$ dB. Esse aumento da dispersão em pontos específicos, e não de forma progressiva com a frequência, indica que a instabilidade identificada nos ensaios preliminares persiste na bancada definitiva.

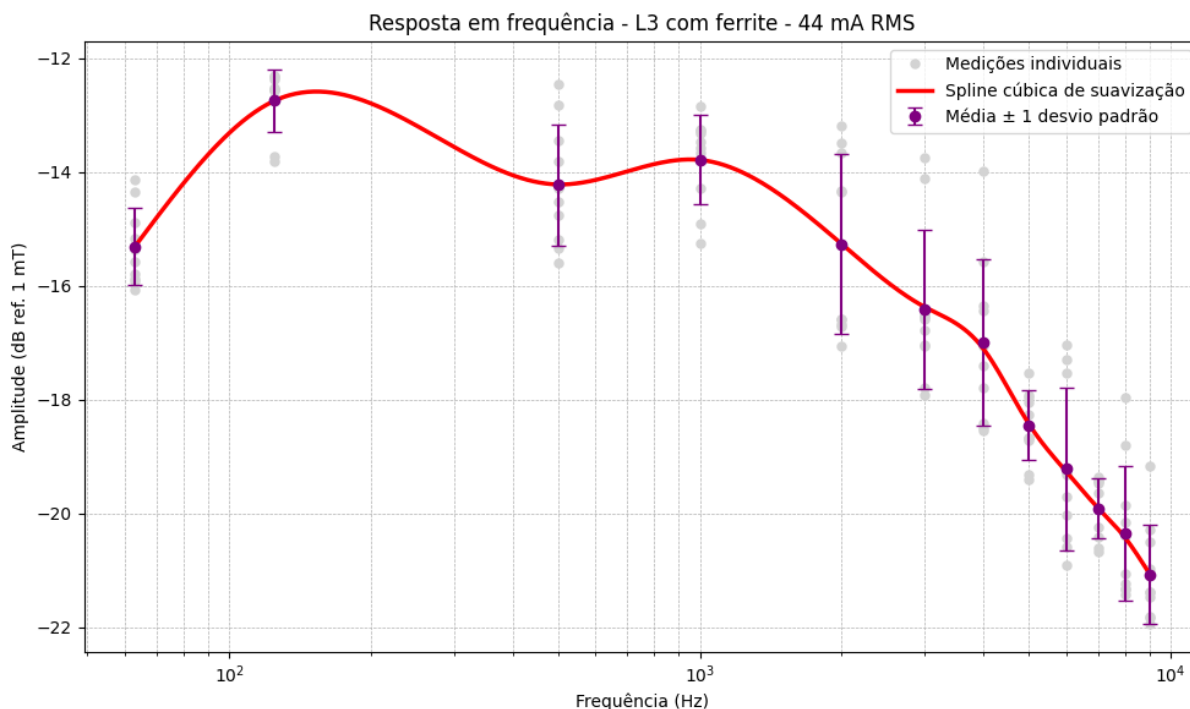
Os resultados obtidos individualmente para as três bobinas, utilizando núcleo de ferrite, são apresentados nas Figuras 30, 31 e 32.

Figura 30 – Resultado da bancada da bobina L1 com ferrite.

Fonte: Autoral.

Figura 31 – Resultado da bancada da bobina L2 com ferrite.

Fonte: Autoral.

Figura 32 – Resultado da bancada da bobina L3 com ferrite.

Fonte: Autoral.

Com a inserção do núcleo de ferrite, as curvas deslocam-se para cima em aproximadamente 6 dB em relação à condição sem núcleo, embora a corrente aplicada tenha sido reduzida de 110 mA RMS para 44 mA RMS. Esse deslocamento é o efeito esperado da concentração do fluxo magnético pelo material de alta permeabilidade. A forma das curvas, contudo, permanece essencialmente a mesma: região aproximadamente estável entre 63 Hz e 1 kHz, com valores entre $-12,7$ e $-15,7$ dB, seguida de decaimento monotônico até valores entre -21 e $-22,3$ dB em 9 kHz. As três unidades voltam a apresentar seus máximos em torno de 125 Hz e a convergir nas frequências mais altas.

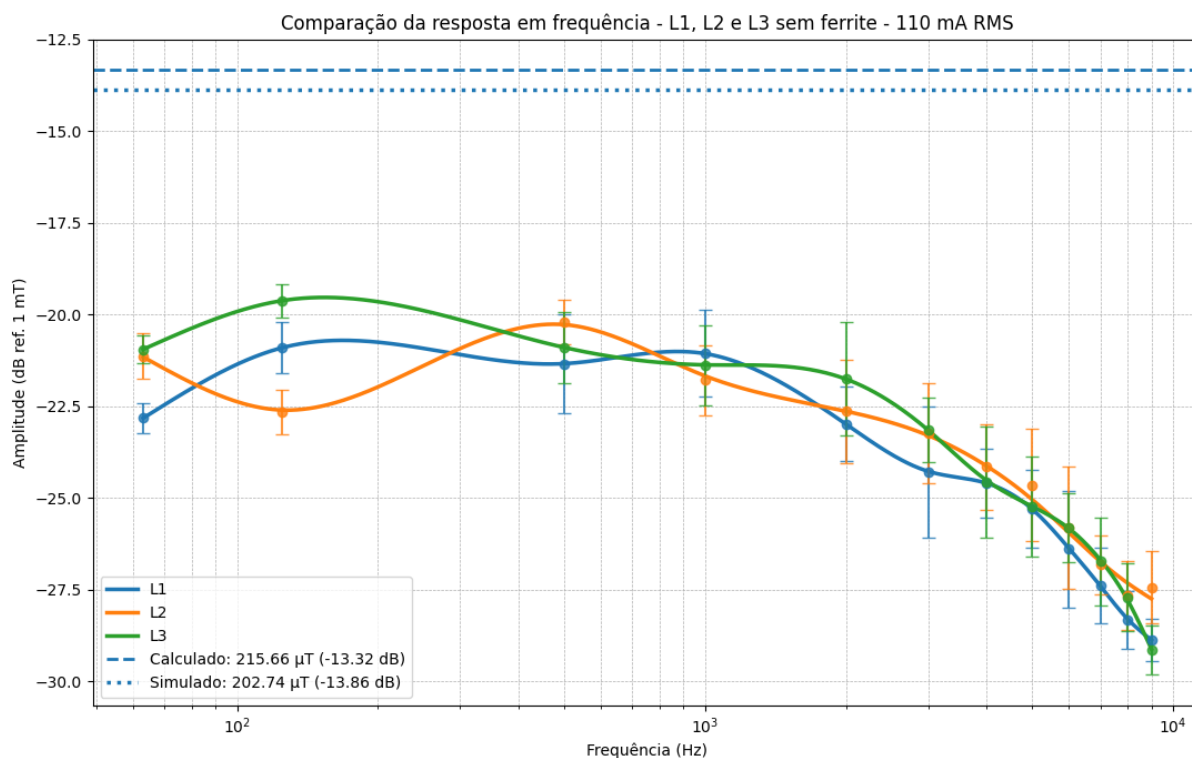
O ponto relevante dessa comparação é que a atenuação em alta frequência não foi eliminada pela presença do núcleo: sua magnitude é da mesma ordem nas duas configurações, aproximadamente 8 dB entre a região plana e 9 kHz. Como o ferrite altera o campo aplicado ao sensor, mas não a cadeia de medição do equipamento, a persistência do decaimento em ambas as condições indica que o fenômeno pode estar associado ao sistema de medição do equipamento *datalogger*.

4.5 Comparação dos resultados para a bancada sem ferrite

Ao comparar os resultados obtidos na bancada de ensaios sem núcleo de ferrite, apresentados na Figura 33, observa-se a consistência entre as curvas. De modo geral, as curvas apresentaram comportamento semelhante ao longo de toda

a faixa de frequência analisada, com pequenas variações entre as medições, permanecendo dentro de uma faixa considerada aceitável para os ensaios experimentais realizados.

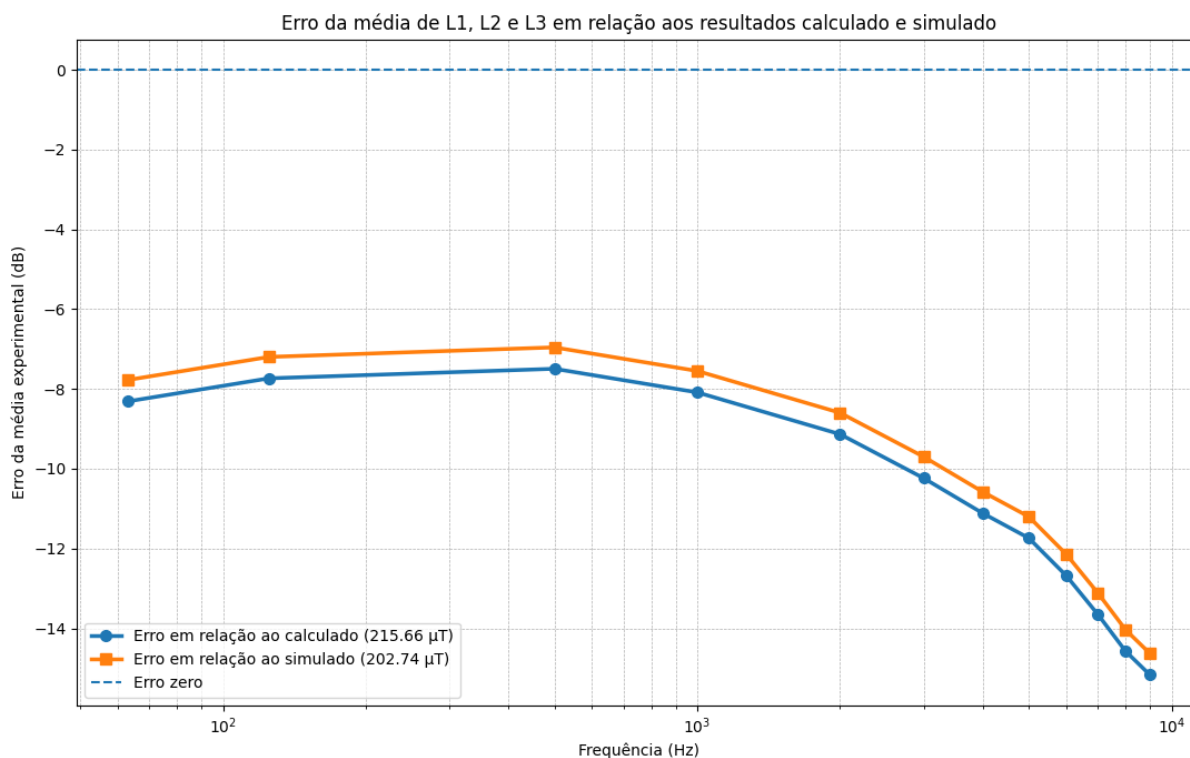
Figura 33 – Resultados dos testes sem ferrite.



Fonte: Autoral.

No gráfico, são apresentadas duas linhas de referência: 215,66 μ T, equivalente a -13,32 dB, correspondente ao valor obtido por meio dos cálculos analíticos, e 202,74 μ T, equivalente a -13,86 dB, correspondente ao resultado obtido por simulação numérica. As duas referências são representadas por linhas horizontais, coerentes com a expectativa de campo constante ao longo de toda a faixa, e permanecem separadas entre si por apenas 0,54 dB, o que reflete a concordância entre as duas abordagens discutida na Seção 4.3.

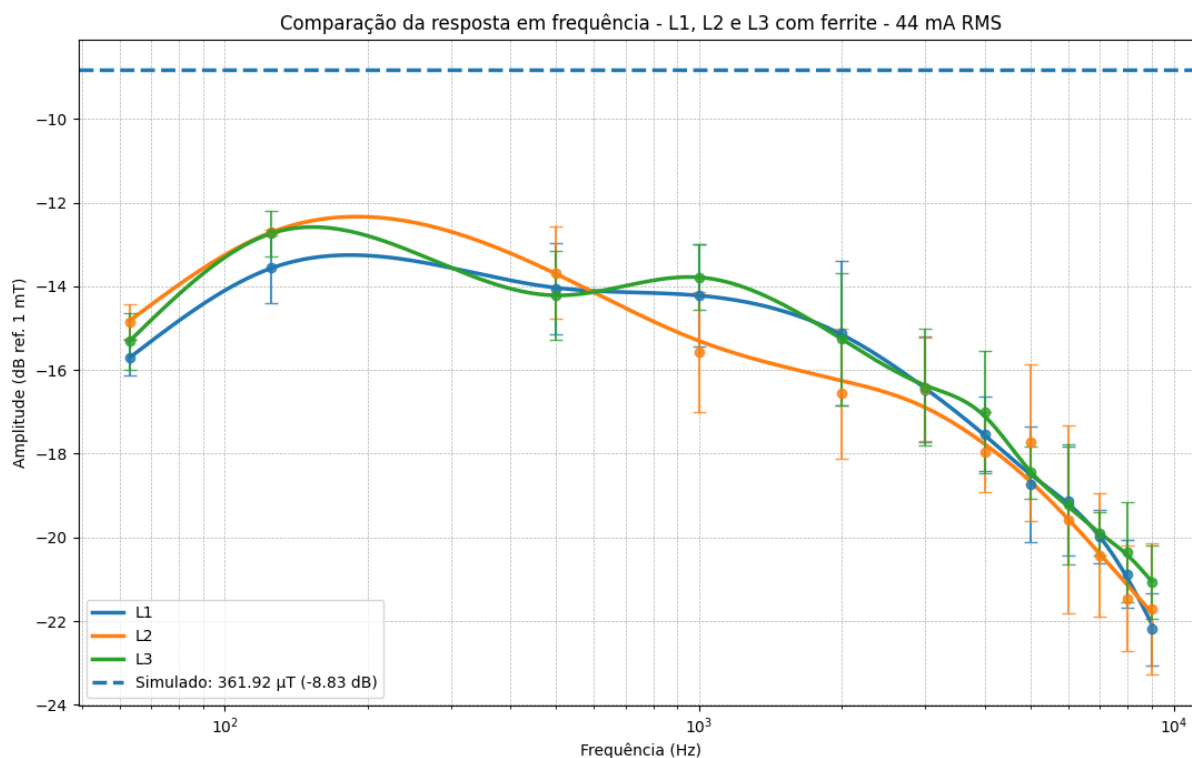
Nenhuma das curvas experimentais alcança essas referências em qualquer ponto da faixa avaliada: todas permanecem abaixo delas, e o afastamento cresce com a frequência. Para melhor quantificar esse comportamento, a Figura 34 apresenta o erro da média das três bobinas em relação a cada uma das referências, expresso em decibéis.

Figura 34 – Erro da média dos testes sem ferrite.

As duas curvas de erro são praticamente paralelas, separadas pelos mesmos 0,54 dB que distinguem as referências, o que confirma que a escolha entre a referência analítica e a numérica não altera as conclusões. O erro apresenta um mínimo em módulo em torno de 500 Hz, com aproximadamente $-7,0$ dB em relação ao valor simulado e $-7,5$ dB em relação ao calculado, e permanece aproximadamente estável entre 63 Hz e 1 kHz, variando nessa região entre cerca de 7 e 8 dB. Em termos lineares, essa faixa corresponde a erros relativos entre aproximadamente 55 % e 60 % do valor de referência. A partir de 2 kHz, o erro passa a crescer de forma progressiva, atingindo cerca de $-14,2$ dB em relação ao valor simulado e $-14,7$ dB em relação ao calculado na frequência de 9 kHz, o que equivale a um erro relativo próximo de 80 %.

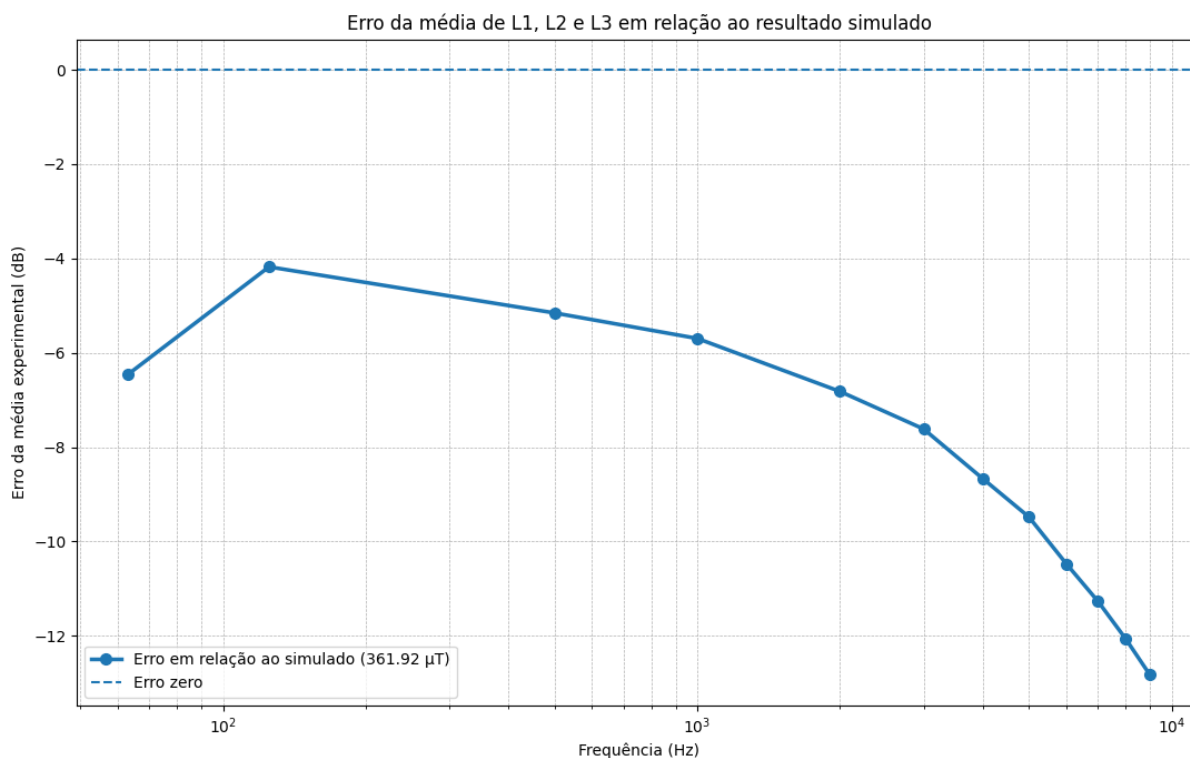
4.6 Comparação dos resultados para a bancada com ferrite

A análise dos resultados obtidos na bancada experimental com núcleo de ferrite, apresentados na Figura 35, evidencia boa concordância entre as curvas. De forma geral, as curvas mantiveram uma tendência semelhante ao longo de toda a faixa de frequência avaliada, apresentando apenas pequenas variações entre as medições, as quais permaneceram dentro de uma faixa aceitável para os ensaios realizados.

Figura 35 – Resultados dos testes com ferrite.

Fonte: Autoral.

No gráfico, é indicada uma linha de referência em 361,92 μ T, equivalente a -8,83 dB, associada ao valor obtido por meio da simulação numérica. Assim como na configuração sem núcleo, todas as curvas experimentais permanecem abaixo da referência em toda a faixa avaliada, e o afastamento cresce com a frequência. O erro da média das três bobinas em relação a essa referência é apresentado na Figura 36.

Figura 36 – Erro da média dos testes com ferrite.

O comportamento da Figura 36 reproduz, em outro patamar, o mesmo padrão observado sem o núcleo. O menor erro em módulo ocorre em 125 Hz, com aproximadamente $-4,2$ dB, equivalente a cerca de 38 % de erro relativo. Entre 63 Hz e 1 kHz o erro permanece contido entre cerca de 4 e 6,5 dB, correspondendo a erros relativos entre aproximadamente 38 % e 52 %. A partir de 2 kHz, o crescimento retoma o caráter progressivo, atingindo cerca de $-12,9$ dB em 9 kHz, o que equivale a um erro relativo próximo de 77 %.

Comparando as duas configurações, o erro absoluto na condição com ferrite é reduzido, em torno de 2 a 3 dB, do que na condição sem ferrite. A inclinação do erro é aproximadamente a mesma nas duas condições, o que aponta para uma origem comum às duas configurações, pode estar associada a medição do equipamento.

4.7 Avaliação crítica do desempenho do *Datalogger*

Reunindo os resultados das abordagens analítica, numérica e experimental, é possível estabelecer um parecer sobre a adequação do *datalogger* para a medição de campos magnéticos variantes no tempo. A avaliação considera separadamente as duas grandezas de interesse: a frequência do sinal e a magnitude do campo.

Quanto à identificação da frequência, o equipamento apresentou desempenho satisfatório em toda a faixa avaliada, de 63 Hz a 9 kHz, reproduzindo de forma

consistente a frequência do sinal de excitação imposto pelo gerador de funções. Esse comportamento é coerente com o fato de a frequência de amostragem adotada respeitar o critério de Nyquist nas baterias destinadas à caracterização.

Quanto à magnitude do campo, contudo, o desempenho mostrou-se dependente da frequência. Como a corrente de excitação foi mantida constante ao longo de cada varredura, o comportamento esperado, previsto tanto pelo cálculo analítico do solenoide finito quanto pela simulação numérica, era uma resposta plana, isto é, uma densidade de fluxo magnético aproximadamente constante em toda a faixa. Os resultados experimentais divergiram desse comportamento de referência: na faixa de 63 Hz a 1 kHz, a diferença entre os valores medidos e as referências teóricas manteve-se entre 7 e 8 dB na configuração sem ferrite e entre 4 e 6,5 dB na configuração com ferrite, permanecendo aproximadamente estável em ambos os casos; a partir de 2 kHz, essa diferença passou a crescer progressivamente até 9 kHz, alcançando cerca de 14,7 dB sem ferrite e 12,9 dB com ferrite.

A relação entre a frequência do sinal e a taxa de amostragem constitui uma hipótese a ser testada, e não uma causa demonstrada. Embora o critério de Nyquist seja suficiente para a correta identificação da frequência, a resolução temporal da forma de onda, o número de amostras por período, reduz-se à medida que a frequência do sinal aumenta para uma dada taxa de aquisição. Os ensaios mostraram que, com cerca de 20 amostras por período, a forma de onda é bem representada, ao passo que, com aproximadamente 2 amostras por período, a magnitude estimada apresenta um grande erro.

Por se tratar de um equipamento de arquitetura fechada, outras contribuições possíveis não podem ser descartadas nem confirmadas com os dados disponíveis, permanecendo como hipóteses. A resolução e a taxa de conversão do conversor analógico-digital (ADC), a eventual presença de filtros *anti-aliasing* e de filtros digitais internos, e o circuito de condicionamento de sinal do sensor são estágios que tipicamente introduzem atenuação dependente da frequência.

Diante do exposto, conclui-se que o *data logger* avaliado é adequado para a identificação da frequência de campos magnéticos variantes no tempo em toda a faixa testada. Para a medição de magnitude, os ensaios delimitam a região de até aproximadamente 1 kHz caracterizado por menor variação de ganho. Para o uso como instrumento quantitativo de magnitude, recomenda-se restringir a aplicação à faixa de até 1 kHz e operar sempre na maior taxa de amostragem disponível, maximizando o número de amostras por período.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, este trabalho investigou a viabilidade da utilização de um *datalogger* experimental, ainda em fase de prototipagem, para a medição de campos magnéticos variantes no tempo, por meio de um estudo comparativo entre resultados experimentais, simulações numéricas e cálculos analíticos.

Inicialmente, foram analisados os princípios físicos associados à medição de campos magnéticos variantes, bem como o programa e o *firmware* do *datalogger*, processamento e interpretação dos dados. Essa etapa mostrou-se fundamental para o estabelecimento da fundamentação teórica necessária e para a construção de uma base sólida de entendimento do funcionamento e das limitações do sistema desenvolvido.

Nos testes preliminares realizados com uma bobina multifilar e controle de corrente por potenciômetro, observou-se que o *datalogger* identificou corretamente a frequência dos sinais ao longo de toda a curva de resposta, com diferença percentual absoluta inferior a 0,06 % em relação ao gerador de funções e valor médio de aproximadamente 0,03 %, sem tendência ao longo do espectro. A magnitude do campo magnético medido, em contrapartida, apresentou instabilidades significativas: com a corrente mantida constante, esperava-se um valor de campo praticamente invariante, mas a amplitude registrada caiu de aproximadamente 0,32 mT para cerca de 0,10 mT ao longo da faixa ensaiada. Esse contraste entre uma grandeza medida com precisão e outra com desvio elevado orientou todo o restante do trabalho.

Na nova bancada experimental, foram construídas três bobinas com características construtivas equivalentes, com o objetivo de reduzir a influência de variações individuais e permitir uma análise comparativa mais consistente entre os resultados obtidos. Nessa etapa, foram realizadas dez repetições independentes em cada frequência analisada, buscando caracterizar de forma mais precisa a curva de resposta do equipamento. Somando as configurações com e sem núcleo de ferrite, foram efetuadas 780 medições, correspondentes a aproximadamente 79,9 milhões de amostras de campo magnético variante no tempo. Dessa forma, o mesmo procedimento experimental foi repetido em três amostras distintas, aumentando a confiabilidade da avaliação realizada.

Ao comparar os resultados obtidos pelo cálculo analítico com aqueles provenientes da simulação numérica, para o cenário sem núcleo de ferrite, verificou-se um erro relativo de 5,99%. Esse valor indica coerência entre as duas abordagens para a condição analisada; cabe observar, contudo, que ambas compartilham as mesmas hipóteses geométricas e de material, de modo que a concordância entre elas constitui uma verificação e não uma validação do campo efetivamente produzido na bancada.

A comparação entre as três unidades ensaiadas apresentou a mesma forma geral de resposta: uma região aproximadamente estável até cerca de 1 kHz, seguida de decaimento até o extremo superior da faixa. Confrontando as medições com essas referências, o desvio de magnitude organizou-se em dois regimes distintos. Até aproximadamente 1 kHz, o erro manteve-se elevado, porém aproximadamente estável: entre 7 e 8 dB na configuração sem núcleo de ferrite e entre 4 e 6,5 dB na configuração com núcleo, o que corresponde a erros relativos entre cerca de 38 % e 60 % do valor de referência. A partir de 2 kHz, o erro passou a crescer de forma progressiva e sem inflexão, alcançando aproximadamente 14,7 dB sem ferrite e 12,9 dB com ferrite em 9 kHz, equivalentes a erros relativos próximos de 80 % e 77 %. Essa distinção é o resultado central do trabalho, pois o primeiro regime seria em princípio corrigível por um fator constante, enquanto o segundo exigiria uma correção dependente da frequência.

Cabe registrar que a inserção do núcleo de ferrite deslocou as curvas para cima em aproximadamente 6 dB, reduzindo o patamar do erro, mas não alterou de forma relevante a variação do erro ao longo da faixa. Como o ferrite modifica o campo aplicado ao sensor sem alterar a cadeia de medição do equipamento, a persistência da atenuação em ambas as condições aponta para uma origem provavelmente associada ao sistema de medição, e não à fonte de campo utilizada nos ensaios.

O estudo caracteriza a resposta relativa do sistema de medição frente a referências modeladas, mas não constitui uma calibração, uma vez que a bancada não dispõe de instrumento de referência independente. Nesse escopo, os resultados indicam que o *datalogger* é adequado para a identificação da frequência de campos magnéticos variantes no tempo em toda a faixa testada, ao passo que apresenta elevado grau de incerteza na medição da magnitude, com a região de menor variação do ganho delimitada até aproximadamente 1 kHz. A queda de magnitude foi observada de forma consistente no conjunto experimental avaliado, porém sua origem não foi isolada, podendo envolver, por exemplo, o elemento sensor, o condicionamento, a conversão analógico-digital e o processamento interno. Ensaios adicionais com referência calibrada são necessários para atribuir causalidade.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Durante este trabalho, foram identificadas diversas oportunidades para o aprofundamento na viabilidade do uso de *dataloggers* na medição de campos magnéticos variantes no tempo. A primeira sugestão consiste em realizar novos ensaios com um sinal de frequência fixa adquirido sob diferentes taxas de amostragem, todas superiores ao dobro da frequência do sinal, mantendo constantes corrente, posição, duração do registro e processamento, de modo a isolar a influência da quantidade de amostras por período sobre a estimativa de amplitude sem introduzir *aliasing*.

Adicionalmente, devido à instabilidade observada nos resultados de medição, não foi possível determinar se esta variabilidade é uma característica do sistema de aquisição (*datalogger*). Nesse sentido, buscar formas de estabilizar a medição e caracterizar a curva de resposta a partir de dados mais estáveis é crucial.

Além disso, considerando que todo equipamento possui uma faixa de operação e as limitações do laboratório não permitiram a inserção de correntes de alta magnitude, é fundamental testar a resposta do equipamento a campos magnéticos maiores. Propõe-se aplicar uma corrente de maior magnitude, gerando campos 5, 10, 20 e até 100 vezes superiores aos obtidos nos testes laboratoriais, buscando entender como o *datalogger* se comporta quando o campo medido possa estar fora de sua faixa de operação ideal.

Outra proposta relevante é a transformação da bancada atual em uma bancada de calibração. A bancada desenvolvida neste trabalho é uma bancada de caracterização, na qual o campo é estimado por modelo analítico e numérico sem verificação independente; uma bancada de calibração exigiria, adicionalmente, um sensor de referência calibrado e rastreável, o mapeamento espacial do campo e um orçamento formal de incerteza. Tal sistema não apenas facilitaria a validação dos testes realizados, mas também serviria como uma ferramenta permanente para a calibração precisa do equipamento.

Recomenda-se também avaliar uma bobina de abertura interna maior. Na geometria adotada, o diâmetro do carretel foi definido pelas dimensões do núcleo de ferrite, resultando em uma abertura reduzida em relação ao ponto de medição, situado fora do enrolamento. Nessa condição, o campo apresenta espalhamento acentuado e decai rapidamente ao longo do eixo, de modo que pequenos desvios de posicionamento do *datalogger* produzem variações relevantes no campo efetivamente aplicado ao sensor. Uma bobina de maior abertura proporcionaria uma região de campo mais uniforme na vizinhança do ponto de medição, reduzindo a sensibilidade do resultado à incerteza de posicionamento e tornando o valor de referência menos dependente da geometria exata da montagem.

Por fim, visando a aplicação em engenharia preditiva sob diferentes condições industriais, é interessante realizar testes em diferentes ambientes, variando temperatura e posicionamento, para verificar se a resposta e a compensação encontradas neste estudo podem ser generalizadas.

REFERÊNCIAS

ALTUS. *O que é um datalogger e por que você deveria utilizá-lo em sua aplicação?* Disponível em: <<https://www.altus.com.br/post/397/o-que-e-um-datalogger-e-por-que-voce-deveria-utiliza-lo-em-sua-aplicacao/>>. Acesso em: 19 mar. 2026.

BOLFARINE, Heleno. *Elementos de amostragem*. São Paulo: Editora Blucher, 2005. E-book. p. 20. ISBN 9788521214991. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521214991/>>. Acesso em: 09 dez. 2025.

BRITO, Fábio. *Sensores e atuadores*. 1. ed. Rio de Janeiro: Érica, 2019. E-book. p. 53. ISBN 9788536531953. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536531953/>>. Acesso em: 28 out. 2025.

BYJU'S. *Hall Effect*. Disponível em: <<https://byjus.com/physics/hall-effect/>>. Acesso em: 28 out. 2025.

DEWESOFT. *O que é um Data Logger?* Disponível em: <<https://dewesoft.com/pt/blog/que-e-data-logger>>. Acesso em: 28 out. 2025.

DINÇER, K.; SEMCZUK, M. *Open-Source Magnetometer for Characterizing Magnetic Fields in Ultracold Experiments*. Applied Sciences, v. 13, n. 19, artigo 10620, 2023. DOI: 10.3390/app131910620.

DINIZ, Paulo S. R.; SILVA, Eduardo A. B.; NETTO, Sergio L. *Processamento digital de sinais*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014. E-book. p. 329. ISBN 9788582601242. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788582601242/>>. Acesso em: 29 out. 2025.

DOWELL, P. L. *Effects of eddy currents in transformer windings*. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, v. 113, n. 8, p. 1387–1394, 1966. DOI: 10.1049/piee.1966.0236.

DYNAMOX. *Dynalogger HF – Especificações técnicas*. Florianópolis: Dynamox, 2023. Disponível em: <<https://content.dynamox.net/wp-content/uploads/2023/04/pt-dynalogger-hf.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2025.

GRIFFITHS, D. J. *Introduction to Electrodynamics*. New York: Pearson Education, 2013.

HAYT, William H.; BUCK, John A. *Eletromagnetismo*. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

JIN, J.-M. *The Finite Element Method in Electromagnetics*. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

NETO, Vicente S. *Sistemas de Comunicação – Serviços, Modulação e Meios de Trans-*

missão. Rio de Janeiro: Érica, 2015. E-book. p. 56. ISBN 9788536522098. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536522098/>>. Acesso em: 28 out. 2025.

NUMPY. *NumPy Documentation*. Disponível em: <<https://numpy.org/doc/>>. Acesso em: 28 out. 2025.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. *Digital Signal Processing*. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2014.

SADIKU, Matthew N. O. *Elementos de Eletromagnetismo*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

SILVA, J. W. C.; ARAÚJO, J. D.; NUNES, J. R. S.; MARQUES, A. M. C. *Indutância mútua entre solenoides concêntricos: um estudo comparativo entre modelos*. ENCITEC – Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista, Santo Ângelo, v. 13, n. 3, p. 387–400, set./dez. 2023. DOI: 10.31512/encitec.v13i3.1137.

SMITH, Steven W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. San Diego: California Technical Publishing, 1997.

STUHLER, Jackson. *Utilização de MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems – sistemas microeletromecânicos) para aplicações de circuitos de baixo custo de movimentação e sensoriamento*. Revista Metodologias e Aprendizado, v. 5, 2022. DOI: 10.21166/metapre.v5i.2696. Disponível em: <<https://doi.org/10.21166/metapre.v5i.2696>>. Acesso em: 28 out. 2025.

TEKTRONIX. *Arbitrary/Function Generators AFG3011, AFG3021B, AFG3022B, AFG3101, AFG3102, AFG3251, AFG3252: data sheet*. Beaverton: Tektronix, 2009. 8 p. Documento 76W-18656-3. Disponível em: <<https://www.tek.com/>>.

VIRTANEN, Pauli et al. *SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python*. Nature Methods, v. 17, p. 261–272, 2020.

WAHBA, Grace. *Spline Models for Observational Data*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 1990.

WEG. *Sensores industriais*. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h57/h55/WEG-sensores-industriais-50029077-catalogo-pt.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2026.

WENTWORTH, Stuart M. *Eletromagnetismo aplicado: abordagem antecipada das linhas de transmissão*. Porto Alegre: Bookman, 2007.

ZAMUDIO-RAMÍREZ, I.; OSORNIO-RIOS, R. A.; ANTONINO-DAVIU, J. A.; RAZIK, H.; ROMERO-TRONCOSO, R. J. *Magnetic Flux Analysis for the Condition Monitoring of Electric Machines: A Review*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 18, n. 5, p. 2895–2908, 2022. DOI: 10.1109/TII.2021.3070581.