UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAEL DE SOUSA SANTOS

IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE SENSORES PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

Uberlândia
2026

RAFAEL DE SOUSA SANTOS

IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE SENSORES PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como exigência parcial para a obtenção do título de mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Alan Petrônio Pinheiro

Uberlândia

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S237 Santos, Rafael de Sousa, 1997-
2026 IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE SENSORES PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS [recurso eletrônico] / Rafael de Sousa Santos. - 2026.

Orientador: Alan Petrônio Pinheiro .
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
DOI http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.515
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. I. , Alan Petrônio Pinheiro,1982-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

RAFAEL DE SOUSA SANTOS

IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE SENSORES PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como exigência parcial para a obtenção do título de mestre em Ciências.

Uberlândia, 17 de julho de 2026

Banca Examinadora:

_____

Alan Petrônio Pinheiro (orientador), Dr. – UFU

_____

Wagner Endo, Dr. – UTFPR

_____

Daniel Pereira de Carvalho, Dr. – UFU

_____

Lorenço Santos Vasconcelos, Dr. – UFU

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 827, PPGEELT				
Data:	Dezessete de julho de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	9:02	Hora de encerramento:	12:08
Matrícula do Discente:	12422EEL008				
Nome do Discente:	Rafael de Sousa Santos				
Título do Trabalho:	Implementação e avaliação experimental de sensores para detecção de descargas parciais				
Área de concentração:	Processamento da Informação				
Linha de pesquisa:	Processamento Digital de Sinais e Redes de Comunicação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Alan Petrônio Pinheiro. Título do Projeto: Desenvolvimento de metodologia de indicador online de confiabilidade de sistema elétrico e gestão de ativos. Agência financiadora: ANP/Petrobras. Número do processo na agência financiadora: 25498-7 Vigência do projeto: 2025-2028.				

Reuniu-se através de videoconferência, a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Daniel Pereira de Carvalho (UFU), Lorenço Santos Vasconcelos (UFU), Wagner Endo (UTFPR) e Alan Petrônio Pinheiro, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Alan Petrônio Pinheiro, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.

Documento assinado eletronicamente por **Alan Petronio Pinheiro**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/07/2026, às 12:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Lorenco Santos Vasconcelos**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/07/2026, às 14:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **WAGNER ENDO**, **Usuário Externo**, em 23/07/2026, às 11:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Daniel Pereira de Carvalho**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/07/2026, às 13:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7429532** e o código CRC **0875E3F3**.

Referência: Processo nº 23117.041771/2026-92 SEI nº 7429532

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me permitir estar aqui todos os dias e continuar exercendo esse trabalho tão importante, que é contribuir para o desenvolvimento intelectual da Engenharia, na esperança de que, ao final, esse esforço possa facilitar a vida de pessoas e comunidades, proporcionando mais segurança e eficiência em suas atividades.

Agradeço à minha mãe, Vilma, a pessoa que mais incentiva os meus sonhos, por mais malucos que eles pareçam. Obrigado por todas as mensagens de força, conforto e incentivo ao longo dessa jornada. Obrigado por ser a mãe perfeita para mim. Espero que esta conquista encha seu coração de orgulho. Ao meu pai, Cristovam, agradeço por todo o apoio, suporte e pelas inúmeras conversas que sempre me fortaleceram. Obrigado por estar sempre disponível para ouvir, aconselhar e compartilhar bons momentos. Ao meu irmão, Lucas, agradeço por todas as vezes em que precisei de ajuda e pude contar com sua prontidão e disposição. Sua presença fez toda a diferença.

Um agradecimento mais do que especial à minha querida namorada, Andréia, minha *Pilot Monitoring*. Durante esse voo, que decolou no meu Trabalho de Conclusão de Curso e agora pousa nesta dissertação, você foi o membro mais ativo da tripulação. Enquanto eu atuava como um *Pilot Flying* ainda inexperiente, por nunca ter realizado um voo como este, você esteve ao meu lado em todos os momentos: auxiliando nas principais tomadas de decisão, orientando-me diante de cada pane, guiando-me através das tempestades e ajudando-me a manter o rumo até que, na aproximação final, eu encontrasse um aeroporto com céus de brigadeiro e ventos calmos, as condições ideais para realizar um excelente pouso. Obrigado por me ensinar que, diferentemente da graduação, em que voávamos a bordo de um monomotor leve, baixo e lento, no mestrado embarcamos em uma aeronave de alta performance, que voa alto e rápido, onde o tempo entre a decolagem e o destino parece passar em poucos minutos. Obrigado por ser minha INVA, minha companheira de voo e meu maior apoio durante toda essa jornada. Espero que esta conquista também tenha enchido você de orgulho.

Agradeço também à minha amiga Andressa, que sempre esteve disposta a me ajudar a resolver os inúmeros desafios que surgiram durante o mestrado. Obrigado pela disponibilidade, pelo excelente humor de todos os dias e por sempre me fazer sentir acolhido no PPGEELT. Parabéns por ser essa pessoa tão dedicada, eficiente e generosa. Ao meu grande amigo Guilherme, deixo meu sincero agradecimento por toda a ajuda nos desafios que surgiram ao longo dessa caminhada. Seu apoio, sempre que precisei, fez toda a diferença. Agradeço aos

meus amigos Gabriel, Vinicius e Lucas pelas conversas de corredor, pelos almoços compartilhados e pelos momentos de descontração, que tornaram essa caminhada muito mais leve. Aos colegas do Hardware, agradeço pela companhia e pela ajuda nesta reta final.

Ao professor Alan, agradeço por me confiar este grande desafio. A autonomia durante o desenvolvimento desta pesquisa exigiu dedicação, responsabilidade e perseverança, proporcionando um importante aprendizado ao longo dessa jornada. Agradeço ao Laboratório de Redes Inteligentes (LRI) pela infraestrutura e pelo espaço disponibilizados para a realização desta pesquisa. Agradeço à ANEEL, em parceria com a Petrobras S.A., pelo financiamento do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, código PD-00553-0071/2025.

Por fim, registro um agradecimento muito especial à FAPEMIG, que, ao longo desses dois anos, me proporcionou a oportunidade de dedicar-me integralmente a esta pesquisa por meio da bolsa de estudos concedida. Esse apoio foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho e para a concretização desta conquista. Muito obrigado.

"Inventar é imaginar o que ninguém pensou; é acreditar no que ninguém jurou; é arriscar o que ninguém ousou; é realizar o que ninguém tentou. Inventar é transcender."

— Alberto Santos Dumont

RESUMO

As descargas parciais constituem um importante indicador da degradação de sistemas de isolamento em equipamentos elétricos de média e alta tensão, sendo amplamente utilizadas para diagnóstico e monitoramento da condição operacional desses ativos. Neste contexto, esta dissertação apresenta a implementação e a avaliação experimental de sensores destinados à detecção de descargas parciais em cabos isolados, desenvolvidos a partir de materiais comercialmente acessíveis e técnicas de manufatura aditiva.

O trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar experimentalmente duas arquiteturas de sensores eletromagnéticos, denominadas *Helicoidal Antenna Sensor* (HAS) e *HFCT Relative Signature Sensor* (HRSS), além de investigar a influência de parâmetros físicos, geométricos e construtivos sobre a sensibilidade desses dispositivos. Para isso, foram realizados procedimentos de projeto, fabricação, calibração experimental e ensaios laboratoriais em cabos isolados contendo descargas parciais. O desempenho dos protótipos foi comparado ao de um sensor HFCT comercial utilizado como referência.

Os resultados demonstraram que ambas as arquiteturas foram capazes de detectar sinais associados às descargas parciais e reproduzir padrões compatíveis com os fenômenos investigados. Verificou-se que alterações nos parâmetros construtivos influenciam diretamente a sensibilidade e a resposta dos sensores.

Palavras-chave: descargas parciais; sensores; HFCT; antena helicoidal; cabos isolados; monitoramento de ativos; manufatura aditiva; processamento digital de sinais.

ABSTRACT

Partial discharges are an important indicator of the degradation of insulation systems in medium and high voltage electrical equipment, and are widely used for diagnosis and monitoring of the operational condition of these assets. In this context, this dissertation presents the implementation and experimental evaluation of sensors for the detection of partial discharges in insulated cables, developed from commercially accessible materials and additive manufacturing techniques. The objective of this study was to develop and experimentally characterize two electromagnetic sensor architectures, called Helical Antenna Sensor (HAS) and HFCT Relative Signature Sensor (HRSS), in addition to investigating the influence of physical, geometric and constructive parameters on the sensitivity of these devices. For this, design, manufacturing, experimental calibration and laboratory tests were carried out on insulated cables containing partial discharges. The performance of the prototypes was compared to that of a commercial HFCT sensor used as a reference. The results showed that both architectures were able to detect signals associated with partial discharges and reproduce patterns compatible with the investigated phenomena. It was found that changes in the construction parameters directly influence the sensitivity and response of the sensors.

Keywords: partial discharges; sensors; HFCT; helical antenna; insulated cables; asset monitoring; additive manufacturing; digital signal processing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 — TIPOS DE DEFEITO EM TERMINAIS E ISOLAMENTO ELÉTRICO. 19
FIGURA 2 — EXEMPLO DE REPRESENTAÇÃO DO GRÁFICO PRPD, ONDE O MAPA DE CALOR REPRESENTA A DENSIDADE DE PULSO, A REGIÃO EM VERMELHA REPRESENTA ALTA DENSAS E A AZUL BAIXA. 20
FIGURA 3 — EXEMPLO DE REPRESENTAÇÃO DO GRÁFICO PRPD. 21
FIGURA 4 — CABO DE MÉDIA TENSÃO E SUAS RESPECTIVAS CAMADAS. 22
FIGURA 5 — COMPORTAMENTO DO CAMPO ELÉTRICO NA AUSÊNCIA E NA PRESENÇA DA CAMADA SEMICONDUTORA. 23
FIGURA 6 — DEFEITOS TÍPICOS ENCONTRADOS NO SISTEMA DE ISOLAMENTO. 24
FIGURA 7 — ESTRUTURA DA TERMINAÇÃO. 25
FIGURA 8 — TERMINAÇÃO A ÓLEO APLICADA EM ENSAIO DE LABORATÓRIO. 26
FIGURA 9 — SISTEMA CONVENCIONAL DE MEDIÇÃO SEGUNDO NORMA IEC60270. 28
FIGURA 10 — REPRESENTAÇÃO DOS SENSORES INDUTIVOS. 33
FIGURA 11 — SENSOR HFCT. 34
FIGURA 12 — DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO NO SENSOR HFCT 35
FIGURA 13 — GEOMETRIA E CONSTRUÇÃO DO SENSOR RC 36
FIGURA 14 — SENSOR ILS 37
FIGURA 15 — SENSOR ANTENA LAÇO 39
FIGURA 16 — SENSOR COMERCIAL FMC, UTILIZADO PARA A DETECÇÃO DE DPS EM CABOS ISOLADOS 42
FIGURA 17 — PROTÓTIPO DO SENSOR HAS DESENVOLVIDO NESTA PESQUISA. 43
FIGURA 18 — DISPOSITIVOS ILS, FMC E HAS, E SEUS PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO. 44
FIGURA 19 — DIMENSÕES FÍSICAS DO ELEMENTO RESSONANTE PASSIVO DO SENSOR HAS 45
FIGURA 20 — CONFIGURAÇÕES DE MONTAGEM DO SENSOR HAR. 46
FIGURA 21 — DETALHES CONSTRUTIVOS DO SENSOR HAS E SUA INSTALAÇÃO EM CABO DE MÉDIA TENSÃO. 47
FIGURA 22 — COMPARATIVO DE DIÂMETROS DE FIO DE COBRE ESMALTADO EM AWG. 47
FIGURA 23 — IDENTIFICAÇÃO DOS COMPONENTES DO SENSOR HAS. 48
FIGURA 24 — AMPLIFICADOR LNA UTILIZADO COM O SENSOR HAS. 49
FIGURA 25 — CURVAS DE GANHO (A) E DIRETIVIDADE (B) DO COMPONENTE EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA E DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO. 50

FIGURA 26 — SENSOR HFCT COMERCIAL UTILIZADO PARA A DETECÇÃO DE DPS EM CABOS ISOLADOS.....51
FIGURA 27 — PROTÓTIPO DO SENSOR HRSS DESENVOLVIDO NESTA PESQUISA. 51
FIGURA 28 — PERMEABILIDADE COMPLEXA (A) E FATOR DE PERDA RELATIVA (B) EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA PARA O MATERIAL DO NÚCLEO DE FERRITE. 54
FIGURA 29 — DISPOSIÇÃO DAS ESPIRAS DO SECUNDÁRIO NO SENSOR HFCT. 55
FIGURA 30 — DIMENSÕES FÍSICAS (EM MM) DO NÚCLEO DO SENSOR HRSS. 55
FIGURA 31 — NÚCLEO DE FERRITE BIPARTIDO (A) E DETALHE DA SUPERFÍCIE DE CONTATO POLIDA (B). 56
FIGURA 32 — ENROLAMENTO DO SENSOR HRSS POSICIONADO A 315° NO NÚCLEO DE FERRITE. 57
FIGURA 33 — DETALHES DO MECANISMO DE ARTICULAÇÃO E TRAVAMENTO DO SENSOR HRSS: VISTA GERAL (A), DETALHE DA DOBRADIÇA (B), SISTEMA DE FECHO (C) E VISTA INTERNA DO ENCAIXE (D). 59
FIGURA 34 — VISÃO GERAL DE TODAS AS PEÇAS QUE COMPÕEM O SENSOR HRSS. 60
FIGURA 35 — INSERTO METÁLICOS M3 NO CONJUNTO ESTRUTURAL. 60
FIGURA 36 — FATIAMENTO DIGITAL E DISPOSIÇÃO DAS CAMADAS PARA A IMPRESSÃO DO ENCAPSULAMENTO DO SENSOR HRSS. 61
FIGURA 37 — MODELO TRIDIMENSIONAL DO SENSOR HRSS COM AS DIMENSÕES EXTERNAS PRINCIPAIS. 61
FIGURA 38 — DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE VALIDAÇÃO FUNCIONAL EM BANCADA UTILIZANDO CALIBRADOR IEC 60270. 62
FIGURA 39 — MONTAGEM EXPERIMENTAL EM BANCADA: (A) ARRANJO COM O SENSOR HFCT; (B) ARRANJO COM O HAS. 63
FIGURA 40 — SINAIS TRANSITÓRIOS CAPTURADOS NO OSCILOSCÓPIO DURANTE A VALIDAÇÃO PRELIMINAR: (A) RESPOSTA TEMPORAL OBTIDA PELO SENSOR HRSS (B) RESPOSTA TEMPORAL OBTIDA PELO SENSOR HASS. 64
FIGURA 41 — DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ARRANJO EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE DOS SENSORES HFCT EM REGIME PERMANENTE.....65
FIGURA 42 — MONTAGEM EXPERIMENTAL UTILIZADA PARA DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE DOS SENSORES.....66

FIGURA 43 — OS GRÁFICOS OBTIDOS DURANTE O ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE: (A) SENSOR HFCT COMERCIAL TECHIMP; (B) PROTÓTIPO N = 2; (C) PROTÓTIPO N = 4; (D) PROTÓTIPO N = 8. 66
FIGURA 44 — DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ARRANJO EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA CARACTERIZAÇÃO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DOS SENSORES HFCT POR MEIO DA MEDIÇÃO DO PARÂMETRO S_{21}. 69
FIGURA 45 — MONTAGEM EXPERIMENTAL UTILIZADA PARA CARACTERIZAÇÃO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA. 70
FIGURA 46 — RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA MAGNITUDE DO PARÂMETRO S_{21} PARA OS SENSORES AVALIADOS: (A) SENSOR COMERCIAL TECHIMP CLAMP 39 MM; (B) PROTÓTIPO N = 2; (C) PROTÓTIPO N = 4; (D) PROTÓTIPO N = 8 70
FIGURA 47 — CURVA DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO SENSOR COMERCIAL TECHIMP CLAMP 39 MM EXTRAÍDA DO DATASHEET DO FABRICANTE. 71
FIGURA 48 — SISTEMA DE ENSAIOS *POWER FREQUENCY TEST SYSTEM* UTILIZADO NA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS SENSORES. 73
FIGURA 49 — PERFIL DE APLICAÇÃO DA TENSÃO ELÉTRICA DURANTE OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS. 74
FIGURA 50 — ARRANJO EXPERIMENTAL PARA AQUISIÇÃO DE SINAIS DE DPS EM CABOS ISOLADOS. 75
FIGURA 51 — A) CABO Nº1 DEFEITO INTRODUZIDO EXPONDO MATERIAL ISOLANTE, B) CABO Nº3 DEFEITO INTRODUZIDO EXPONDO MATERIAL ISOLANTE E INSERIDO UM PINO DE 0,8 CM E C) CABO Nº8 DEFEITO INTRODUZIDO EXPONDO MATERIAL ISOLANTE. 76
FIGURA 52 — EXPERIMENTO 1 ENSAIO A, ARRANJO LABORATORIAL. 78
FIGURA 53 — EXPERIMENTO 1 ENSAIO B, ARRANJO LABORATORIAL. 78
FIGURA 54 — EXPERIMENTO 1 ENSAIO C, ARRANJO LABORATORIAL. 79
FIGURA 55 — EXPERIMENTO 1 ENSAIO D, ARRANJO LABORATORIAL. 79
FIGURA 56 — EXPERIMENTO 2 ENSAIO A, ARRANJO LABORATORIAL. 80
FIGURA 57 — EXPERIMENTO 2 ENSAIO B, ARRANJO LABORATORIAL. 81
FIGURA 58 — EXPERIMENTO 2 ENSAIO C, ARRANJO LABORATORIAL. 81
FIGURA 59 — EXPERIMENTO 3 ENSAIO A, ARRANJO LABORATORIAL. 82
FIGURA 60 — EXPERIMENTO 3 ENSAIO B, ARRANJO LABORATORIAL. 83
FIGURA 61 — EXPERIMENTO 3 ENSAIO C, ARRANJO LABORATORIAL. 83
FIGURA 62 — EXPERIMENTO 4, ARRANJO LABORATORIAL. 84

FIGURA 63 — EXPERIMENTO 5, (A) ARRANJO LABORATORIAL, (B) POSICIONAMENTO SENSORES. 85
FIGURA 64 — EXPERIMENTO 6, (A) ARRANJO LABORATORIAL, (B) POSICIONAMENTO SENSORES. 86
FIGURA 65 — EXPERIMENTO 7 ENSAIO A, (A) ARRANJO LABORATORIAL, (B) POSICIONAMENTO SENSORES. 87
FIGURA 66 — EXPERIMENTO 7 ENSAIO B, (A) ARRANJO LABORATORIAL, (B) POSICIONAMENTO SENSORES. 87
FIGURA 67 — EXPERIMENTO 7 ENSAIO C, (A) ARRANJO LABORATORIAL, (B) POSICIONAMENTO SENSORES. 88
FIGURA 68 — EXPERIMENTO 8, (A) ARRANJO LABORATORIAL, (B) POSICIONAMENTO SENSORES. 89
FIGURA 69 — EXPERIMENTO 9 ENSAIO A, ARRANJO LABORATORIAL. 90
FIGURA 70 — EXPERIMENTO 9 ENSAIO B, ARRANJO LABORATORIAL. 90
FIGURA 71 — EXPERIMENTO 1, DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE QMAX95% E RETA TENDÊNCIA ENTRE OS SENSORES HAS E HFCT. 93
FIGURA 72 — EXPERIMENTO 2, DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE QMAX95% E RETA TENDÊNCIA DOS SENSORES HAS COM MATÉRIAS (A) 20 AWG, (B) 22 AWG E (C) 26 AWG, E GEOMETRIA DE 8, 12,5 E 16 METROS. 94
FIGURA 73 — EXPERIMENTO 3, DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE QMAX95% E RETA TENDÊNCIA DOS SENSORES HAS DIANTE DE DIFERENTES TIPOS DE DPS, (A) CORONA, (B) INTERNA E (C) SUPERFÍCIE. 97
FIGURA 74 — EXPERIMENTO 4, DISTRIBUIÇÃO DE QMAX95% E RETA DE TENDÊNCIA DO SENSOR HAS PARA DIFERENTES MATERIAIS EM CABO COM BLINDAGEM DE CHUMBO. 98
FIGURA 75 — EXPERIMENTO 5, DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE QMAX95% E RETA TENDÊNCIA ENTRE OS SENSORES HRSS E HFCT. 102
FIGURA 76 — EXPERIMENTO 6, DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE QMAX95% E RETA TENDÊNCIA DOS SENSORES HRSS COM DIFERENTES RELAÇÕES DE ENROLAMENTO 103
FIGURA 77 — EXPERIMENTO 7, DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE QMAX95% E RETA TENDÊNCIA DOS SENSORES HRSS DIANTE DE DIFERENTES TIPOS DE DPS, (A) CORONA, (B) INTERNA E (C) SUPERFÍCIE. 106
FIGURA 78 — EXPERIMENTO 8, DISTRIBUIÇÃO DE QMAX95% E RETA DE TENDÊNCIA DO SENSOR HRSS EM CABO COM BLINDAGEM DE CHUMBO. 107

FIGURA 79 — EXPERIMENTO 9, DISTRIBUIÇÃO DE QMAX95% E RETA DE TENDÊNCIA DO SENSOR HRSS EM CABO DE MAIOR EXTENSÃO: (A) HRSS E HFCT COM AMBAS AS EXTREMIDADES ATERRADAS; (B) FMC E HAS COM AMBAS AS EXTREMIDADES ATERRADAS; (C) HRSS E HFCT COM APENAS UMA EXTREMIDADE ATERRADA; (D) FMC E HAS COM APENAS UMA EXTREMIDADE ATERRADA.....111

FIGURA A- 1 — VISÃO GERAL DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DO SENSOR HAS E SUAS RESPECTIVAS DIMENSÕES.....134
FIGURA A- 2 — ACABAMENTO EXTERNO DO SENSOR HAS.....135
FIGURA A- 3 — NÚCLEO DE BORRADA NATURAL DO SENSOR HAS.....136
FIGURA A- 4 — CONEXÕES ELÉTRICAS DO SENSOR HAS.....137
FIGURA A- 5 — DETALHAMENTO DA CONEXÃO DO ATERRAMENTO A BLINDAGEM METÁLICA.....137
FIGURA A- 6 — DISPOSIÇÃO DO ELEMENTO RESSONANTE PASSIVO INSTALADO NO SENSOR HAS.....138
FIGURA A- 7 — DETALHAMENTO DA BLINDAGEM METÁLICA DO SENSOR HAS.....138
FIGURA A- 8 — LARGURA DO SENSOR HAS.....139
FIGURA A- 9 — COMPRIMENTO DO SENSOR HAS.....139

FIGURA B- 1 — DISPOSITIVO *DOUBLE SHIELDING ISOLATION TRANSFORMER*.....140
FIGURA B- 2 — PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DISPOSITIVO *DOUBLE SHIELDING ISOLATION TRANSFORMER*.....140
FIGURA B- 3 — DISPOSITIVO *REGULATOR CONTROL CABINET*.....141
FIGURA B- 4 — PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DISPOSITIVO *REGULATOR CONTROL CABINET*.....141
FIGURA B- 5 — DISPOSITIVO AC/PD *INTELIGENTE TEST SYSTEM*.....142
FIGURA B- 6 — PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DISPOSITIVO AC/PD *INTELIGENTE TEST SYSTEM.*.....142
FIGURA B- 7 — DISPOSITIVO *TEST TRANSFORMER.*.....143
FIGURA B- 8 — PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DISPOSITIVO T*EST TRANSFORMER.*.....143
FIGURA B- 9 — DISPOSITIVO *CURRENT LIMITING REACTOR.*.....144
FIGURA B- 10 — DISPOSITIVO *CAPACITIVE DIVIDER*.....144
FIGURA B- 11 — PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DISPOSITIVO *CAPACITIVE DIVIDER.*.....144

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 — PROPRIEDADES DO LNA. 49
TABELA 2 — PROPRIEDADES DO NÚCLEO DE FERRITE. 53
TABELA 3 — PROPRIEDADES DO MATERIAL COPOLIÉSTER TRITAN. 57
TABELA 4 — PROPRIEDADES DO MATERIAL TPU. 58
TABELA 5 — SENSIBILIDADE ELÉTRICA DETERMINADA EXPERIMENTALMENTE PARA OS SENSORES HFCT. 67
TABELA 6 — MAGNITUDE DO PARÂMETRO S_{21} OBTIDA PARA OS SENSORES AVALIADOS EM 100 MHZ. 71
TABELA 8 — CARACTERÍSTICAS DOS CABOS. 75
TABELA 9 - DEFEITOS ANALISADOS. 76
TABELA 10 — RESUMO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL. 77
TABELA 11 — SÍNTESE DOS EXPERIMENTOS E PRINCIPAIS RESULTADOS E DISCUSSÃO. 91
TABELA 12 — EXPERIMENTO 1, ERRO DE MEDIÇÃO DO VALOR DE QMAX95% ENTRE OS SENSORES HFCT E HAS. 93
TABELA 13 — EXPERIMENTO 2, ERRO DE MEDIÇÃO DO VALOR DE QMAX95% ENTRE OS SENSORES HAS COM DIFERENTES TIPOS DE MATERIAIS E GEOMETRIA. 94
TABELA 14 — SÍNTESE DO EXPERIMENTO 1 E PRINCIPAIS RESULTADOS. 95
TABELA 15 — SÍNTESE DO EXPERIMENTO 2 E PRINCIPAIS RESULTADOS. 96
TABELA 16 — EXPERIMENTO 3, ERRO DE MEDIÇÃO DO VALOR DE QMAX95% ENTRE OS SENSORES HFCT E HAS. 97
TABELA 17 — EXPERIMENTO 4, ERRO DE MEDIÇÃO DO VALOR DE QMAX95% ENTRE OS SENSORES HFCT E HAS EM CABO COM ATERRAMENTO DE CHUMBO. 98
TABELA 18 — SÍNTESE DOS EXPERIMENTOS 3 E PRINCIPAIS RESULTADOS. 99
TABELA 19 — SÍNTESE DO EXPERIMENTO 4 E PRINCIPAIS RESULTADOS. 101
TABELA 20 — EXPERIMENTO 5, ERRO DE MEDIÇÃO DO VALOR DE QMAX95% ENTRE OS SENSORES HFCT E HRSS. 102
TABELA 21 — EXPERIMENTO 6, ERRO DE MEDIÇÃO DO VALOR DE QMAX95% ENTRE OS SENSORES HRSS COM DIFERENTE RELAÇÃO DE ENROLAMENTO. 103
TABELA 22 — SÍNTESE DOS EXPERIMENTOS 5 E PRINCIPAIS RESULTADOS. 104
TABELA 23 — SÍNTESE DOS EXPERIMENTOS 6 E PRINCIPAIS RESULTADOS. 105
TABELA 24 — EXPERIMENTO 7, ERRO DE MEDIÇÃO DO VALOR DE QMAX95% ENTRE OS SENSORES HFCT E HRSS. 106

TABELA 25 — EXPERIMENTO 8, ERRO DE MEDIÇÃO DO VALOR DE QMAX95% ENTRE OS SENSORES HFCT E HRSS EM CABO COM ATERRAMENTO DE CHUMBO. 107
TABELA 26 — SÍNTESE DOS EXPERIMENTOS 7 E PRINCIPAIS RESULTADOS. 108
TABELA 27 — SÍNTESE DOS EXPERIMENTOS 8 E PRINCIPAIS RESULTADOS. 110
TABELA 28 — EXPERIMENTO 9, ERRO DE MEDIÇÃO DO VALOR DE QMAX95% COM SENSOR HAS E HRSS EM CABO DE MAIOR EXTENSÃO. 112
TABELA 29 — SÍNTESE DOS EXPERIMENTOS 9 E PRINCIPAIS RESULTADOS. 113

TABELA C- 1 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 1, AVALIAÇÃO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR HAS. 145
TABELA C- 2 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 1, AVALIAÇÃO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR HAS. 146
TABELA C- 3 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 2, OTIMIZAÇÃO DA GEOMETRIA DO SENSOR HAS. 147
TABELA C- 4 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 2, OTIMIZAÇÃO DA GEOMETRIA DO SENSOR HAS. 152
TABELA C- 5 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 3, COM O SENSOR HAS EXPOSTO AO EFEITO CORONA. 154
TABELA C- 6 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 3, COM O SENSOR HAS EXPOSTO AO EFEITO CORONA. 154
TABELA C- 7 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 3, COM O SENSOR HAS EXPOSTO A DESCARGAS INTERNA. 155
TABELA C- 8 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 3, COM O SENSOR HAS EXPOSTO A DESCARGAS INTERNA. 155
TABELA C- 9 — RESULTADOS DO EXPERIMENTE 3, COM SENSOR HAS EXPOSTO A DESCARGAS DE SUPERFÍCIE 156
TABELA C- 10 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 3, COM SENSOR HAS EXPOSTO A DESCARGAS SUPERFÍCIE. 156
TABELA C- 11 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 4, VERIFICAÇÃO O DESEMPENHO DO SENSOR HAS EM CABO DE MÉDIA TENSÃO COM BLINDAGEM METÁLICA DE CHUMBO. 157
TABELA C- 12 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 4, VERIFICAÇÃO O DESEMPENHO DO SENSOR HAS EM CABO DE MÉDIA TENSÃO COM BLINDAGEM METÁLICA DE CHUMBO 159

TABELA D- 1— RESULTADOS DO EXPERIMENTO 5, AVALIAÇÃO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR HRSS. 160
TABELA D- 2 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 5, AVALIAÇÃO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR HRSS. 161
TABELA D- 3 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 6, OTIMIZAÇÃO DA RELAÇÃO DE ESPIRAS DO SENSOR HRSS. 162
TABELA D- 4 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 6, OTIMIZAÇÃO DA RELAÇÃO DE ESPIRAS DO SENSOR HRSS. 163
TABELA D- 5 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 7, COM O SENSOR HRSS EXPOSTO AO EFEITO CORONA. 164
TABELA D- 6 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 7, COM O SENSOR HRSS EXPOSTO AO EFEITO CORONA. 164
TABELA D- 7 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 7, COM O SENSOR HRSS EXPOSTO A DESCARGAS INTERNA. 165
TABELA D- 8 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 7, COM O SENSOR HRSS EXPOSTO A DESCARGAS INTERNA. 165
TABELA D- 9 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 7, COM SENSOR HRSS EXPOSTO A DESCARGAS DE SUPERFÍCIE. 166
TABELA D- 10 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 7, COM SENSOR HRSS EXPOSTO A DESCARGAS SUPERFÍCIE. 166
TABELA D- 11 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 8, VERIFICAÇÃO O DESEMPENHO DO SENSOR HRSS EM CABO DE MÉDIA TENSÃO COM BLINDAGEM METÁLICA DE CHUMBO. 167
TABELA D- 12 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 8, VERIFICAÇÃO O DESEMPENHO DO SENSOR HRSS EM CABO DE MÉDIA TENSÃO COM BLINDAGEM METÁLICA DE CHUMBO. 168

TABELA E- 1 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 9, CABO DE 180 M ATERRADO EM AMBOS OS LADOS E COM OS SENSORES LOCALIZADOS NA PONTA A. 169
TABELA E- 2 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 9, CABO DE 180 M ATERRADO EM AMBOS OS LADOS E COM OS SENSORES LOCALIZADOS NA PONTA A. 171

TABELA E- 3 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 9, CABO DE 180 M ATERRADO EM AMBOS OS LADOS E COM OS SENSORES LOCALIZADOS NA PONTA B. 172
TABELA E- 4 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 9, CABO DE 180 M ATERRADO EM AMBOS OS LADOS E COM OS SENSORES LOCALIZADOS NA PONTA B. 173
TABELA E- 5 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 9, CABO DE 180 M ATERRADO EM APENAS UM LADO E COM OS SENSORES LOCALIZADOS NA PONTA A. 174
TABELA E- 6 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 9, CABO DE 180 M ATERRADO EM APENAS UM LADO E COM OS SENSORES LOCALIZADOS NA PONTA A. 176
TABELA E- 7 — RESULTADOS DO EXPERIMENTO 9, CABO DE 180 M ATERRADO EM AMBOS OS LADOS E COM OS SENSORES LOCALIZADOS NA PONTA B. 177
TABELA E- 8 — DADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO 9, CABO DE 180 M ATERRADO EM AMBOS OS LADOS E COM OS SENSORES LOCALIZADOS NA PONTA B. 179

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGD	Análise de gases dissolvidos
AWG	*American wire gauge*
Bias	Viés
CAD	*Computer-aided design*
CEEMDAN	*Complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise*
CLAE	Cromatografia líquida de alta eficiência
CNNs	*Convolutional neural networks*
DP	Descarga parcial
DWT	*Discrete Wavelet transform*
EEMD	*Ensemble empirical mode decomposition*
EMD	*Empirical mode decomposition*
EPR	*Ethylene Propylene Rubber*
FAT	*Factory Acceptance Tests*
FFT	*Fast Fourier Transform*
FPGA	*Field programmable gate array*
FRFT	*Fractional Fourier transform*
FT	*Fourier Transform*
GIS	*Gas insulated switchgear*
HAS	*Helicoidal antenna sensor*
HFCT	*High-frequency current transformer*
HF	*high-frequency*
HHT	*Hilbert-Huang transform*
HRSS	*HFCT relative signature Sensor*
IA	Inteligência artificial
IEC	*International electrotechnical commission*
IEEE	*Institute of electrical and electronics engineers*
ILS	*Inductive loop sensors*
IMFs	*Intrinsic mode functions*
LNA	*Low noise amplifier*
MAE	*Mean absolute error*
NiZn	Níquel-Zinco

NiMg	Níquel-Magnésio
PA	Ponta A
PB	Ponta B
PCB	Placa de circuito impresso
PDS	Processamento digital de sinais
PRPD	*Phase-resolved partial discharge*
PVC	Policloreto de vinila
RC	*Rogowski coil*
RMSE	*Root mean mquare error*
RNNs	*Recurrent neural networks*
S^2	Variância amostral
STFT	*Short time Fourier transform*
TPU	*Thermoplastic polyurethane*
UHF	*Ultra-high-frequency*
VHF	*Very-high-frequency*
VNA	*Vector network analyzer*
XLPE	*Cross-linked polyethylene*
WT	*Wavelet transform*
WPT	*Wavelet packet transform*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 Justificativa 13
1.2 Objetivos 14
1.3 Limitações e convenções 15
1.4 Apresentação desta dissertação 16
2 FUNDAMETAÇÃO TEÓRICA E ESTADO DA ARTE 18
2.1 Fenômeno elétricos de DPs 18
2.2 Tipos de DPs 19
2.3 Padrões representativos das DPs 20
2.4 Cabos isolados 21
2.5 Terminação de cabos 25
2.6 Técnicas de detecção de DPs 26
2.7 Dispositivos empregados na detecção de DPs 27
2.8 Processamento digitais de sinais para DPs 29
2.9 Estado da Arte sobre sensores capazes de detectar DPs 32
2.9.1 Sensores Indutivos 33
2.9.2 Transformador de corrente de alta frequência 34
2.9.3 Bobina de Rogowski 36
2.9.4 Sensor de Laço Indutivo 37
2.9.5 Antenas de Laço 38
3 METODOLOGIA 41
3.1 Helicoidal Antenna Sensor (HAS) 42
3.1.1 Parametrização do sensor HAS 43
3.1.2 Aspectos Estruturais do sensor HAS 46
3.2 HFCT Relative Signature Sensor (HRSS) 50
3.2.1 Parametrização do sensor HRSS 52
3.2.2 Aspectos estruturais do sensor HRSS 56
3.3 Ensaios Preliminares de Sensibilidade 62
3.3.1 Validação funcional 62
3.3.2 Determinação experimental da sensibilidade em regime permanente 64
3.3.3 Caracterização da resposta em frequência por meio da medição do parâmetro S_{21} 68
3.4 Sistema experimental 73

3.5 Cabos utilizados nos ensaios 75
3.6 Descrição dos Experimentos 77
3.6.1 Experimento 1 — Teste de sensibilidade do sensor HAS 77
3.6.2 Experimento 2 — Otimização do sensor HAS 80
3.6.3 Experimento 3 — Tipos de DPs detectadas pelo sensor HAS 81
3.6.4 Experimento 4 — Cabo com blindagem de chumbo com o sensor HAS 84
3.6.5 Experimento 5 — Teste de sensibilidade do sensor HRSS 84
3.6.6 Experimento 6 — Otimização do sensor HRSS 85
3.6.7 Experimento 7 — Tipos de DPs detectadas pelo sensor HRSS 86
3.6.8 Experimento 8 — cabo com blindagem de chumbo com o sensor HRSS 88
3.6.9 Experimento 9 — Ensaios em cabo de maior extensão 89
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 91
4.1 Resultados experimentais sensor HAS 92
4.1.1 Avaliação de funcionamento do sensor HAS 92
4.1.2 Otimização da geometria do sensor HAS 93
4.1.3 Avaliação da sensibilidade do sensor HAS em diferenciar tipos de DPs 97
4.1.4 Verificação o desempenho do sensor HAS em cabo de média tensão com blindagem metálica de chumbo 98
4.2 Resultados experimentais sensor HRSS 102
4.2.1 Avaliação de funcionamento do sensor HRSS 102
4.2.2 Otimização da relação de espiras do sensor HRSS 103
4.2.3 Avaliação da sensibilidade do sensor HRSS em diferenciar tipos de DPs 106
4.2.4 Verificação o desempenho do sensor HRSS em cabo de média tensão com blindagem metálica de chumbo 107
4.3 Resultados experimentais cabo de maior extensão 111
4.4 Discussões dos resultados 115
5 CONCLUSÃO 118
REFERÊNCIAS 122
APÊNDICE A – APRESENTAÇÃO DAS IMAGENS DETALHADAS DA CONSTRUÇÃO DO SENSOR HAS 134
APÊNDICE B – ELEMENTOS QUE COMPOEM POWER FREQUENCY TEST SYSTEM E RESPECTIVAS ESPECIFICAÇÕES 140
APÊNDICE C – APRESENTAÇÃO INTEGRAL DOS DADOS COLETADOS SENSOR HAS 145

C.1 Avaliação de funcionamento do sensor HAS.....145
C.2 Otimização da geometria do sensor HAS.....147
C.3 Avaliação da sensibilidade do sensor HAS em diferenciar tipos de DPs.....154
C.4 Verificação o desempenho do sensor HAS em cabo de média tensão com blindagem metálica de chumbo.....157
APÊNDICE D – APRESENTAÇÃO INTEGRAL DOS DADOS COLETADOS SENSOR HRSS.....160
D.1 Avaliação de funcionamento do sensor HRSS.....160
D.2 Otimização da relação de espiras do sensor HRSS.....162
D.3 Avaliação da sensibilidade do sensor HRSS em diferenciar tipos de DPs.....164
D.4 Verificação o desempenho do sensor HRSS em cabo de média tensão com blindagem metálica de chumbo.....167
APÊNDICE E – APRESENTAÇÃO INTEGRAL DOS DADOS COLETADOS EXPERIMENTO COM CABO DE MAIOR EXTENÇÃO.....169
E.1 Cabo de 180 metros com sistema de aterrado em ambos os lados.....169
E.1.1 Sensores aferidos na ponta A.....169
E.1.2 Sensores aferidos na ponta B.....172
E.2 Cabo de 180 metros com sistema de aterrado em apenas um dos lados.....174
E.2.1 Sensores aferidos na ponta A.....174
E.2.2 Sensores aferidos na ponta B.....177

1 INTRODUÇÃO

A confiabilidade dos sistemas elétricos de potência está diretamente associada à integridade dos sistemas de isolamento empregados em equipamentos e cabos de média e alta tensão. Nesse contexto, as descargas parciais (DPs) constituem importantes indicadores de degradação dielétrica, podendo anteceder falhas catastróficas e interrupções não programadas no fornecimento de energia elétrica. Dessa forma, o monitoramento de atividades de DPs tornou-se uma ferramenta amplamente empregada em estratégias de manutenção preditiva, diagnóstico e avaliação da condição operacional de ativos elétricos [1,2].

Ao longo das últimas décadas, diversas técnicas de detecção de DPs têm sido desenvolvidas, incluindo métodos elétricos [3], acústicos [4], ópticos [5] e eletromagnéticos [6]. Entre essas abordagens, sensores baseados em acoplamento eletromagnético vêm ganhando destaque devido à boa sensibilidade, capacidade de operação não invasiva e facilidade de instalação em sistemas energizados [1,2].

Sensores do tipo indutivo e antenas são amplamente empregados no monitoramento de cabos isolados. Eles, permitem capturar tanto os pulsos conduzidos pelas blindagens quanto as ondas irradiadas em pontos críticos, como emendas e terminações [2,7]. Entretanto, dispositivos comerciais frequentemente apresentam elevado custo de aquisição e reduzida flexibilidade para customização frente a diferentes geometrias e seções transversais de cabos.

Além disso, muitos sensores comerciais são desenvolvidos para aplicações específicas, dificultando sua utilização em ambientes experimentais ou em estudos voltados à investigação de novas técnicas de processamento e classificação de sinais de DPs [1,4,8]. Nesse cenário, o desenvolvimento de tecnologias de medição, especialmente sensores de custo significativamente reduzido em relação às alternativas comerciais, boa sensibilidade e maior flexibilidade construtiva apresenta-se como uma alternativa relevante tanto para aplicações acadêmicas quanto para aplicações em monitoramento industrial.

Paralelamente ao avanço dos dispositivos de aquisição, técnicas de processamento digital de sinais e inteligência artificial (IA) vêm sendo amplamente exploradas para aumentar a capacidade de detecção, separação de ruído e classificação automática de padrões de DPs. A utilização dessas abordagens permite extrair características relevantes mesmo em ambientes com baixa relação sinal-ruído, contribuindo para diagnósticos mais precisos e robustos [9].

Diante desse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento e a avaliação experimental de duas propostas alternativas de sensores de custo significativamente reduzido

em relação às alternativas comerciais com a capacidade de detectar pulsos de DPs em cabos isolados de média e alta tensão, os quais, para fins de identificação nesta dissertação, foram denominados *Helicoidal Antenna Sensor* (HAS) e HFCT *Relative Signature Sensor* (HRSS). Os sensores foram concebidos utilizando materiais comercialmente acessíveis e técnicas de manufatura aditiva, buscando aliar custo significativamente reduzido em relação às alternativas comerciais, flexibilidade construtiva e desempenho compatível com aplicações de monitoramento de DPs.

Esta dissertação está associada ao projeto de P&D intitulado "Desenvolvimento de metodologia de indicador online de confiabilidade de sistema elétrico e gestão de ativos", sob financiamento da ANEEL e parceria da Petrobras SA, código PD-00553-0071/2025.

1.1 Justificativa

A crescente demanda por confiabilidade e disponibilidade nos sistemas elétricos de potência tem impulsionado a transição de estratégias tradicionais de manutenção preventiva para abordagens baseadas em gestão de ativos e manutenção preditiva [1, 2]. Nesse contexto, o monitoramento de DPs em cabos isolados de média e alta tensão destaca-se como uma importante ferramenta para avaliação da condição do sistema de isolamento, uma vez que a atividade de DPs constitui um dos indicadores mais precoces de degradação dielétrica de ativos de média e alta tensão [1, 7].

Mais especificamente, o desenvolvimento de sensores justifica-se pela necessidade de métodos de detecção *on-line* e não invasivos, capazes de avaliar o estado operacional dos ativos sem a necessidade de desconexão do sistema ou interrupção do fornecimento de energia elétrica. Essa característica é particularmente relevante em sistemas industriais e redes de distribuição, nos quais desligamentos não programados podem resultar em elevados custos operacionais e impactos na continuidade do serviço [7,10].

Do ponto de vista técnico, sensores do tipo HFCT apresentam boa capacidade de detectar de pulsos de DPs de alta frequência que se propagam pelas blindagens metálicas de aterramento, no caso de cabos isolados de alta tensão [1,2,7]. De forma complementar, sensores baseados em antenas permitem a captura de componentes eletromagnéticas irradiadas em regiões de descontinuidade do sistema, como emendas, terminações e defeitos localizados, considerados pontos críticos de ocorrência de falhas para cabos isolados [1,7,10]. Embora tais sensores possam ser empregados no monitoramento de diferentes equipamentos elétricos de média e alta tensão que possuam sistemas dielétricos suscetíveis à ocorrência de DPs, o foco

deste trabalho concentra-se em sua aplicação para diagnóstico e monitoramento de cabos elétricos isolados de média e alta tensão.

A utilização combinada dessas tecnologias amplia a capacidade de detectar e análise das DPs, possibilitando maior imunidade a ruídos externos e favorecendo a distinção entre interferências provenientes da rede elétrica e sinais efetivamente associados à degradação do isolamento. Além disso, a análise das respostas espectrais obtidas por diferentes sensores pode fornecer informações complementares relevantes para a caracterização das fontes de descarga [2,9].

Por fim, o desenvolvimento de protótipos próprios justifica-se pela busca por soluções de custo significativamente reduzido em relação às alternativas comerciais, boa flexibilidade construtiva e maior adaptabilidade às diferentes geometrias e condições encontradas em campo. O domínio do processo de desenvolvimento dos sensores permite não apenas a customização mecânica para diferentes diâmetros e arranjos físicos dos fios, mas também a otimização da sensibilidade em faixas específicas de frequência. Adicionalmente, essa abordagem favorece futuras integrações com técnicas de processamento digital de sinais e algoritmos de Inteligência Artificial voltados à classificação automática de defeitos, contribuindo para o avanço de soluções associadas à digitalização das redes elétricas e aos conceitos de *Smart Grids* [11,12].

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação consiste na implementação e na avaliação experimental de dois tipos de sensores capazes de detectar DPs destinados a cabos isolados de média e alta tensão. Estes sensores, priorizam o uso de materiais comercialmente acessíveis e técnicas de manufatura aditiva. Em igual medida, busca-se investigar a influência de parâmetros físicos, geométricos e construtivos na sensibilidade e na caracterização (temporal e espectral) dos sinais produzidos por estes sensores.

A partir desse objetivo geral, definem-se outros decorrentes:

- Desenvolver um sensor do tipo *High-Frequency Current Transformer* (HFCT) com núcleo bipartido em geometria *clamp-on*;
- Desenvolver um sensor do tipo antena baseado nos princípios dos *Inductive Loop Sensors* (ILS), incorporando características híbridas de acoplamento indutivo-capacitivo;
- Analisar experimentalmente a influência de parâmetros construtivos no desempenho eletromagnético do sensor HFCT desenvolvido (*i.e.,* número de

espiras do enrolamento secundário) e do sensor HAS (*i.e.,* do comprimento efetivo do elemento ressonante passivo);

- Desenvolver os sensores propostos e investigar experimentalmente a influência de parâmetros construtivos e geométricos em seu desempenho eletromagnético para detectar pulsos de DPs;
- Comparar qualitativamente as características operacionais e construtivas das arquiteturas de sensores propostas em relação a dispositivos comerciais e topologias descritas na literatura especializada.

1.3 Limitações e convenções

O presente trabalho apresenta algumas limitações metodológicas e experimentais que devem ser consideradas na interpretação dos resultados obtidos. Nesse contexto, estabelecem-se as seguintes limitações e convenções adotadas ao longo da pesquisa:

1) O dimensionamento dos sensores foi realizado por meio de abordagem empírica baseada em prototipagem rápida, tomando como referência topologias consolidadas descritas na literatura técnica e em dispositivos comerciais. Dessa forma, o processo de otimização priorizou validação experimental iterativa em detrimento de modelagem analítica rigorosa;
2) O desenvolvimento dos sensores concentrou-se na investigação experimental de alternativas construtivas e arquiteturas de custo significativamente reduzido em relação às alternativas comerciais, não contemplando conformidade com requisitos normativos, procedimentos de certificação ou padronizações industriais aplicáveis a sistemas comerciais de medição de DPs;
3) Os experimentos foram conduzidos com número reduzido de repetições, visando minimizar esforços excessivos sobre os sistemas de ensaio submetidos a elevados níveis de tensão;
4) Os ensaios experimentais foram realizados exclusivamente em ambiente laboratorial controlado, não sendo avaliados efeitos associados à operação contínua em campo, ciclos térmicos prolongados ou exposição a condições ambientais adversas;

5) A avaliação experimental foi conduzida utilizando número limitado de protótipos, não sendo realizada análise estatística aprofundada da variabilidade construtiva entre diferentes unidades fabricadas.

Além das limitações apresentadas, algumas convenções metodológicas também foram adotadas ao longo do trabalho. São elas:

1) O trabalho também não contemplou modelagem eletromagnética numérica detalhada das estruturas propostas, concentrando-se predominantemente na implementação prática e validação experimental dos dispositivos;
2) As propriedades dielétricas dos materiais de suporte empregados nos sensores foram consideradas desprezíveis dentro da faixa de frequência investigada, assumindo-se que sua influência sobre o acoplamento eletromagnético dos sinais de DPs é limitada. Adicionalmente, a precisão dimensional dos dispositivos foi considerada dependente das características geométricas intrínsecas dos materiais utilizados, como a estrutura alveolar das chapas poliméricas e a resolução do processo de impressão 3D;
3) O sensor Techimp HFCT *Clamp* (Techimp - Altanova Group, Itália) [13] foi adotado como referência experimental (padrão-ouro) para comparação qualitativa do desempenho dos protótipos desenvolvidos neste trabalho;
4) Os ensaios laboratoriais foram realizados estritamente em cabos isolados, seguindo as convenções e diretrizes estabelecidas pelas normas técnicas de ensaios de DPs (IEC 60270);
5) Os testes de DPs foram limitados à tensão de 17,5 kV.

1.4 Apresentação desta dissertação

Para a consecução dos objetivos propostos, esta dissertação está estruturada em cinco seções, além desta introdução. O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico, abordando os principais conceitos relacionados às DPs, seus mecanismos de ocorrência, os diferentes tipos de descargas e os padrões gráficos utilizados em sua análise. Adicionalmente, são apresentados os fundamentos relacionados aos cabos isolados de média e alta tensão, seus acessórios de terminação, as principais técnicas de detecção de DPs e os dispositivos atualmente empregados para esse propósito. O capítulo também contempla conceitos de processamento digital de sinais aplicados à análise de DPs, bem como a revisão bibliográfica relacionada ao tema da pesquisa.

No Capítulo 3 descreve a metodologia adotada, incluindo os aspectos estruturais e a parametrização dos sensores desenvolvidos, os procedimentos de calibração experimental, a configuração da bancada de ensaios, os cabos utilizados nos experimentos e a descrição detalhada dos testes realizados. O Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos ao longo dos ensaios experimentais, incluindo as análises estatísticas e a discussão técnica do desempenho dos sensores propostos. Por fim, O Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, destacando as principais contribuições da pesquisa, suas limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMETAÇÃO TEÓRICA E ESTADO DA ARTE

Neste Capítulo, apresentam-se os conceitos fundamentais relacionados à compreensão do conteúdo desenvolvido neste trabalho, com ênfase nos aspectos relacionados ao fenômeno das DPs, aos cabos isolados, aos sensores e ao processamento digital de sinais associados às DPs.

Nas seções subsequentes, são abordados os principais tipos de DPs e suas respectivas características. Posteriormente, apresentam-se os tipos de sensores utilizados na de aquisição de DPs atualmente empregados, bem como o objeto de análise (cabos de média e alta tensão isolados) e seus elementos, além da aplicação de técnicas de processamento digital de sinais na análise dos pulsos. Por fim, são discutidos estudos relacionados ao desenvolvimento de sensores capazes de detectar DPs, alinhados aos objetivos propostos neste trabalho.

2.1 Fenômeno elétricos de DPs

Segundo a IEC60270, a DPs é caracterizada como uma descarga elétrica localizada, que não atravessa completamente o meio isolante entre superfícies condutoras, podendo ocorrer entre eletrodos ou até mesmo envolvendo apenas um deles [1]. Esse fenômeno está, em geral, associado a concentrações localizadas de campo elétrico no interior ou na superfície do isolamento elétrico. Tais descargas manifestam-se tipicamente na forma de pulsos de curta duração, geralmente inferiores a 1 μs [14].

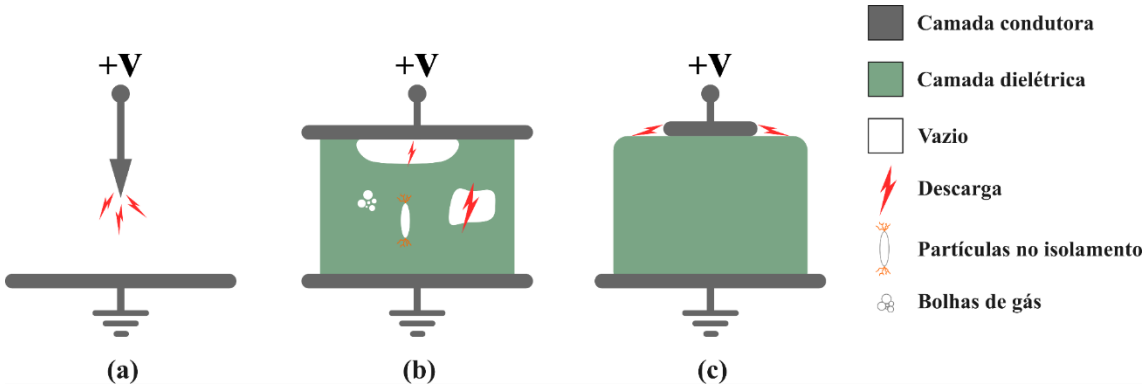
O fenômeno da DPs apresenta natureza transitória e espacialmente restrita. No entanto, apesar de sua curta duração, a elevada energia associada aos elétrons envolvidos nos pulsos pode interagir com os materiais dielétricos próximos, promovendo quebra de ligações moleculares, alterações nas propriedades químicas e processos de degradação, como a ablação do material [15].

As DPs ocorrem frequentemente em regiões de descontinuidade do meio isolante, como *voids* preenchidos com gás em materiais sólidos, ou em pontos de intensificação de campo elétrico, como saliências pontiagudas. Nessas condições, o aumento local do campo elétrico pode exceder a rigidez dielétrica do meio, favorecendo o início das DPs em equipamentos de considerável tensão (*i.e.,* média e alta tensão) [1,15].

2.2 Tipos de DPs

As DPs podem ser classificadas em três macro-categorias principais: (i) descarga corona, (ii) descarga interna e (iii) descarga de superfície. Os, comportamentos característicos destes tipos de DPs no sistema de isolamento são ilustrados na Figura 1 [1].

Figura 1 — Tipos de defeito em terminais e isolamento elétrico.



Fonte: Adaptado pelo autor (2026), a partir de [10].

A descarga corona é um tipo de DPs que ocorre geralmente em meio gasoso, ao redor de um condutor eletricamente energizado, sendo originada a partir da ionização do fluido circundante, como o ar. Esse tipo de descarga é geralmente observado em regiões onde há intensificação do campo elétrico [1,15], conforme ilustrado na Figura 1(a).

As descargas internas, por sua vez, ocorrem em *voids* ou descontinuidades presentes no interior do material isolante, formando regiões com menor rigidez dielétrica, conforme mostrado na Figura 1(b). A atividade desse tipo de descarga pode levar à degradação progressiva do isolamento, dependendo de fatores como a intensidade do campo elétrico, as propriedades do material e a magnitude das descargas [16].

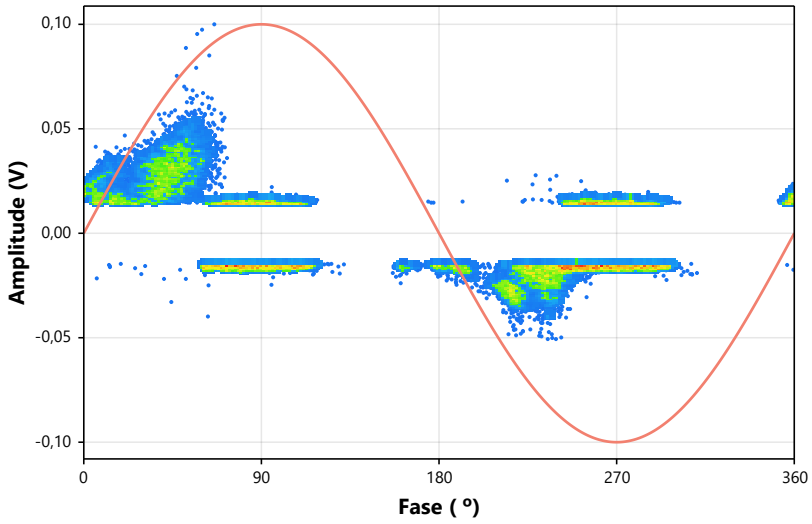
Já as descargas de superfície ocorrem ao longo da interface de materiais isolantes sólidos, sendo induzidas por um campo elétrico com componente predominantemente tangencial à superfície dielétrica. Esse comportamento é ilustrado na Figura 1(c), sendo característico de situações em que há contaminação, umidade ou irregularidades na superfície do material isolante [17].

2.3 Padrões representativos das DPs

Pulsos de DPs podem ser identificados por meio de técnicas de classificação, nas quais as características da descarga analisada são comparadas a padrões previamente conhecidos. Dessa forma, a distinção entre os diferentes tipos de DPs permite uma avaliação inicial tanto da natureza, quanto da severidade do defeito presente no sistema de isolamento. Isto contribui para a tomada de decisão em atividades de diagnóstico e para a redução do tempo de manutenção [1,15,18].

O diagrama *phase-resolved partial discharge* (PRPD), ilustrado na Figura 2, consiste em uma representação visual da atividade de DPs ao longo dos 360 graus de um ciclo de tensão alternada. Ele revela a posição do ciclo de 50 ou 60 Hz em que as DPs ocorrem. Os tipos de DPs são caracterizados por concentrações especificas em determinadas partes desse ciclo. Por isto, trata-se de uma ferramenta amplamente utilizada para a análise dos sinais associados às DPs provenientes do objeto sob ensaio, permitindo sua distinção em relação a possíveis fontes de ruídos, que habitualmente ocorrem de maneira aleatória ou distribuída ao longo do ciclo [1,15].

Figura 2 — Exemplo de representação do gráfico PRPD, onde o mapa de calor representa a densidade de pulso, a região em vermelha representa alta densas e a azul baixa.

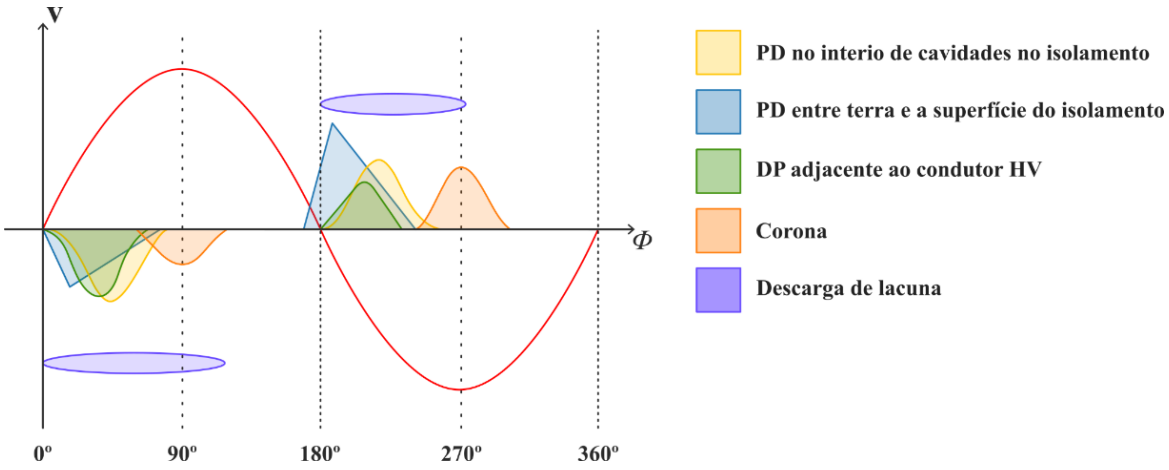


Fonte: O autor.

Devido à grande variedade de fontes geradoras de DPs e as diferentes regiões em que podem ocorrer dentro de um dielétrico, como em fissuras, *voids* preenchidos por gás ou irregularidades estruturais, observa-se uma diversidade significativa de padrões PRPD. A

Figura 3 apresenta generalizações típicas desses padrões, associadas a diferentes mecanismos e locais de ocorrência das DPs [1].

Figura 3 — Exemplo de representação do gráfico PRPD.



Fonte: Adaptado pelo autor (2026), a partir de [1].

Os diagramas PRPD podem ser utilizados tanto em ensaios *off-line*[1] quanto *on-line*[2], incluindo testes de aceitação em fábrica (*Factory Acceptance Tests* – FAT) e avaliações de condição em campo. De modo geral, sistemas modernos e confiáveis de medição de DPs incorporam a geração de diagramas PRPD, ainda que possam apresentar variações quanto à resolução em amplitude e fase [1].

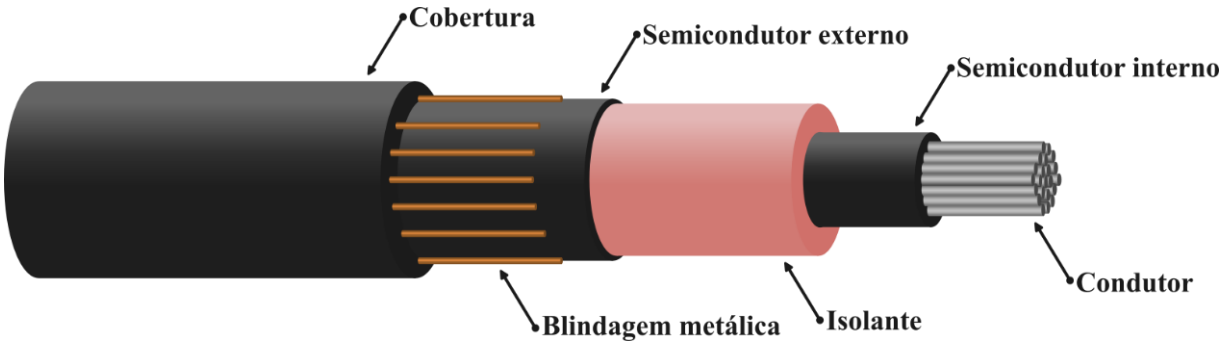
2.4 Cabos isolados

Diferentemente dos cabos de baixa tensão, cuja estrutura é geralmente composta por um condutor e sua respectiva isolação, os cabos isolados de média e alta tensão apresentam uma estrutura mais complexa, constituída por múltiplas camadas com funções específicas. Entre os principais elementos, destacam-se o condutor, a blindagem do condutor, a isolação, a dupla blindagem do isolante (composta por uma camada não metálica e outra metálica) e a cobertura externa, conforme ilustrado na Figura 4 [19,20].

[1] Ensaios *off-line*: são realizados em ambiente controlado, com reduzida interferência de ruídos externos, visando a observação e a análise das descargas parciais de forma isolada, de modo a permitir uma caracterização mais precisa do fenômeno.

[2] Ensaios *on-line*: são conduzidos em condições reais de operação, estando sujeitos à presença de diferentes fontes de ruído e interferência. Esses ensaios têm como objetivo a avaliação do estado de ativos elétricos, possibilitando a identificação de falhas em desenvolvimento e a estimativa de sua vida útil remanescente.

Figura 4 — Cabo de média tensão e suas respectivas camadas.



Fonte: Adaptado pelo autor (2026), a partir de [20].

O condutor corresponde à parte metálica responsável pela condução de corrente elétrica, sendo geralmente constituído de cobre ou alumínio. Sua configuração pode ser do tipo encordoamento simples ou compactado, sendo este último empregado com o objetivo de reduzir o diâmetro total e minimizar a presença de espaços *voids* entre os fios [1,20].

A blindagem do condutor é formada por um material semicondutor extrudado diretamente sobre o condutor metálico. Esse material, geralmente composto por um polímero isolante aditivado com grafite, tem como principal função regularizar a superfície do condutor, transformando-a em uma geometria aproximadamente cilíndrica e uniforme. Essa uniformização é fundamental para garantir uma distribuição homogênea do campo elétrico ao longo da interface condutor-isolante [1,21].

Na ausência dessa blindagem, especialmente em condutores com encordoamento simples, a aplicação direta da camada isolante pode resultar na formação de *void* preenchidos por ar entre os fios. Considerando que o ar apresenta baixa rigidez dielétrica, esses espaços tornam-se suscetíveis à ionização sob a ação do campo elétrico, conforme ilustrado na Figura 5(a) [22]. De acordo com a teoria de Townsend [22], elétrons livres são acelerados pelo campo elétrico e, ao colidirem com moléculas do gás, iniciam processos de avalanche eletrônica. Em condições de campo suficientemente elevado, pode ocorrer a transição para o regime de *streamer*, resultando em DPs que promovem a degradação química e mecânica da isolação, especialmente em materiais isolante como Polietileno Reticulado (*Cross-linked Polyethylene*, XLPE) e Borracha de Etileno-Propileno (*Ethylene Propylene Rubber*, EPR) [1,22].

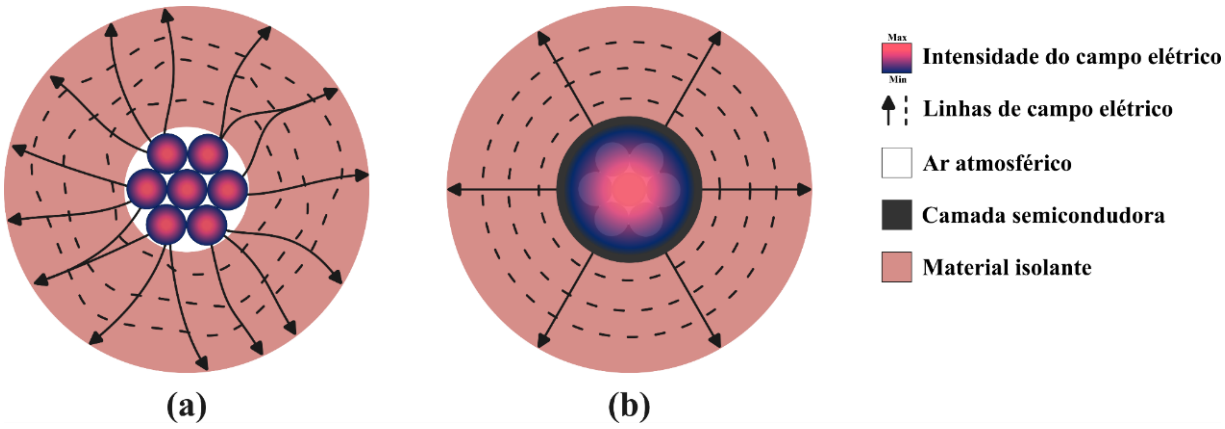
Considerando a geometria cilíndrica concêntrica dos cabos de média tensão, o gradiente de campo elétrico radial pode ser descrito em função da tensão aplicada e das dimensões do cabo. Essa relação é expressa pela Equação 1

$$E_r = \frac{V}{r \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (1)$$

onde V representa a tensão aplicada, r_i o raio interno (condutor) e r_o o raio externo da isolação. A partir dessa relação, observa-se que a intensidade do campo elétrico é máxima nas proximidades do condutor, tornando essa região mais suscetível à ocorrência de DPs na presença de descontinuidades [1,17].

A aplicação da blindagem semicondutora sobre o condutor minimiza os efeitos das irregularidades superficiais e promove a uniformização do campo elétrico, reduzindo significativamente a probabilidade de ionização local, conforme ilustrado na Figura 5(b) [22,23].

Figura 5 — Comportamento do campo elétrico na ausência e na presença da camada semicondutora.



Fonte: O autor.

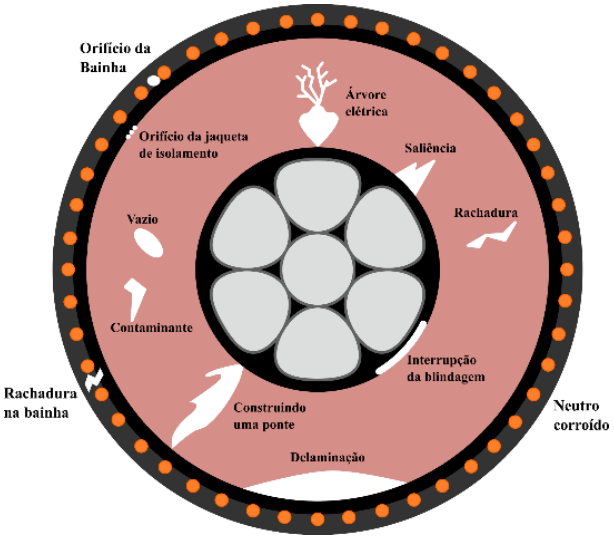
A camada isolante dos cabos de média tensão deve apresentar elevada rigidez dielétrica, baixa resistividade térmica e reduzido fator de perdas dielétricas, de modo a garantir eficiência operacional e confiabilidade. Os materiais utilizados podem ser classificados em termoplásticos, como o policloreto de vinila (PVC), que suportam temperaturas de até aproximadamente 70 ºC, e termofixos, como o polietileno reticulado (XLPE) e a borracha etileno-propileno (EPR), que suportam temperaturas de operação de até 90 ºC e são amplamente empregados devido ao seu melhor desempenho elétrico e térmico [1,23–26].

A blindagem externa do cabo é composta por duas camadas. A primeira, não metálica, é semelhante à blindagem do condutor e tem como função eliminar possíveis *voids* ionizáveis, além de contribuir para a uniformização do campo elétrico e da capacitância entre o condutor e o meio externo. A segunda camada, metálica, pode ser constituída por fios de cobre, fitas

metálicas ou capas de chumbo, sendo responsável por confinar o campo elétrico, garantir o escoamento de correntes de fuga e proporcionar segurança operacional. Diferentemente das demais camadas, a blindagem metálica deve ser sempre aterrada [20,25,26].

Apesar do cuidado no projeto e fabricação, um dos principais problemas associados aos cabos de média e alta tensão é a formação de *void* na isolação, geralmente decorrentes de bolhas de ar, infiltração de umidade ou falhas durante o processo de instalação, conforme ilustrado na Figura 6 [17,20]. Durante a instalação, podem ocorrer danos mecânicos, como torções, deformações e fraturas na bainha, comprometendo a integridade do sistema isolante [11,12].

Figura 6 — Defeitos típicos encontrados no sistema de isolamento.



Fonte: Adaptado pelo autor (2026), a partir de [11].

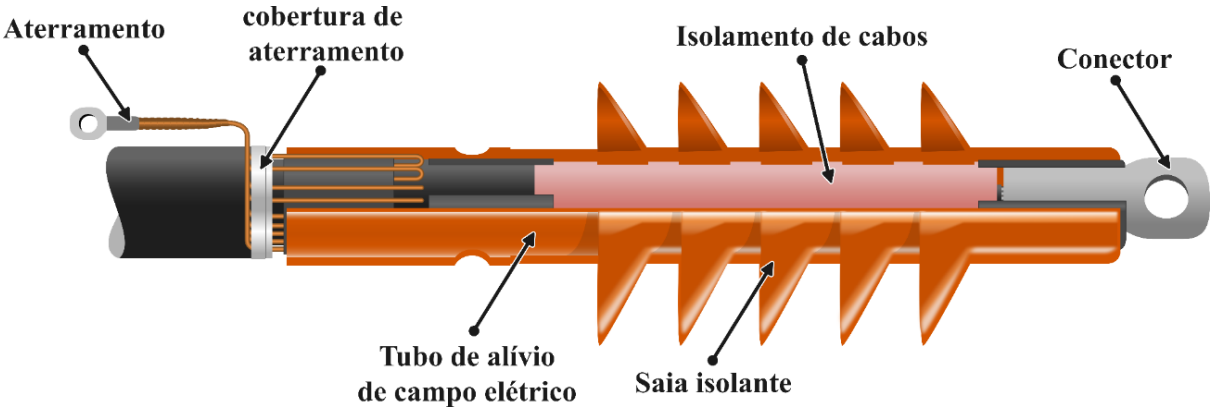
Essas condições favorecem o surgimento de defeitos como arborescências aquosas e elétricas, que se originam em regiões de descontinuidade, impurezas ou pequenas inclusões gasosas. As arborescências aquosas são particularmente críticas, pois podem evoluir para arborescências elétricas sob a ação do campo elétrico, aumentando significativamente o risco de falhas. Como consequência, podem ocorrer DPs que, ao longo do tempo, levam à degradação progressiva do isolamento, podendo resultar em falhas catastróficas, como curtos-circuitos ou falhas de aterramento [27–29].

Além disso, durante a operação, variações de carga e temperatura provocam ciclos de expansão e contração dos materiais do cabo, gerando esforços mecânicos adicionais. Esses ciclos térmicos, ao longo do tempo, podem causar fadiga dos materiais e até a separação entre camadas, favorecendo a formação de novos *voids* e, consequentemente, o surgimento de DPs [20].

2.5 Terminação de cabos

As terminações de cabos são aparatos essenciais para a conexão de cabos a outros equipamentos elétricos. Sua principal função é restabelecer as condições adequadas de isolação na extremidade de um cabo isolado, evitando concentrações indesejadas de campo elétrico nessa região. Para isso, as terminações devem ser projetadas de forma a controlar o campo elétrico crítico nas extremidades do cabo, sendo constituídas por materiais específicos e elementos de controle de estresse elétrico, como cones de controle de campo. A Figura 7 apresenta uma estrutura típica de terminação [23,30].

Figura 7 — Estrutura da terminação.



Fonte: Adaptado pelo autor (2026), a partir de [23].

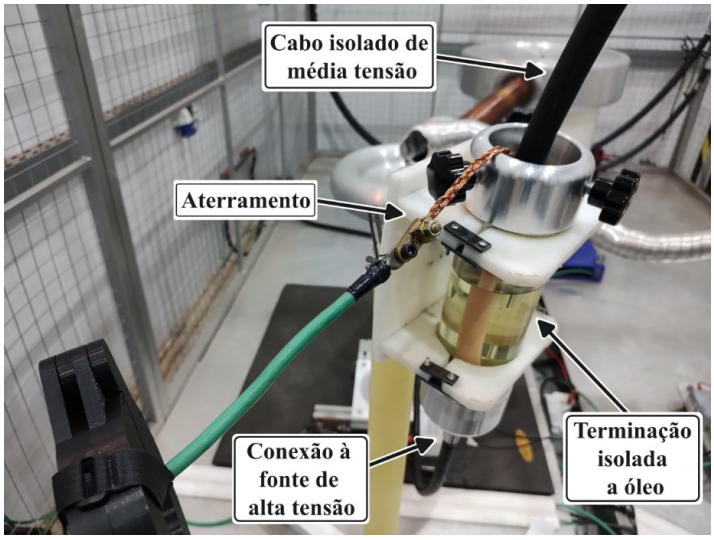
Para possibilitar a conexão do cabo a um equipamento elétrico, torna-se necessário afastar a blindagem metálica da extremidade, expondo o material isolante (dielétrico). No entanto, essa modificação geométrica provoca um desequilíbrio na distribuição do campo elétrico, uma vez que seu principal mecanismo de confinamento foi removido, resultando em concentrações elevadas nessa região crítica [1,30].

Nesse contexto, as terminações, também conhecidas como muflas, têm como finalidade promover a adequada redistribuição do campo elétrico, garantindo que os gradientes de tensão, tanto radiais quanto longitudinais, permaneçam dentro de limites seguros. Dessa forma, ocorre a suavização do campo elétrico nas extremidades do cabo de média e alta tensão, reduzindo o risco de DPs e falhas no sistema de isolamento [23].

Em ambiente de laboratório, especialmente em ensaios de falhas, o emprego de muflas pode não ser a alternativa mais adequada, uma vez que esses dispositivos são projetados para instalação permanente. Nesses casos, utilizam-se, normalmente, terminações de caráter

provisório, como ilustrada na Figura 8, nas quais a extremidade do cabo, com o isolamento exposto, permanece submersa em óleo isolante, o mesmo empregado em transformadores, com o objetivo de garantir condições adequadas de isolação durante os ensaios [31].

Figura 8 — Terminação a óleo aplicada em ensaio de laboratório.



Fonte: O autor.

2.6 Técnicas de detecção de DPs

O monitoramento de atividades de DPs constitui uma ferramenta fundamental para a avaliação do desempenho e da integridade de cabos isolados. De acordo com a norma IEC 60270, os sistemas convencionais de detecção diferenciam-se pelas suas faixas de operação. Os instrumentos de banda larga atuam em frequências onde o limite inferior situa-se tipicamente entre 30 kHz e 100 kHz, e o limite superior deve ser menor ou igual a 1 MHz, resultando em uma largura de banda compreendida entre 100 kHz e 900 kHz. Em contrapartida, os sistemas de banda estreita operam com uma frequência central ajustável, geralmente sintonizada entre 50 kHz e 1 MHz, apresentando uma seletividade maior com largura de banda reduzida, que deve situar-se entre 9 kHz e 30 kHz [14].

O padrão IEEE, por sua vez, estabelece duas abordagens principais para detectar pulsos de DPs em cabos isolados: os métodos *off-line* e *on-line* [32]. Ambas as abordagens são amplamente utilizadas no desenvolvimento de sensores, bem como no estudo e na análise das características de propagação dos pulsos de DPs em sistemas de cabos [33].

O método de detecção *off-line* é realizado em ambiente laboratorial controlado, caracterizado por baixos níveis de ruído de fundo, o que proporciona boa precisão e

confiabilidade aos resultados. Nesse tipo de ensaio, o cabo sob análise é desconectado da rede elétrica em ambas as extremidades e energizado por uma fonte de alta tensão ajustável. Geralmente, são utilizados cabos retirados de operação. Uma das principais vantagens desse método é a possibilidade de aplicação de diferentes níveis de tensão, permitindo a identificação de padrões característicos de DPs associados a tipos específicos de defeitos no sistema de isolamento, além de apresentar baixa taxa de falsos positivos [1,2,7,32].

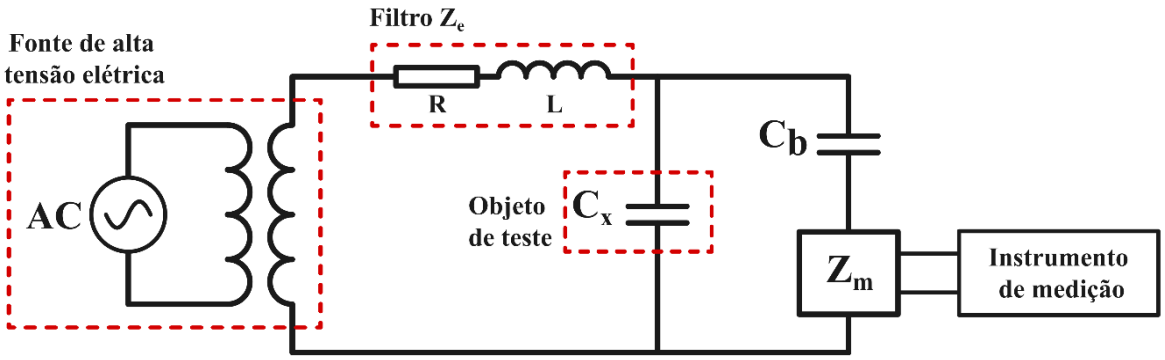
Em contrapartida, o método de detecção *on-line* é realizado com o sistema em operação normal, diretamente em campo, possibilitando a avaliação das DPs sob condições reais de carga. No entanto, fatores como o posicionamento do sensor, o comprimento do cabo e a presença de ruído ambiental podem afetar a sensibilidade, a precisão e a confiabilidade das medições. Dessa forma, técnicas de mitigação e separação de ruído tornam-se essenciais para garantir a correta identificação dos pulsos de DPs e evitar sua confusão com sinais interferentes [1,2,7,32].

2.7 Dispositivos empregados na detecção de DPs

Ao longo dos anos, diversos dispositivos têm sido desenvolvidos para o uso na detecção de pulsos de DPs, tanto em aplicações *off-line* quanto *on-line*. Em geral, esses dispositivos operam em banda larga e banda estreita, incorporam diferentes técnicas de rejeição de ruído com o objetivo de identificar de forma confiável as DPs e, em alguns casos, determinar sua localização. De forma geral, esses sistemas podem ser classificados em três categorias: métodos convencionais, eletromagnéticos e não elétricos [1,2,10,32].

A detecção convencional consiste em um método elétrico baseado na norma IEC 60270, no qual são adquiridos pulsos de corrente de alta frequência decorrentes de *void* no material dielétrico. Esses pulsos são detectados por meio de um capacitor de acoplamento. Trata-se de uma técnica amplamente utilizada devido à sua boa precisão, especialmente em ensaios *off-line*. Um arranjo típico de medição, ilustrado na Figura 9, é composto por uma fonte de alta tensão em corrente alternada com baixo nível de ruído, o objeto de teste C_x, um capacitor de acoplamento C_b e uma impedância de medição Z_m [3,34]. Para a supressão de interferências provenientes da fonte, emprega-se um filtro Z_e. O sinal das DPs é então obtido a partir da tensão medida na impedância Z_m, associada à corrente transitória gerada pela descarga [35].

Figura 9 — Sistema convencional de medição segundo norma IEC60270.



Fonte: Adaptado pelo autor (2026), a partir de [35].

A detecção eletromagnética baseia-se na captação da radiação eletromagnética emitida pelos pulsos de DPs, que apresentam um espectro amplo de frequências, podendo atingir a faixa de GHz. Esse espectro abrange as bandas de *high-frequency* (HF: 3–30 MHz), *very-high-frequency* (VHF: 30–300 MHz) e *ultra-high-frequency* (UHF: 300 MHz–3 GHz) [36]. Os sensores utilizados podem ser do tipo indutivo, como transformador de corrente de alta frequência (*high-frequency current transformer*, HFCT), bobina de Rogowski (*Rogowski coil,* RC) e sensor laço indutivo (*inductive loop sensors,* ILS), operando nas faixas de HF e VHF. Alternativamente, podem ser utilizados sensores baseados em antenas, como *loop*, *monopole*, *patch*, *spiral* e *fractal antenna*, operando predominantemente na faixa de UHF [37-39]. Esses sensores apresentam como principais vantagens a possibilidade de monitoramento *on-line* contínuo, operação não invasiva e capacidade de classificação das descargas. Em especial, sensores UHF destacam-se pela elevada imunidade a interferências eletromagnéticas externas e pela alta relação sinal-ruído, uma vez que operam em faixas de frequência superiores às principais fontes de ruído ambiental, como descargas corona [2,10,40,41].

A detecção não elétrica engloba métodos alternativos baseados na observação de fenômenos secundários associados às DPs, como emissão óptica, sinais acústicos e subprodutos químicos. A detecção óptica baseia-se na emissão de luz decorrente da ionização do meio, sendo influenciada por fatores como composição do material, temperatura e pressão, que afetam o espectro e a intensidade luminosa [40]. Esses sensores podem apresentar elevada imunidade a interferências eletromagnéticas. Porém, podem sofrer limitações relacionadas à atenuação, dispersão e reflexão da luz [2,42].

A técnica acústica fundamenta-se em detectar ondas sonoras geradas durante a ocorrência de DPs, geralmente na faixa de 20 kHz a 200 kHz. Essas ondas são resultantes da

rápida liberação de energia associada à formação de *streamers* e à vaporização local do material. Entre suas vantagens destacam-se a baixa sensibilidade a interferências eletromagnéticas e a capacidade de localização da fonte de descarga. Entretanto, a baixa amplitude dos sinais e a complexidade do fenômeno acústico podem limitar sua sensibilidade, sendo frequentemente necessária a combinação com outras técnicas [3,43].

A detecção química, por sua vez, baseia-se na análise de subprodutos gerados pelas DPs. Entre os métodos mais utilizados destacam-se a análise de gases dissolvidos (AGD) e a cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), que permitem avaliar a presença e a evolução de processos de degradação no isolamento [44-46]. Embora sejam pouco sensíveis às interferências ambientais, esses métodos não permitem a localização precisa das descargas nem a medição direta da intensidade dos pulsos, podendo introduzir incertezas na análise [47-49].

Por fim, destaca-se que, tanto nos métodos convencionais, quanto os eletromagnéticos, não se observa diretamente o pulso de descarga parcial em si. Na prática, o que se mede corresponde à carga elétrica induzida nos terminais ou às ondas eletromagnéticas associadas a essa descarga, que se propagam até o sistema de detecção [15].

2.8 Processamento digitais de sinais para DPs

No monitoramento de DPs, o processamento digital de sinais (PDS) desempenha um papel fundamental, permitindo a extração de pulsos frequentemente obscurecidos por ruídos eletromagnéticos complexos, típicos de ambientes industriais, e por distorções causadas pela atenuação dos pulsos no meio de propagação [9]. A evolução dessa área evidencia uma transição progressiva de análises clássicas nos domínios do tempo e da frequência para abordagens adaptativas e, mais recentemente, para o uso de técnicas baseadas em inteligência artificial. Ressalta-se que essa evolução não ocorreu de forma substitutiva, mas sim complementar, uma vez que métodos tradicionais continuam sendo amplamente empregados como etapas de pré-processamento e extração de características em sistemas modernos de diagnóstico [9,50,51].

A análise no domínio do tempo caracteriza a atividade de DPs por meio da avaliação direta de parâmetros como forma de onda, amplitude e intervalos entre pulsos. Essa abordagem é particularmente útil para diagnósticos preliminares e contagem de eventos, permitindo estabelecer relações entre a ocorrência das descargas e a tensão aplicada [52]. Adicionalmente, métricas estatísticas como *skewness* e *kurtosis* são frequentemente utilizadas para descrever a

distribuição dos pulsos e auxiliar na diferenciação entre padrões de descarga. Sua principal vantagem reside na simplicidade computacional e na eficiência, sendo adequada para aplicações em tempo real [52]. Entretanto, apresenta baixa imunidade ao ruído e limitada capacidade de discriminação em cenários complexos, devido à ausência de informações no domínio da frequência, especialmente em condições de baixa relação sinal-ruído [9, 52].

Os métodos baseados na Transformada de Fourier (*Fourier Transform*, FT), incluindo a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) e a Transformada de Fourier de Tempo Curto (*Short Time Fourier Transform*, STFT), têm como objetivo decompor o sinal em seus componentes espectrais, permitindo a identificação de frequências características e a filtragem de ruídos de banda estreita [53, 54]. Em aplicações práticas, a FFT é amplamente utilizada no projeto de filtros digitais para a remoção de interferências periódicas [54, 55]. Todavia, tais métodos apresentam limitações importantes: a FFT não gera informação temporal, enquanto a STFT possui resolução fixa, dificultando a análise simultânea de eventos transitórios e componentes estacionários [54,56]. Técnicas mais avançadas, como a Transformada de Fourier Fracionária (*fractional Fourier transform*, FRFT), foram propostas para melhorar a representação de sinais não estacionários, porém exigindo aumento significativo da complexidade computacional [57,58].

A transformada Wavelet (*Wavelet transform*, WT) surge como uma alternativa eficaz para o processamento de sinais não estacionários, substituindo as bases trigonométricas da FT por funções localizadas no tempo e na frequência [59,60]. Sua principal aplicação está na supressão de ruído e na extração de características em múltiplas escalas de resolução [61]. Métodos como a transformada Wavelet discreta (*discrete Wavelet transform*, DWT) e a transformada em pacotes de Wavelet (*Wavelet packet transform,* WPT) permitem uma decomposição mais detalhada do sinal, favorecendo a separação entre componentes úteis e ruído, mesmo em cenários com baixa relação sinal-ruído [61,62]. Entre suas principais vantagens destacam-se a excelente resolução tempo-frequência, a flexibilidade na escolha da função base e o bom desempenho em tarefas de *denoising* [48,63,64]. Contudo, sua eficácia depende fortemente da escolha da *wavelet* mãe, do número de níveis de decomposição e da estratégia de *thresholding* adotada, exigindo conhecimento prévio sobre a morfologia do sinal analisado [65-68].

A transformada de Hilbert-Huang (Hilbert-Huang *transform*, HHT) introduz uma abordagem adaptativa para análise de sinais não lineares e não estacionários, baseada na decomposição em modos empíricos (*empirical mode decomposition*, EMD) [69]. Nesse método, o sinal é decomposto em funções de modo intrínseco (*intrinsic mode functions*, IMFs),

sobre as quais é aplicada a transformada de Hilbert, permitindo a análise da evolução temporal da energia do sinal no domínio tempo-frequência [70,71]. Extensões como a decomposição em modos empíricos em conjunto (*ensemble empirical mode decomposition*, EEMD) e a decomposição em modos empíricos em conjunto completo com ruído adaptativo (*complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise*, CEEMDAN) foram desenvolvidas para mitigar problemas como o *aliasing* modal e a sensibilidade ao ruído, proporcionando maior estabilidade na decomposição. Apesar dessas melhorias, o elevado custo computacional e a natureza iterativa do processo limitam sua aplicação em sistemas embarcados e em monitoramento em tempo real [72–77].

A aplicação de técnicas de Inteligência Artificial (IA), especialmente por meio de redes neurais convolucionais (*convolutional neural networks*, CNNs) e recorrentes (*recurrent neural networks*, RNNs), representa o estado da arte na classificação automática de padrões de DPs [50, 78]. Esses métodos permitem o aprendizado direto de características a partir de sinais temporais ou representações como diagramas PRPD, eliminando a necessidade de engenharia manual de atributos [78, 79]. Como principais vantagens, destacam-se a boa precisão diagnóstica (frequentemente superior a 95% em cenários complexos) e a robustez frente a ruídos e variações operacionais [9, 50]. Entretanto, desafios relevantes ainda persistem, como a necessidade de grandes volumes de dados rotulados, dificuldades de generalização entre diferentes sistemas e condições operacionais, além da baixa interpretabilidade física dos modelos [9, 80].

As tendências atuais no processamento de sinais de DPs apontam para o desenvolvimento de sistemas híbridos, que combinam a fundamentação física das técnicas tradicionais com a capacidade adaptativa da inteligência artificial [9, 81]. Nesses sistemas, métodos como WT ou CEEMDAN são empregados nas etapas de pré-processamento e extração de características, enquanto algoritmos de aprendizado de máquina são utilizados para classificação, resultando em ganhos significativos de desempenho. O avanço dessa área está associado ao desenvolvimento de soluções de IA leves e interpretáveis, adequadas para implementação em dispositivos embarcados. Além disso, a integração entre algoritmos e *hardware* dedicado, como arranjo de portas programáveis em campo (*field programmable gate array*, FPGA) e aceleradores de IA, tende a viabilizar sistemas de diagnóstico em tempo real com menor latência, maior capacidade operacional, menor consumo energético e maior autonomia operacional [9].

Embora as técnicas de PDS desempenhem papel fundamental na análise, identificação e classificação de DPs, seu desempenho está diretamente relacionado à qualidade dos sinais

utilizados como entrada. Dessa forma, a aquisição adequada dos sinais de DPs constitui uma etapa essencial para a obtenção de resultados confiáveis, uma vez que informações distorcidas ou incompletas podem comprometer as etapas subsequentes de processamento e diagnóstico. Nesse contexto, os sensores empregados na detecção de DPs assumem papel de destaque, pois são responsáveis pela captura das informações que servirão de base para as análises realizadas. Assim, a escolha e a aplicação adequadas desses dispositivos contribuem significativamente para a efetividade das técnicas de PDS e para a confiabilidade do diagnóstico do fenômeno.

2.9 Estado da Arte sobre sensores capazes de detectar DPs

A técnica radiométrica usadas na detecção de DPs foi desenvolvida inicialmente no final da década de 1988 com o objetivo de registrar as ondas eletromagnéticas irradiadas pelas fontes de descarga em subestações isoladas a gás (*gas insulated switchgear*, GIS) [82]. Posteriormente, essa metodologia foi adaptada para aplicação em transformadores de potência e sistemas de cabos elétricos, ampliando significativamente seu campo de utilização em sistemas elétricos de alta tensão [83].

Os pulsos de corrente gerados pelas DPs apresentam tempos de subida extremamente reduzidos, frequentemente da ordem de poucos nanossegundos. Em consequência disso, tais pulsos possuem amplo conteúdo espectral em frequência, podendo alcançar desde faixas de alta frequência (HF), até regiões de VHF e UHF, chegando inclusive à faixa dos GHz em determinadas condições [36]. Dessa forma, a atividade de DPs produz emissões eletromagnéticas capazes de serem detectadas por diferentes tipos de sensores radiométricos.

Uma das principais vantagens dos métodos radiométricos está na possibilidade de realizar medições sem contato galvânico direto com o equipamento monitorado [84]. Essa característica reduz a complexidade de instalação dos sensores e minimiza interferências no sistema de isolamento do equipamento sob análise. Além disso, mediante calibração adequada, os sinais captados podem fornecer informações relevantes sobre a condição do isolamento elétrico de transformadores, cabos e sistemas GIS [6].

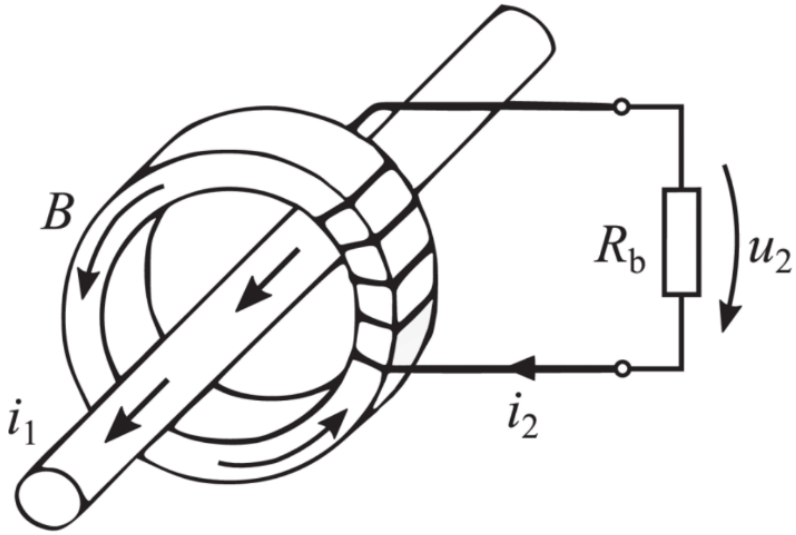
Outro aspecto importante dessa técnica é a possibilidade de implementação de sistemas de monitoramento *on-line*, permitindo a detecção contínua da atividade de DPs sem a necessidade de desligamento do equipamento [85]. Tal característica torna os sensores radiométricos particularmente atrativos para aplicações de manutenção preditiva e monitoramento baseado em condição em sistemas elétricos de potência.

Os sensores radiométricos podem ser classificados de acordo com a faixa de frequência de operação, o componente do campo eletromagnético detectado (campo magnético (B) ou campo elétrico (E)) e em função de onde os sinais são detectados, sejam eles irradiados no espaço livre ou propagadas pelo sistema de aterramento [41].

2.9.1 Sensores Indutivos

Os sensores indutivos, como ilustrado na Figura 10, são amplamente empregados em sistemas de detecção de DPs devido a sua operação não invasiva, boa sensibilidade a sinais de alta frequência e facilidade de instalação. Esses sensores operam com base na lei de Faraday da indução eletromagnética, na qual correntes transitórias geradas por DPs induzem tensões mensuráveis em estruturas condutivas próximas ou em núcleos magnéticos [86].

Figura 10 — Representação dos sensores indutivos.



Fonte: [88].

Os pulsos eletromagnéticos gerados pelos eventos de DPs possuem componentes espectrais que variam desde centenas de kHz até dezenas de MHz, dependendo das características da descarga e do caminho de propagação do sinal [87]. Dessa forma, sensores indutivos são projetados para operar em uma larga faixa de frequências, garantindo sensibilidade adequada e fidelidade dos sinais detectados.

Entre os principais sensores indutivos empregados em sistemas de monitoramento de DPs destacam-se o HFCT, RC e o ILS. Esses sensores diferem entre si em termos de geometria,

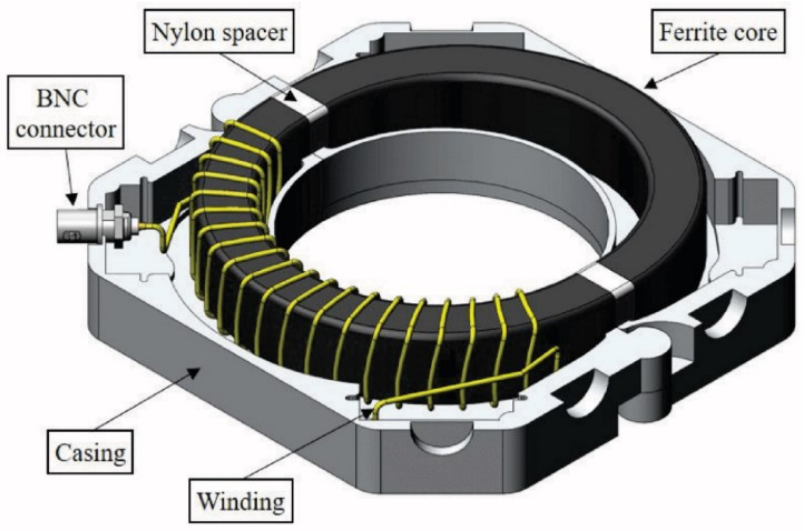
princípio de funcionamento, largura de banda e sensibilidade, tornando cada topologia mais adequada para aplicações específicas [2].

Os sensores indutivos apresentam diversas vantagens em comparação aos métodos convencionais de acoplamento capacitivo, incluindo menor complexidade de instalação, reduzida influência sobre o sistema de isolamento e maior imunidade às interferências externas. Além disso, sua compatibilidade com sistemas de monitoramento *on-line* tem tornado esses dispositivos cada vez mais atrativos para aplicações de manutenção baseada em condição em sistemas elétricos de potência [7, 12].

2.9.2 Transformador de corrente de alta frequência

O transformador de corrente de alta frequência, como representado na Figura 11, é um dos sensores mais utilizados para detecção de DPs em equipamentos elétricos e sistemas de cabos. O sensor é normalmente instalado ao redor do condutor de aterramento do equipamento, permitindo detectar pulsos de corrente de alta frequência associados à atividade de DPs [12].

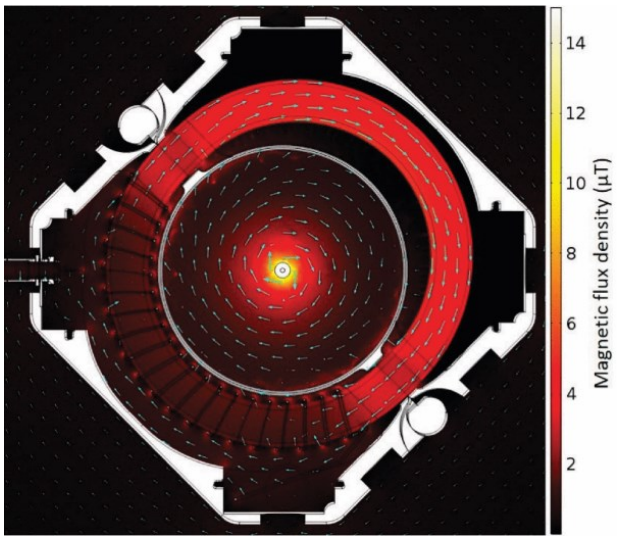
Figura 11 — Sensor HFCT.



Fonte: [85].

O princípio de funcionamento do HFCT baseia-se na indução eletromagnética. Quando ocorre uma descarga parcial, um pulso transitório de corrente propaga-se pelo caminho de aterramento, gerando um campo magnético variável no tempo. Esse campo magnético induz uma tensão no enrolamento secundário do HFCT de acordo com a Lei de Faraday, como representado na Figura 12 [86].

Figura 12 — Densidade de fluxo magnético no sensor HFCT



Fonte: [85].

Sensores HFCT geralmente consistem em um núcleo toroidal de material ferromagnético enrolado por múltiplas espiras, fornecendo boa sensibilidade e consideráveis características de acoplamento em uma ampla faixa de frequência. Dependendo do material do núcleo e da configuração do enrolamento, a largura de banda de operação pode se estender de centenas de quilohertz até dezenas de MHz [84, 86].

Uma das principais vantagens dos sensores HFCT é a boa sensibilidade quando o sensor está próximo dos sinais de DPs, devido ao emprego de materiais magnéticos macios no núcleo do transformador, tornando-os adequados para aplicações de monitoramento *on-line*. Além disso, a instalação não invasiva e a construção relativamente simples contribuem para sua ampla utilização em ambientes industriais e de pesquisa [6].

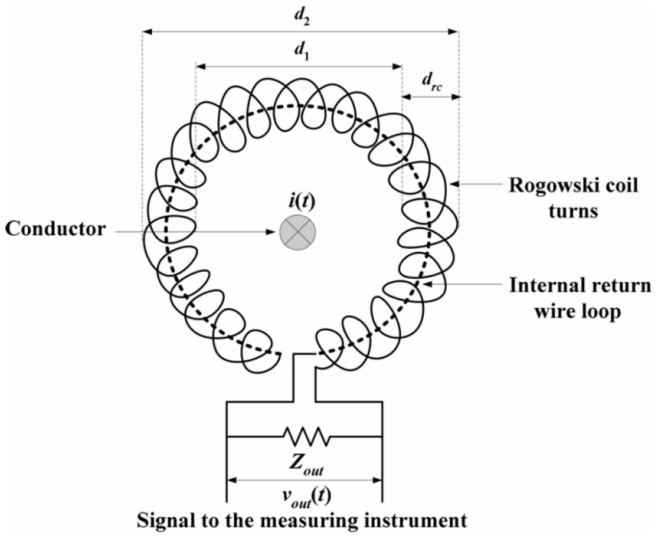
Entretanto, a resposta do sensor pode ser afetada pela saturação do núcleo, interferências eletromagnéticas externas e capacitâncias parasitas associadas à estrutura do enrolamento. Dessa forma, procedimentos adequados de projeto envolvendo a seleção do núcleo, casamento de impedância e técnicas de blindagem são necessários para melhorar o desempenho do sensor [6].

Um estudo recente [78] explorou sensores HFCT para aplicações de análise em banda larga de DPs e reconhecimento de padrões, principalmente em conjunto com técnicas de processamento digital de sinais e algoritmos de aprendizado de máquina.

2.9.3 Bobina de Rogowski

A bobina de Rogowski, como ilustrado na Figura 13, é um sensor indutivo sem núcleo magnético amplamente utilizado na medição de correntes transitórias e de alta frequência associadas às DPs [88]. Diferentemente dos transformadores de corrente convencionais, a RC não emprega núcleo ferromagnético, eliminando efeitos de saturação e melhorando a linearidade em ampla faixa dinâmica [89, 90].

Figura 13 — Geometria e construção do sensor RC



Fonte: [90].

O sensor consiste em uma bobina uniformemente enrolada ao redor do condutor monitorado. De acordo com a Lei de Faraday, a tensão induzida na bobina é proporcional à taxa de variação da corrente que percorre o condutor. Assim, o sinal de saída da RC é proporcional a di/dt, exigindo circuitos integradores ou pós-processamento digital para reconstrução da forma de onda da corrente original [88].

Devido à ausência de núcleo magnético, as bobinas de Rogowski apresentam operação em largura de banda ampla, baixa impedância de inserção e excelente resposta transitória. Essas características tornam a RC particularmente adequada para detectar pulsos rápidos de DPs com elevado conteúdo espectral em alta frequência [91].

Outra característica importante da RC é a flexibilidade em sua configuração geométrica, permitindo o desenvolvimento de sensores em diferentes formatos e dimensões de acordo com os requisitos da aplicação. Além disso, a estrutura sem núcleo reduz efeitos de histerese e não linearidades, comumente observados em sensores com núcleo magnético [92].

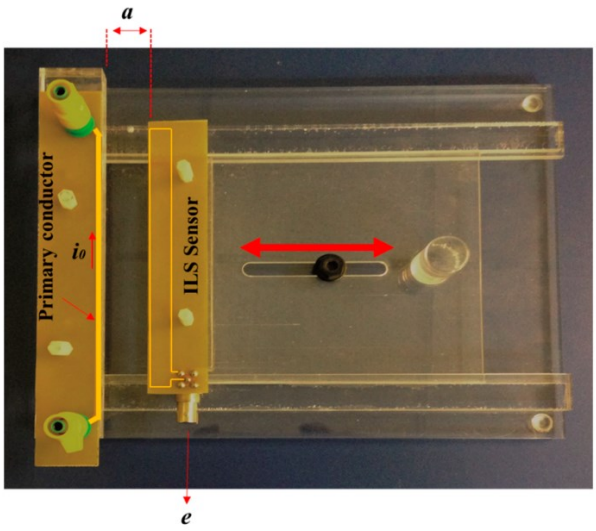
Apesar dessas vantagens, as bobinas de Rogowski geralmente apresentam menor sensibilidade em comparação aos sensores HFCT, principalmente para eventos de DPs de baixa corrente. O desempenho do sensor também pode ser influenciado por interferências eletromagnéticas externas e erros de posicionamento durante a instalação [93].

Pesquisas recentes [92,94-97], têm se concentrado no aumento da sensibilidade das RCs por meio de técnicas otimizadas de enrolamento, circuitos avançados de condicionamento de sinais e estruturas híbridas capazes de detectar sinais por acoplamento indutivo e radiativo.

2.9.4 Sensor de Laço Indutivo

O Sensor de Laço Indutivo, como representado na Figura 14 consiste em uma estrutura plana ou em forma de laço projetada para detectar transitórios eletromagnéticos gerados por DPs. O sensor opera por meio do acoplamento magnético entre o campo eletromagnético produzido pelo pulso de corrente da DPs e a estrutura condutora do laço [98].

Figura 14 — Sensor ILS



Fonte: [100].

Diferentemente dos sensores HFCT convencionais, o ILS pode operar sem acoplamento elétrico direto ao condutor de aterramento, possibilitando detectar sem contato em diferentes cenários de monitoramento. Essa característica permite maior flexibilidade de instalação e simplificação do sistema de medição [38].

A largura de banda de operação dos sensores ILS depende fortemente de suas dimensões geométricas, largura do condutor, área do laço e condições de casamento de impedância. Em geral, dimensões menores favorecem frequências de ressonância mais elevadas e maior largura de banda operacional [99].

Uma das principais vantagens do ILS é a relativa simplicidade construtiva e o baixo custo de fabricação. Além disso, o sensor pode apresentar simultaneamente características associadas a sensores indutivos e antenas de laço, principalmente em frequências mais elevadas, nas quais o acoplamento eletromagnético radiativo torna-se mais significativo [98].

Devido a esse comportamento híbrido, estruturas ILS têm despertado interesse em estudos recentes envolvendo sistemas de monitoramento de DPs em HF e UHF. A capacidade de detectar simultaneamente componentes conduzidas e radiadas das DPs pode contribuir para aumento da sensibilidade em ambientes eletromagneticamente ruidosos [100].

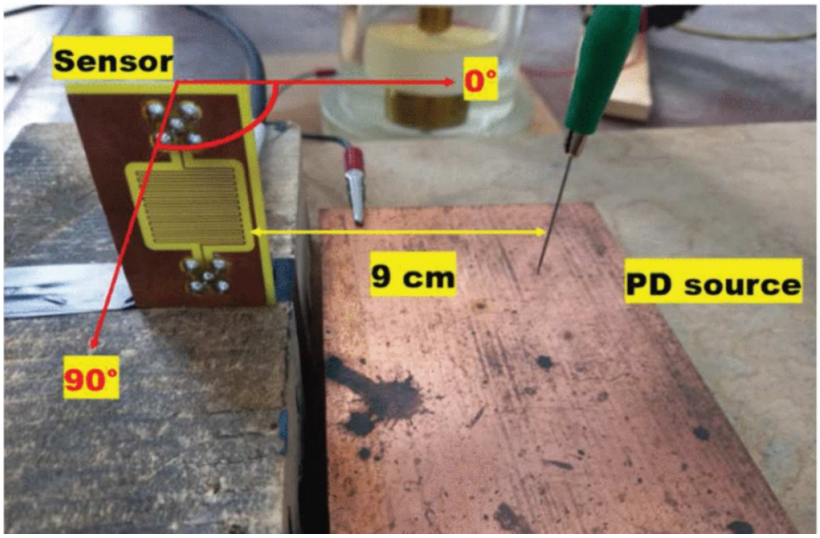
Entretanto, fatores como interferências externas, orientação do sensor e efeitos ressonantes podem influenciar significativamente a resposta do dispositivo. Dessa forma, modelagem eletromagnética e caracterização experimental tornam-se fundamentais para otimização do projeto e garantia de desempenho adequado para detectar DPs [98].

2.9.5 Antenas de Laço

As antenas de laço são amplamente empregadas em aplicações de sensoriamento eletromagnético devido à capacidade de detectar campos magnéticos variantes no tempo em amplas faixas de frequência. Em sistemas de monitoramento de DPs, essas antenas são utilizadas para captar emissões eletromagnéticas radiadas geradas pelos rápidos eventos de descarga [87].

A estrutura básica de uma antena de laço, como mostrado na Figura 15, consiste em uma ou mais espiras condutoras formando um caminho fechado no qual forças eletromotrizes são induzidas pela incidência de ondas eletromagnéticas. Dependendo de suas dimensões em relação ao comprimento de onda, as antenas podem operar em configurações eletricamente pequenas ou ressonantes [101, 102].

Figura 15 — Sensor antena laço



Fonte: [102].

Antenas de pequeno laço apresentam maior sensibilidade à componente magnética do campo eletromagnético, sendo frequentemente modeladas como dipolos magnéticos. Essa característica torna esses dispositivos particularmente úteis para detectar campo próximo de sinais de DPs, especialmente em ambientes nos quais a interferência do campo elétrico deve ser minimizada [103, 104].

A resposta em frequência das antenas de laço é influenciada por diversos parâmetros, incluindo geometria do laço, diâmetro do condutor, número de espiras e condições de casamento de impedância. Além disso, capacitâncias parasitas e efeitos indutivos podem introduzir ressonâncias que modificam a largura de banda e a sensibilidade da antena [101, 105].

Em aplicações de detecção de DPs, antenas de laço operando nas faixas de HF, VHF e UHF têm demonstrado bom desempenho na identificação de emissões irradiadas provenientes de transformadores, subestações isoladas a gás e sistemas de cabos. A operação não invasiva e a compatibilidade com técnicas de monitoramento *on-line* constituem importantes vantagens para implementação industrial [40, 106].

Estudos recentes [107, 108] têm investigado estruturas híbridas combinando características de sensores indutivos e antenas de laço para aumentar a sensibilidade e a largura de banda para detectar DPs. Tais abordagens são particularmente relevantes para sistemas de monitoramento de DPs em banda larga, nos quais tanto os componentes conduzidos quanto os irradiados das emissões eletromagnéticas contêm informações importantes para diagnóstico.

O sensor desenvolvido neste trabalho apresenta características associadas tanto a sensores de laço indutivo quanto a antenas de laço, principalmente devido à sua configuração geométrica e ao comportamento em frequência observado experimentalmente. Dessa forma, a compreensão de ambos os mecanismos de sensoriamento torna-se essencial para análise e interpretação dos sinais de DPs medidos.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa caracteriza-se como uma investigação aplicada de caráter experimental, voltada ao desenvolvimento e à caracterização de dois tipos de sensores, de custo significativamente reduzido em relação às alternativas comerciais, destinados a detectar DPs em cabos isolados de média e alta tensão. Para isso, o percurso metodológico baseia-se em uma análise comparativa entre soluções comerciais adotadas como referência (padrão ouro) e topologias descritas na literatura técnica recente. Nesse contexto, os sensores desenvolvidos foram concebidos por meio de uma abordagem de prototipagem experimental, orientada pelo estado da arte e por diretrizes consolidadas da área, em substituição a um dimensionamento estritamente analítico, sendo posteriormente caracterizados experimentalmente e comparados às soluções de referência.

O processo de otimização dos sensores desenvolvidos ocorreu de forma empírica e iterativa, por meio da modificação sistemática de variáveis físicas e estruturais, com validação direta em ensaios laboratoriais conduzidos em condições controladas, buscando atingir a sensibilidade necessária para detectar sinais de alta frequência característicos das DPs. Adicionalmente, a utilização de materiais comercialmente acessíveis e de técnicas de fabricação por impressão 3D confere à proposta potencial de custo significativamente reduzido em relação às alternativas comerciais e favorece sua reprodutibilidade em contextos acadêmicos e laboratoriais.

Conforme estabelecido no Capítulo 1, para fins de identificação das arquiteturas propostas nesta dissertação, o sensor baseado em laço indutivo é denominado *Helicoidal Antenna Sensor* (HAS). Embora sua concepção tenha sido baseada nos princípios do ILS e *Flexible Magnetic Coupler* (FMC), sua configuração difere das arquiteturas convencionalmente descritas na literatura, sendo constituída por uma estrutura com múltiplas espiras igualmente espaçadas, em que apenas uma extremidade da bobina é conectada eletricamente, permanecendo a outra em circuito aberto [38,109]. Em razão dessas particularidades construtivas, essa nomenclatura foi adotada para identificar essa arquitetura ao longo desta dissertação.

De forma análoga, o sensor baseado em transformador de corrente é denominado HFCT *Relative Signature Sensor* (HRSS), nomenclatura adotada nesta dissertação para destacar sua aplicação na identificação e comparação de assinaturas de DPs, distinguindo-o de transformadores de corrente de alta frequência convencionais [84].

3.1 Helicoidal Antenna Sensor (HAS)

A Figura 16 apresenta o sensor comercial Techimp FMC (Techimp - Altanova Group, Itália), amplamente utilizado na detecção de DPs em cabos isolados de média e alta tensão. Seu funcionamento baseia-se no acoplamento ao campo magnético associado aos transitórios de alta frequência gerados pelas DPs. Sua estrutura flexível permite a adaptação à superfície externa do cabo e facilita sua instalação em campo, sem a necessidade de intervenções na blindagem metálica ou na infraestrutura elétrica existente. Essa característica possibilita seu posicionamento em diferentes regiões do cabo, especialmente nas proximidades das terminações, onde o monitoramento de DPs é frequentemente realizado [102,109].

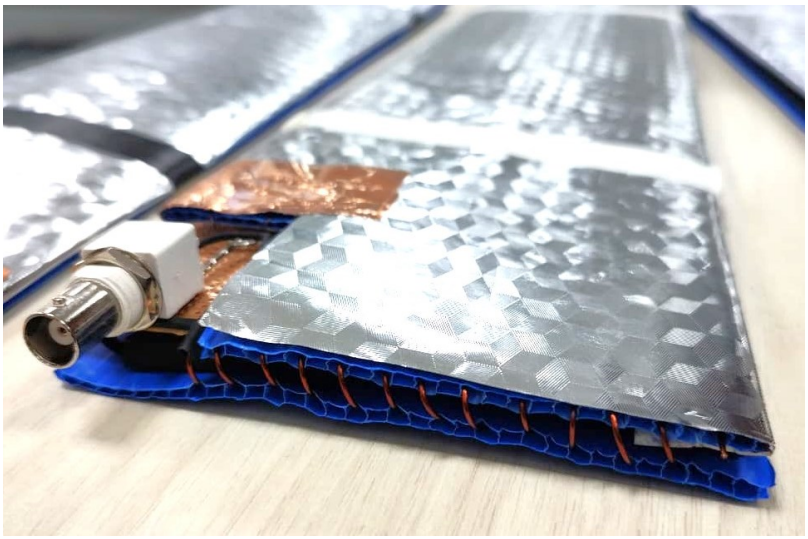
Figura 16 — Sensor comercial FMC, utilizado para a detecção de DPs em cabos isolados.



Fonte: O autor.

Embora os sensores FMC apresentem desempenho consolidado para detectar DPs, seu custo e sua disponibilidade podem limitar sua utilização em atividades de pesquisa e desenvolvimento. Nesse contexto, o sensor HAS foi desenvolvido com base nos princípios de funcionamento dos sensores do tipo ILS e em dispositivos comerciais como o FMC [38,98,102-104,109]. Entretanto, devido à sua geometria construtiva e à disposição dos elementos internos, o sensor apresenta características híbridas de acoplamento indutivo e capacitivo. A Figura 17 apresenta a arquitetura desenvolvida nesta pesquisa.

Figura 17 — Protótipo do sensor HAS desenvolvido nesta pesquisa.



Fonte: O autor.

Nessa arquitetura, a bobina helicoidal funciona simultaneamente como elemento indutivo e como estrutura sensível ao campo elétrico. A proximidade entre o enrolamento e o plano de aterramento, separados por um material dielétrico, produz uma componente capacitiva significativa, contribuindo para o aumento da sensibilidade do sensor às variações rápidas de potencial elétrico e aos campos elétricos associados às DPs.

Além disso, em razão das dimensões do elemento sensor em relação ao comprimento de onda dos sinais associados às DPs, a arquitetura proposta apresenta comportamento ressonante, tornando-se mais sensível em uma determinada faixa de frequência.

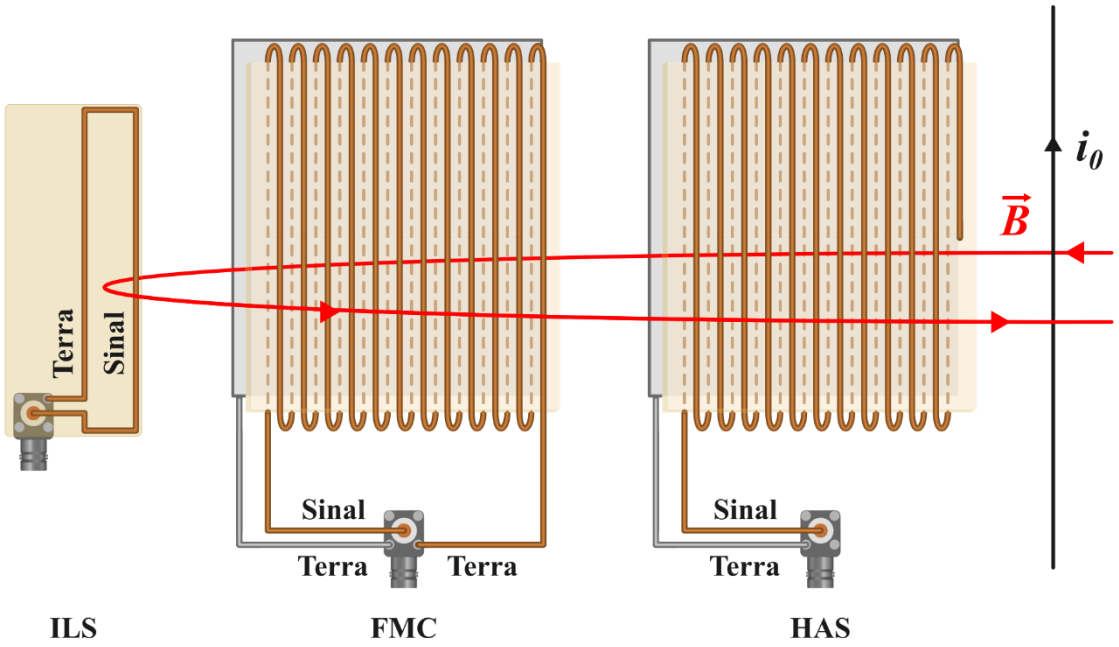
3.1.1 Parametrização do sensor HAS

A definição dos parâmetros construtivos do sensor HAS foi orientada pelo comportamento espectral típico das DPs em cabos isolados de média e alta tensão, e pelas características eletromagnéticas da arquitetura proposta. Como os sinais de DPs detectados por sensores indutivos concentram parte significativa de sua energia na faixa de HF, compreendida entre 3 e 30 MHz [10], definiu-se como premissa metodológica deste projeto a frequência de 3 MHz como ponto de partida referencial para o desenvolvimento do sensor. Como consequência dessa premissa, as dimensões do elemento ressonante passivo foram inicialmente definidas com base nessa frequência referencial, com o propósito de concentrar sua máxima sensibilidade na faixa de interesse dos sinais.

A frequência de projeto de 3 MHz corresponde a um comprimento de onda de aproximadamente 100 m. Desse modo, adotou-se um comprimento efetivo de aproximadamente 12,5 m para o elemento ressonante passivo, o que equivale a um dimensionamento de $\lambda/8$. Essa dimensão fundamenta-se nos critérios de estruturas eletricamente pequenas operando por acoplamento magnético puro [110]. Tal configuração visa otimizar a resposta do sensor na faixa de HF, favorecendo a captura de transitórios rápidos associados às DPs e, simultaneamente, reduzindo a suscetibilidade a interferências provenientes de sinais de menor frequência.

Diferentemente dos sensores ILS e FMC convencionais, nos quais ambas as extremidades do enrolamento permanecem eletricamente conectadas, o HAS foi concebido com apenas uma extremidade da bobina conectada, mantendo a outra em circuito aberto. Essa configuração confere ao elemento sensor características equivalentes às de uma antena linear ressonante, constituindo um dos principais aspectos que distinguem a arquitetura proposta das soluções tradicionalmente empregadas para detectar DPs. A comparação entre os princípios de funcionamento dos sensores ILS, FMC e HAS é apresentada na Figura 18.

Figura 18 — Dispositivos ILS, FMC e HAS, e seus princípios de funcionamento.

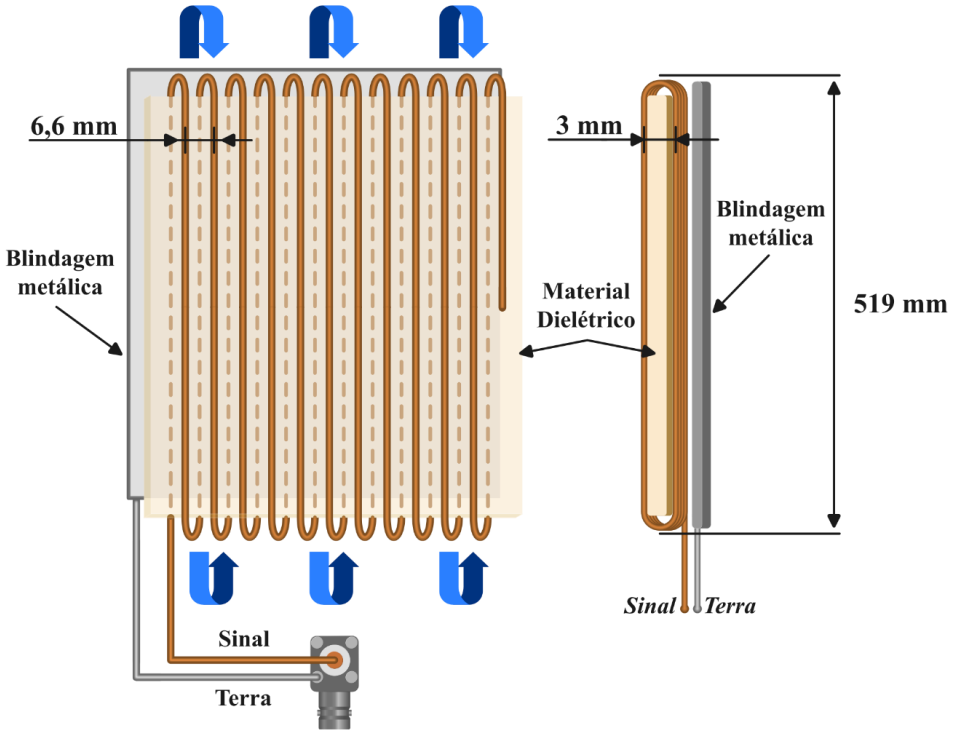


Fonte: O autor.

Definido o comprimento efetivo do elemento ressonante passivo, estabeleceu-se a geometria do enrolamento helicoidal adotada no sensor. Como restrição geométrica construtiva imposta pelo espaçamento interno do material de suporte utilizado, adotou-se, por convenção

de projeto, um espaçamento uniforme de 6,6 mm entre as espiras em todas as configurações avaliadas. A bobina apresenta geometria retangular, com dimensões de 3 mm de largura e 519 mm de altura, resultando em um perímetro de 1044 mm por espira. O enrolamento foi realizado no sentido anti-horário, mantendo-se essa configuração em todas as amostras desenvolvidas. As dimensões físicas do elemento ressonante passivo são apresentadas na Figura 19.

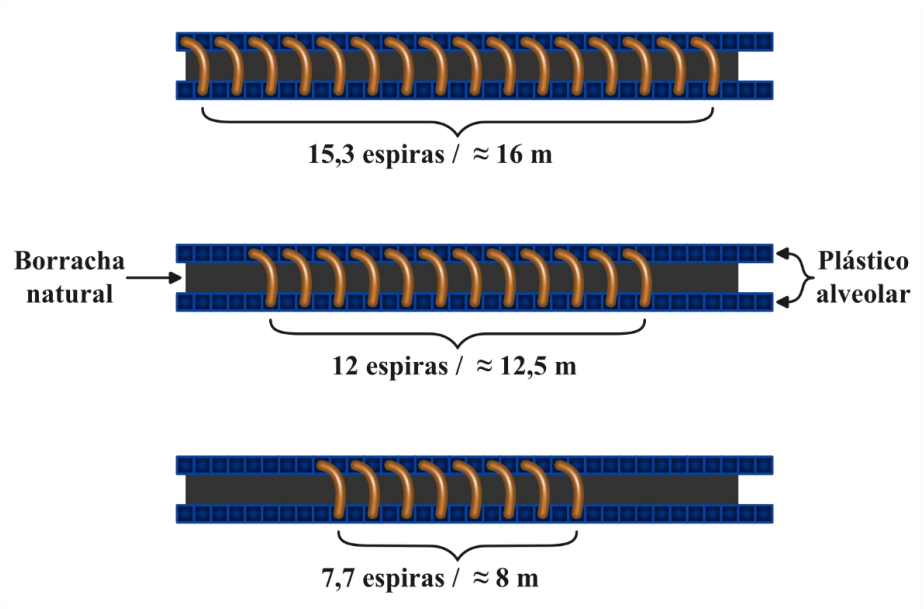
Figura 19 — Dimensões físicas do elemento ressonante passivo do sensor HAS.



Fonte: O autor.

Com o objetivo de investigar experimentalmente a influência da sintonia do elemento ressonante sobre o desempenho do sensor, também foram desenvolvidas configurações com comprimentos efetivos equivalentes a 8 m e 16 m, além da configuração de referência de aproximadamente 12,5 m. Essas variações permitiram avaliar a influência do comprimento elétrico sobre a resposta em frequência do dispositivo e identificar a condição de maior sensibilidade para a aplicação proposta. Adicionalmente, foram empregados três diâmetros distintos de condutores no enrolamento da bobina, buscando analisar a influência desse parâmetro na resposta espectral e na sensibilidade do sensor. As configurações avaliadas experimentalmente são apresentadas na Figura 20.

Figura 20 — Configurações de montagem do sensor HAR.



Fonte: O autor.

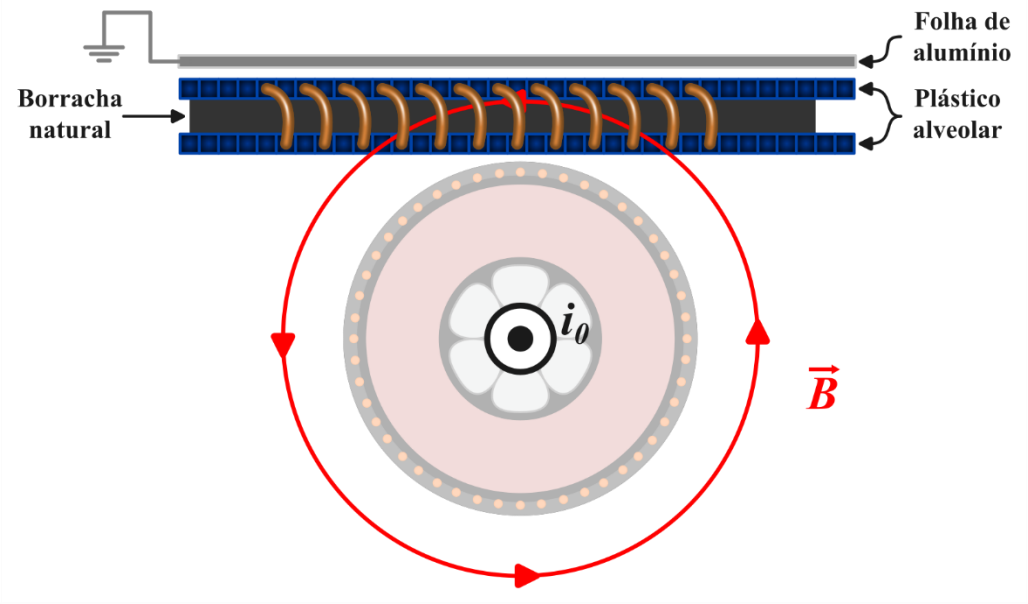
Os parâmetros analisados nesta Seção estabelecem a base de operação do sensor HAS, incluindo a definição da frequência de projeto, a escolha da geometria do enrolamento e a análise do comportamento ressonante do sistema. Esses elementos são fundamentais para o desempenho eletromagnético do sensor para detectar DPs.

3.1.2 Aspectos Estruturais do sensor HAS

Esta Seção descreve os principais aspectos construtivos do sensor HAS, incluindo os materiais empregados, a arquitetura multicamadas adotada, os elementos de conexão elétrica e os componentes auxiliares utilizados durante os ensaios experimentais.

A configuração construtiva do sensor incorpora uma camada metálica contínua em sua superfície externa, mantendo exposta apenas a face voltada diretamente para o cabo sob monitoramento, conforme apresentado na Figura 21. Essa camada atua como blindagem eletromagnética parcial, reduzindo a influência de interferências externas durante a aquisição dos sinais. Além disso, a separação física entre o plano de aterramento e o elemento ressonante passivo estabelece uma região de confinamento parcial do campo eletromagnético, contribuindo para aumentar a diretividade do sensor e melhorar sua seletividade espacial durante as medições.

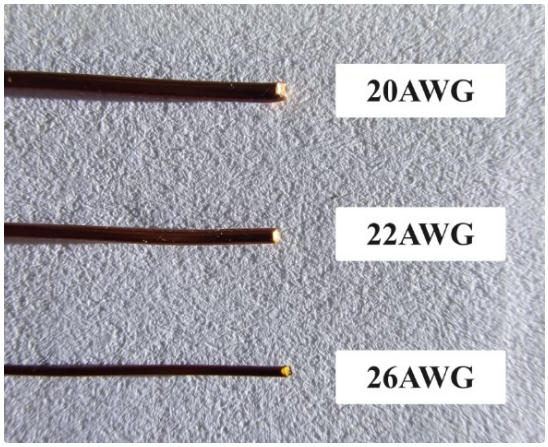
Figura 21 — Detalhes construtivos do sensor HAS e sua instalação em cabo de média tensão.



Fonte: O autor.

Na construção do sensor HAS, podem ser empregados fios de cobre esmaltado de diferentes bitolas como 20 AWG, 22AWG e 26 AWG, conforme ilustrado na Figura 22. Neste trabalho, foram testados protótipos distintos, cada um confeccionado com fio de cobre esmaltado de uma única bitola (20 AWG, 22 AWG ou 26 AWG), com o objetivo de avaliar experimentalmente a influência do diâmetro do condutor no desempenho eletromagnético do dispositivo. Os resultados dessa comparação são apresentados na Seção 4.1.2.

Figura 22 — Comparativo de diâmetros de fio de cobre esmaltado em AWG.



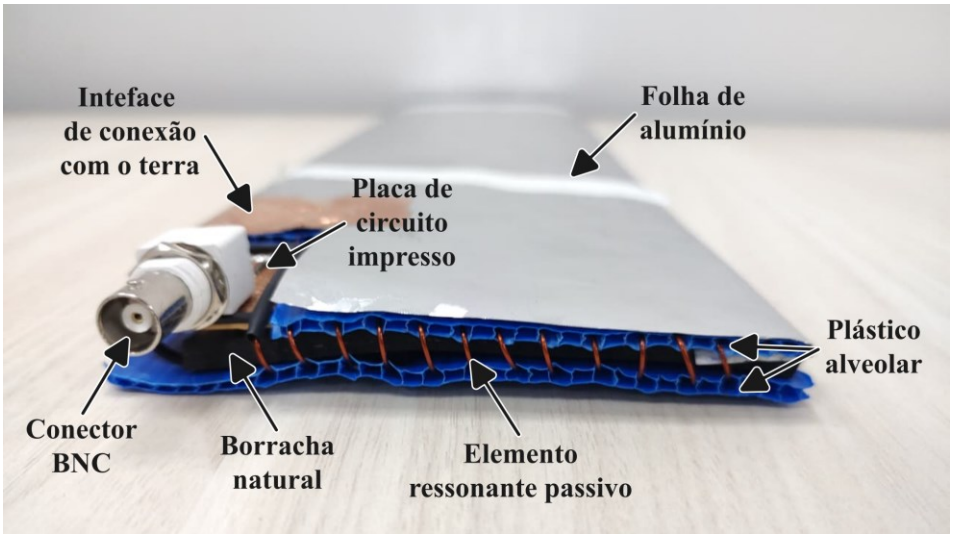
Fonte: O autor.

O sensor foi desenvolvido utilizando uma arquitetura multicamadas como ilustrado na Figura 23. A primeira camada é composta por uma folha lisa de alumínio com espessura de 0,8

mm, posicionada na superfície superior do sensor, responsável pela formação do plano de aterramento e pela blindagem eletromagnética parcial do dispositivo. Para realizar a conexão elétrica desse plano metálico ao aterramento do sensor, foram empregadas fitas adesivas de cobre com espessura de 0,5 mm, facilitando o contato elétrico e simplificando o processo construtivo. A segunda e a quarta camadas estruturais são compostas por placa de plástico alveolar, responsáveis pelo espaçamento estrutural do sensor, enquanto a terceira camada é constituída por borracha natural, utilizada para conferir sustentação e flexibilidade mecânica além de a melhor acomodação do sensor sobre o cabo monitorado.

A conexão elétrica do sensor foi implementada utilizando conector do tipo BNC com impedância característica de $50\,\Omega$, soldado diretamente a uma placa de circuito impresso (*printed circuit board*, PCB). A PCB foi empregada com a finalidade de fornecer suporte mecânico e elétrico às conexões do sensor, garantindo maior robustez estrutural e repetibilidade durante os ensaios experimentais. Mais informações relacionadas a dimensões construtivas do sensor são apresentadas no Apêndice A.

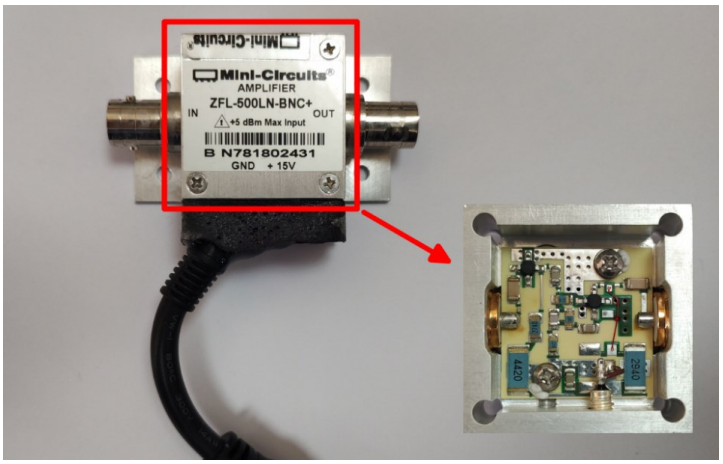
Figura 23 — Identificação dos componentes do sensor HAS.



Fonte: O autor.

Adicionalmente, visando melhorar a aquisição dos sinais provenientes do sensor, utilizou-se um amplificador de baixo ruído (*Low Noise Amplifier*, LNA) modelo ZFL-500LN-BNC+ (Mini-Circuits, EUA), conforme ilustrado na Figura 24. O LNA tem como principal função amplificar sinais de baixa amplitude provenientes da antena sem introduzir níveis significativos de ruído adicional ao sistema de medição.

Figura 24 — Amplificador LNA utilizado com o sensor HAS.



Fonte: O autor.

A escolha deste dispositivo fundamentou-se em sua resposta em frequência de banda larga (operando tipicamente de 0,1 MHz a 500 MHz) e na estabilidade de seus parâmetros na faixa de interesse do projeto, estabelecida abaixo de 100 MHz. No arranjo experimental adotado, o LNA foi polarizado por uma fonte de tensão contínua de 15 V, configuração que otimiza o compromisso entre ganho e diretividade. Suas principais características elétricas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 — Propriedades do LNA.

Modelo		ZFL-500LN-BNC+
Alimentação		15V @ 60mA
Impedância de entrada		50 Ohms
Frequência (MHz)		0,1 a 500
Figura de ruído (dB)		2,9
Ganho (dB)		24
VSWR	Entrada	1,5:1
	Saída	1,6:1

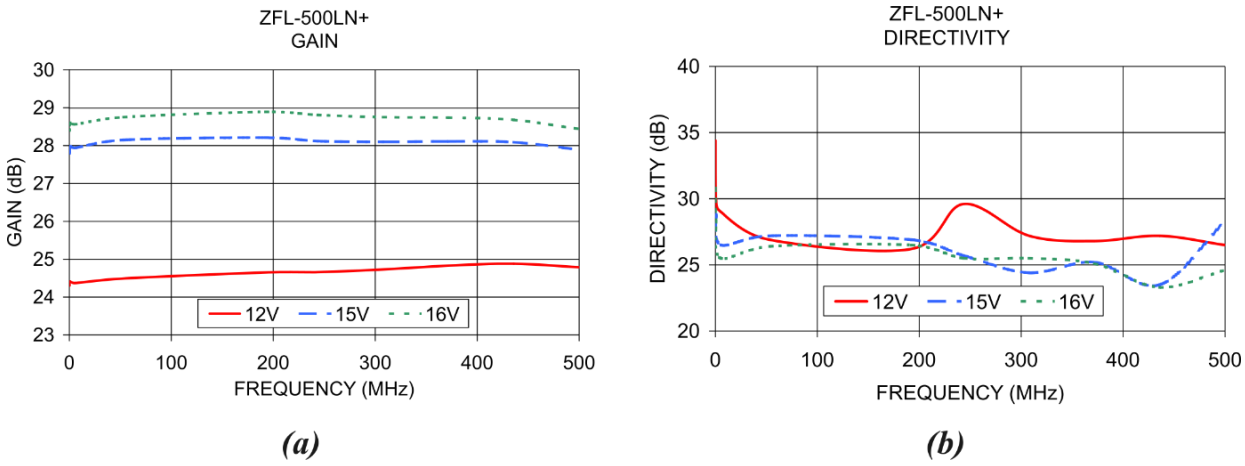
Fonte: [111].

A Figura 25 apresenta as curvas de desempenho do componente referentes ao ganho de potência (a) e à diretividade (b) sob diferentes tensões de operação (12 V, 15 V e 16 V). A análise do comportamento do dispositivo na faixa operacional adotada, compreendida entre 0 e 100 MHz sob alimentação de 15 V, permite observar que, conforme ilustrado na Figura 25(a), a curva correspondente a 15 V (linha tracejada azul) apresenta ganho elevado, linear e praticamente constante, mantendo-se em aproximadamente 28 dB ao longo de toda a faixa

analisada. Essa estabilidade garante que o sinal de RF proveniente da antena seja amplificado de forma homogênea, sem a introdução de distorções lineares ou atenuações seletivas em frequência.

Na Figura 25(b), observa-se que, para a tensão de alimentação de 15 V e frequências inferiores a 100 MHz, a diretividade do dispositivo se estabiliza em aproximadamente 27 dB. Esse parâmetro desempenha papel fundamental no isolamento entre os estágios do sistema, assegurando que o sinal se propague predominantemente em um único sentido. Dessa forma, evita-se que ruídos ou reflexões provenientes das etapas subsequentes do circuito retornem à antena, contribuindo para a proteção do sistema receptor e para a manutenção da qualidade do sinal recebido.

Figura 25 — Curvas de ganho (a) e diretividade (b) do componente em função da frequência e da tensão de alimentação.



Fonte: [111].

3.2 HFCT Relative Signature Sensor (HRSS)

Os sensores do tipo HFCT são amplamente utilizados na detecção de DPs em cabos isolados de média e alta tensão. Seu princípio de funcionamento baseia-se na indução eletromagnética produzida pelas correntes impulsivas de alta frequência associadas às DPs, que induzem um fluxo magnético variável no núcleo do sensor e produzem uma tensão no enrolamento secundário. Em razão de sua boa sensibilidade, ampla resposta em frequência e instalação não invasiva, esses sensores são vastamente empregados em sistemas de monitoramento e diagnóstico de ativos elétricos [86]. A Figura 26 apresenta um sensor HFCT comercial utilizado para essa finalidade.

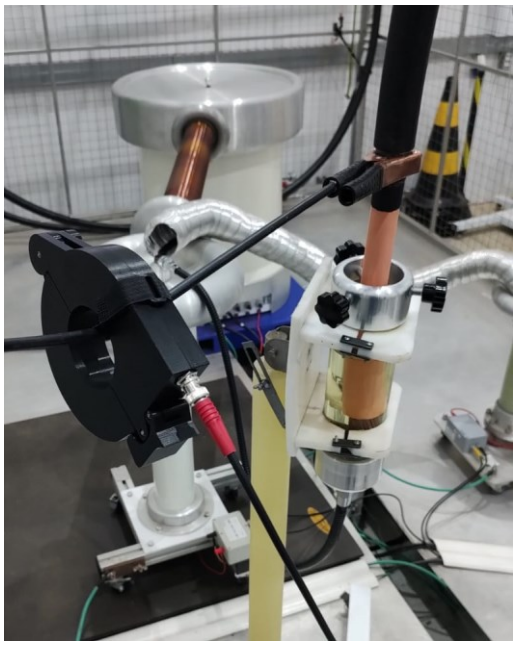
Figura 26 — Sensor HFCT comercial utilizado para a detecção de DPs em cabos isolados.



Fonte: O autor.

Embora os sensores HFCT comerciais apresentem desempenho consolidado para detectar DPs, fatores como custo, geometria construtiva e flexibilidade para adaptações experimentais podem limitar sua utilização em atividades de pesquisa e desenvolvimento. Nesse contexto, o sensor HRSS foi desenvolvido com base nos princípios de funcionamento dos sensores HFCT convencionais, incorporando uma configuração construtiva própria, concebida para favorecer a repetibilidade do processo de fabricação e a facilidade de instalação. A Figura 27 apresenta o sensor desenvolvido nesta pesquisa.

Figura 27 — Protótipo do sensor HRSS desenvolvido nesta pesquisa.



Fonte: O autor.

O sensor desenvolvido nesta pesquisa possui configuração do tipo *clamp-on*, permitindo sua abertura em duas partes para instalação direta sobre cabos isolados de média e alta tensão ou suas bainhas de aterramento, sem a necessidade de desconexão do sistema monitorado. Além disso, a fabricação do encapsulamento por meio de técnicas de manufatura aditiva proporcionou maior controle dimensional da geometria do dispositivo, favorecendo sua reprodutibilidade e reduzindo os custos de prototipagem.

O funcionamento do HRSS baseia-se no mesmo princípio de indução eletromagnética empregado pelos sensores HFCT convencionais. As correntes impulsivas associadas às DPs induzem um fluxo magnético variável no núcleo de ferrite, produzindo uma tensão no enrolamento secundário proporcional à taxa de variação da corrente que percorre o condutor monitorado [84].

3.2.1 Parametrização do sensor HRSS

A definição dos parâmetros eletromagnéticos do sensor HRSS foi estabelecida com base em recomendações da literatura para sensores do tipo HFCT e nos requisitos da aplicação voltada à detecção de DPs em cabos isolados de média e alta tensão [84,86,112]. Dentre os parâmetros eletromagnéticos adotados no projeto, a seleção do material do núcleo magnético desempenha papel fundamental no desempenho do sensor, por influenciar diretamente o acoplamento magnético e sua resposta em frequência.

Em razão dessa influência, a escolha do material do núcleo magnético constitui uma das principais etapas do projeto de sensores HFCT. Em aplicações de alta frequência, ferrites à base de Níquel-Zinco (NiZn) e Níquel-Magnésio (NiMg) são amplamente empregados na fabricação de núcleos para sensores HFCT. Entretanto, estudos da literatura indicam que ferrites de NiZn apresentam maior sensibilidade para detectar transitórios de alta frequência associados às DPs, o que motivou sua utilização neste trabalho [86]. Assim, foi selecionado um núcleo de ferrite comercial constituído pelo material FN120 (Huzhou Careful Magnetism, China).

As principais propriedades físicas e magnéticas do material FN120 são apresentadas na Tabela 2. Dentre elas, destaca-se a boa permeabilidade inicial ($\mu_i = 1200 \pm 20\%$), que pode favorecer o acoplamento magnético entre o condutor monitorado e o enrolamento secundário, contribuindo para melhorar a sensibilidade do sensor. Outro parâmetro relevante é a alta resistividade elétrica intrínseca do material ($\rho = 105\ \Omega m$), responsável por minimizar as perdas associadas às correntes parasitas (correntes de Eddy) no núcleo durante a operação em

altas frequências. Além disso, a temperatura de Curie superior a 160 °C pode assegurar a estabilidade das propriedades magnéticas do núcleo mesmo sob eventuais elevações de temperatura durante a operação do sensor.

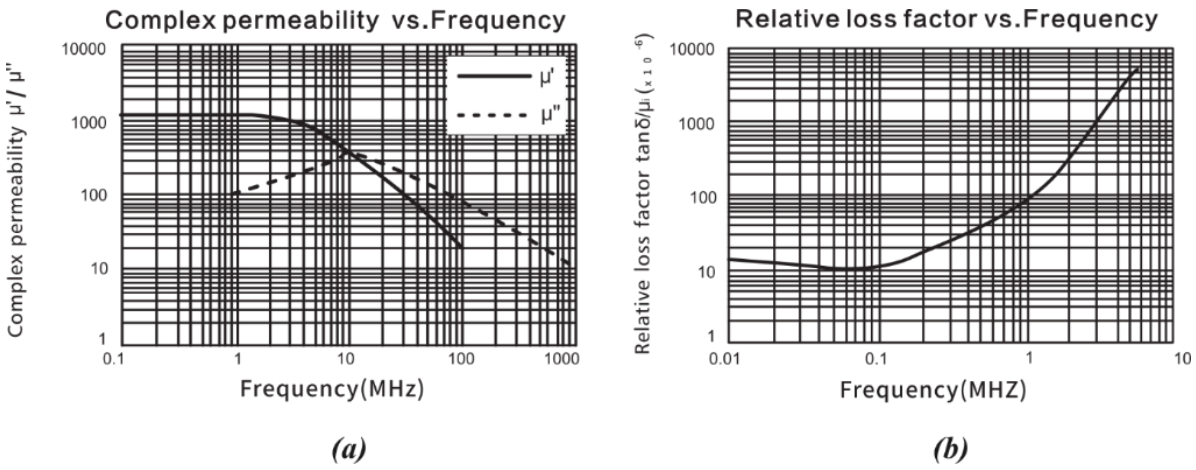
Tabela 2 — Propriedades do núcleo de ferrite.

Material	FN120	Unidade e símbolos
Permeabilidade inicial	$1200 \pm 20\%$	μ_i
Fator de perda relativa	18×10^{-6}	$Tan\delta/\mu_i$
Coeficiente de temperatura relativo	$13 \times 10^{-6}/°C$	$\alpha_{\mu r}$
Densidade de fluxo magnético de saturação	360 (a 1,6 KA/m)	B_s (mT)
Temperatura de Curie	> 160	Tc $(°C)$
Resistividade elétrica	105	$\rho(\Omega \cdot m)$
densidade	5.1	$d(g/cm^3)$

Fonte: [113].

A caracterização magnética do material FN120 em função da frequência é apresentada na Figura 28. A Figura 28(a) mostra o comportamento da permeabilidade complexa do material, em que a componente real (μ') está associada ao comportamento indutivo do núcleo, enquanto a componente imaginária (μ'') representa suas perdas magnéticas. Observa-se que a permeabilidade (μ') permanece praticamente constante até aproximadamente 1 MHz, mantendo valor próximo de 1200, e apresenta redução acentuada a partir da faixa de 10 MHz, acompanhada pelo aumento das perdas magnéticas (μ''). Complementarmente, a Figura 28(b) apresenta o fator de perda relativa do material ($Tan\delta/\mu_i$), evidenciando a transição entre o regime predominantemente indutivo e o aumento das perdas em frequências mais elevadas. Esse comportamento demonstra que o material mantém considerável estabilidade magnética na faixa de frequências de interesse para detectar DPs, favorecendo o desempenho do sensor HRSS.

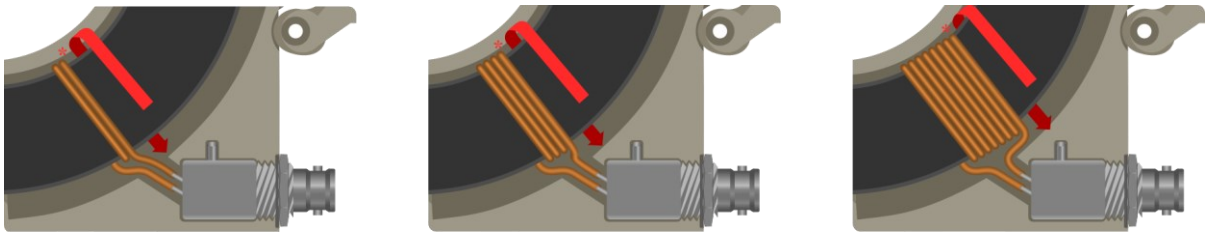
Figura 28 — Permeabilidade complexa (a) e fator de perda relativa (b) em função da frequência para o material do núcleo de ferrite.



Fonte: [113].

Para o enrolamento secundário, foi utilizada bobina confeccionada com fio de cobre esmaltado 26 AWG. A escolha dessa bitola foi fundamentada em critérios elétricos e construtivos. De acordo com a literatura [86], o diâmetro do fio não exerce influência significativa sobre a sensibilidade ou a função de transferência de sensores HFCT. Embora o efeito pelicular (*skin effect*) provoque o aumento da resistência em corrente alternada nas altas frequências, a resistência da bobina permanece na ordem de $m\Omega$, sendo desprezível quando comparada à impedância de carga padrão de $50\,\Omega$ do sistema de medição. Além disso, a utilização de um fio de menor diâmetro facilita o enrolamento manual em torno do núcleo de ferrite, reduz a ocupação da janela do toróide, preservando seu raio interno livre, e proporciona rigidez mecânica suficiente para manter as espiras fixas e com espaçamento uniforme. Inicialmente, foi adotado o número mínimo de espiras $N = 2$. Em seguida, esse valor foi incrementado para $N = 4$ e $N = 8$, com o objetivo de avaliar experimentalmente a influência desse parâmetro no desempenho do sensor e identificar a configuração mais adequada para a aplicação proposta. A Figura 29 apresenta a disposição das espiras do enrolamento secundário no sensor HRSS, incluindo o sentido de enrolamento adotado. O enrolamento foi realizado no sentido horário e posicionado de forma a garantir uniformidade na distribuição espacial ao redor do núcleo de ferrite, contribuindo para a estabilidade do acoplamento eletromagnético e para a repetibilidade das medições entre diferentes configurações de espiras.

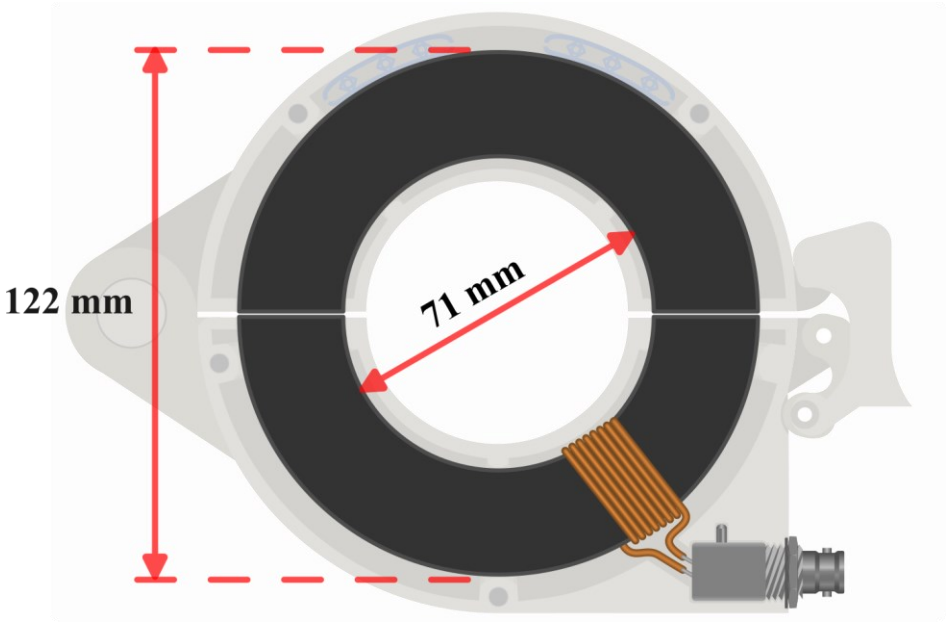
Figura 29 — Disposição das espiras do secundário no sensor HFCT.



Fonte: O autor.

As dimensões do núcleo de ferrite são apresentadas na Figura 30. A geometria foi definida de modo a atender aos requisitos de instalação em sistemas de cabos isolados de média e alta tensão, garantindo a aplicação do sensor em configuração *clamp-on* sem necessidade de desconexão do condutor monitorado. O núcleo apresenta diâmetro interno de 71 mm e diâmetro externo de 122 mm.

Figura 30 — Dimensões físicas (em mm) do núcleo do sensor HRSS.



Fonte: O autor.

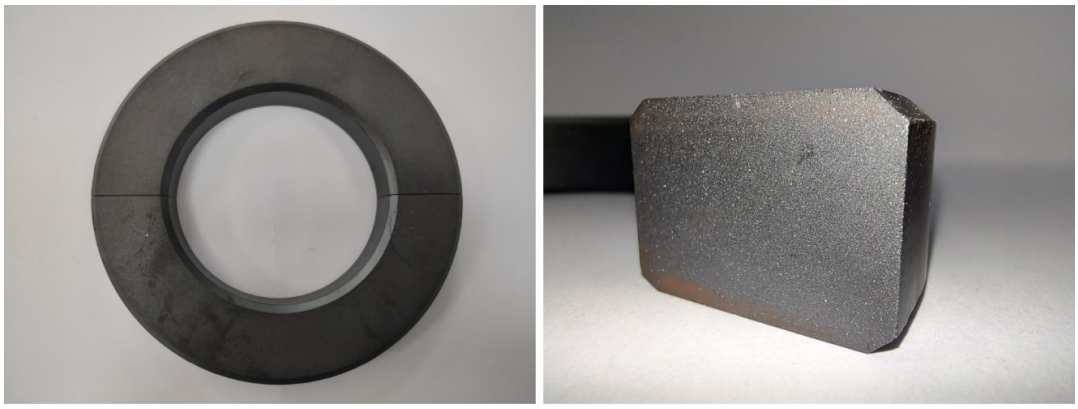
As análises apresentadas nesta Seção permitiram definir os principais parâmetros eletromagnéticos do sensor HRSS, incluindo a seleção do material do núcleo magnético, o dimensionamento do enrolamento secundário e a avaliação do comportamento magnético do ferrite em função da frequência. Esses parâmetros constituem a base para o desempenho eletromagnético do sensor para detectar DPs em cabos isolados de média e alta tensão.

3.2.2 Aspectos estruturais do sensor HRSS

Após a definição dos parâmetros eletromagnéticos apresentados na Seção 3.2.1, foi estabelecida a configuração construtiva do sensor HRSS, contemplando o desenvolvimento do encapsulamento, do sistema de abertura e fechamento, da interface elétrica e da integração mecânica do núcleo de ferrite. Os principais elementos estruturais do dispositivo são apresentados a seguir.

O núcleo magnético do sensor foi adotado em formato bipartido do tipo *C-core*, como apresentado na Figura 31(a), permitindo sua abertura e fechamento durante o processo de instalação. As superfícies de contato entre as duas metades do núcleo receberam acabamento do tipo *polished joint*, como ilustrado na Figura 31(b), no qual as faces são retificadas e polidas com considerável precisão dimensional, visando minimizar a relutância magnética na região de junção. Essa configuração reduz perdas na interface do núcleo e contribui para a melhoria da permeabilidade magnética efetiva do circuito, além de aumentar a repetibilidade das características do sensor durante sucessivos ciclos de abertura e fechamento.

Figura 31 — Núcleo de ferrite bipartido (a) e detalhe da superfície de contato polida (b).

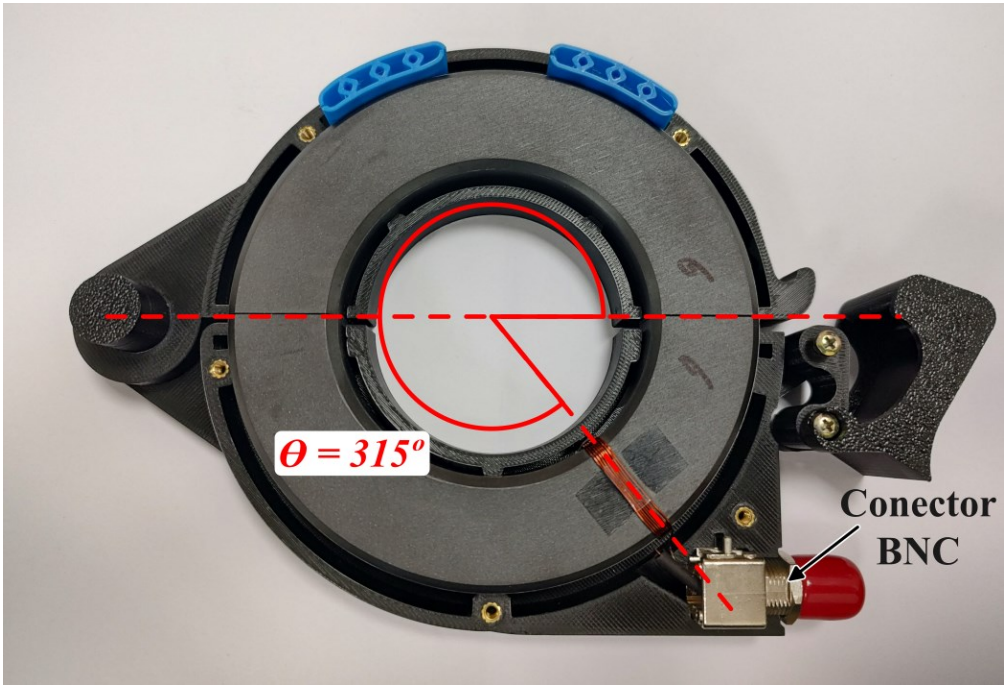


(a) **(b)**

Fonte: O autor.

O enrolamento secundário foi posicionado a 315° em relação ao eixo de referência do núcleo, conforme ilustrado na Figura 32, de modo a garantir padronização geométrica e repetibilidade na montagem do sensor. A interface elétrica foi implementada por meio de um conector do tipo BNC com impedância característica de $50\ \Omega$, assegurando compatibilidade com os sistemas de aquisição e instrumentação utilizados nos ensaios experimentais.

Figura 32 — Enrolamento do sensor HRSS posicionado a 315° no núcleo de ferrite.



Fonte: O autor.

O encapsulamento estrutural foi fabricado em copoliéster Tritan, um material de engenharia que combina boa resistência mecânica ao impacto e à fadiga com considerável estabilidade dimensional. Essas características tornam o material adequado para a estrutura rígida do sensor, além de contribuir para a repetibilidade do processo de montagem. As principais propriedades do copoliéster Tritan são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 — Propriedades do material copoliéster Tritan.

Material	Tritan	Unidade e símbolos
Temperatura de transição vítrea	120	$°C$
Resistência a tensão mecânica	43	MPa
Alongamento na ruptura	210	%
Módulo de flexão	1550	MPa
Dureza (R-Scale)	112	-
Resistência ao impacto IZOD (23ºC)	980	J/m

Fonte: [114].

Adicionalmente, componentes sujeitos a deformação mecânica controlada foram fabricados em TPU (*Thermoplastic Polyurethane*), material caracterizado por boa flexibilidade e elasticidade, permitindo sua utilização em elementos funcionais do sistema de abertura e

fechamento, bem como em regiões de contato que exigem acomodação de esforços mecânicos. Essas propriedades estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 — Propriedades do material TPU.

Material	SimpliFLEX TPU	Unidade e símbolos
Alongamento na ruptura	450	%
Densidade	1,22	g/cm^3

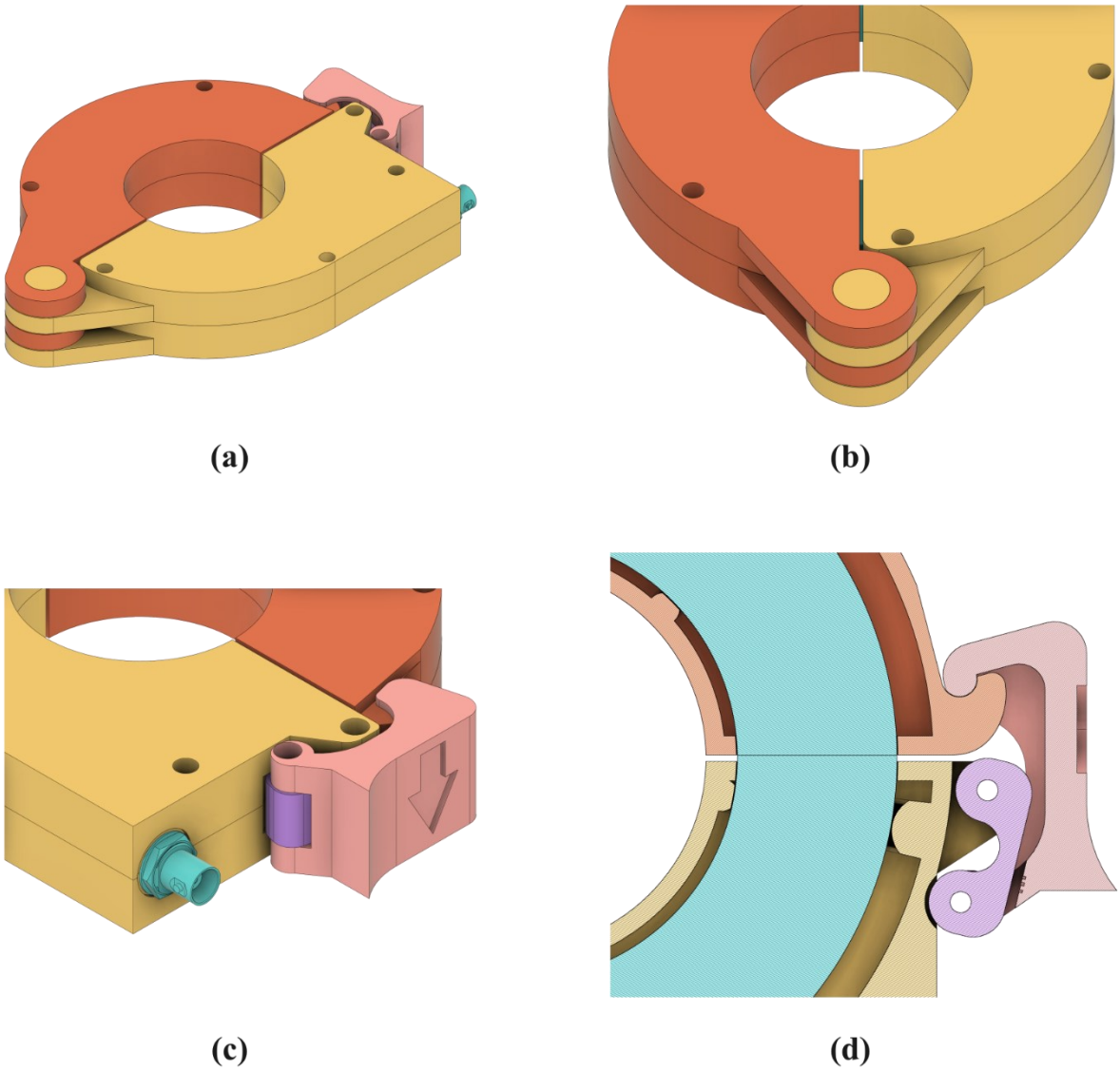
Fonte: [115].

O projeto mecânico do sensor foi concebido de forma a utilizar predominantemente componentes poliméricos, restringindo o uso de peças metálicas apenas aos elementos de fixação estrutural. O mecanismo de dobradiça, como ilustrado na Figura 33(a) e Figura 33(b), foi projetado para facilitar a montagem e garantir alinhamento e fixação adequado entre as partes centrais do núcleo, enquanto o sistema de fecho por pressão, como apresentado na Figura 33(c) e Figura 33(d), foi desenvolvido para assegurar travamento mecânico mesmo sob elevados esforços externos.

O sistema mecânico do sensor foi projetado com predominância de componentes poliméricos, restringindo o uso de elementos metálicos às regiões de fixação estrutural. A Figura 33(a) e Figura 33(b) apresentam o mecanismo de dobradiça, responsável por permitir a abertura controlada do dispositivo, além de garantir o alinhamento adequado entre as metades do núcleo de ferrite durante o fechamento.

Complementarmente, a Figura 33(c) e Figura 33(d) ilustram o sistema de fecho por pressão, projetado para assegurar o travamento mecânico do sensor após a instalação, mantendo a integridade estrutural do conjunto mesmo sob solicitações mecânicas associadas ao processo de montagem e operação em campo.

Figura 33 — Detalhes do mecanismo de articulação e travamento do sensor HRSS: vista geral (a), detalhe da dobradiça (b), sistema de fecho (c) e vista interna do encaixe (d).

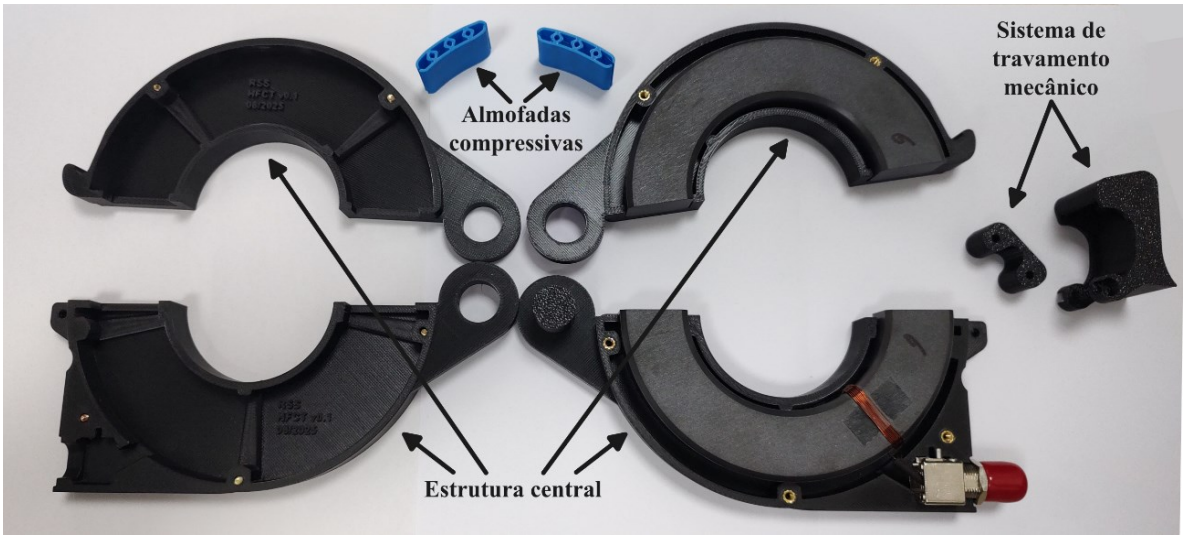


Fonte: O autor.

O conjunto estrutural do sensor é composto por oito componentes poliméricos, conforme apresentado na Figura 34. Quatro desses elementos constituem a estrutura central do dispositivo, responsável pelo alojamento do núcleo de ferrite e pela integração do mecanismo de dobradiça. Outros dois componentes compõem o sistema de travamento mecânico, garantindo a fixação do sensor em condição fechada durante a operação.

As duas peças restantes atuam como elementos de interface mecânica, funcionando como almofadas compressivas destinadas a otimizar o contato entre as metades do núcleo de ferrite, sem introduzir tensões mecânicas excessivas que possam comprometer sua integridade estrutural.

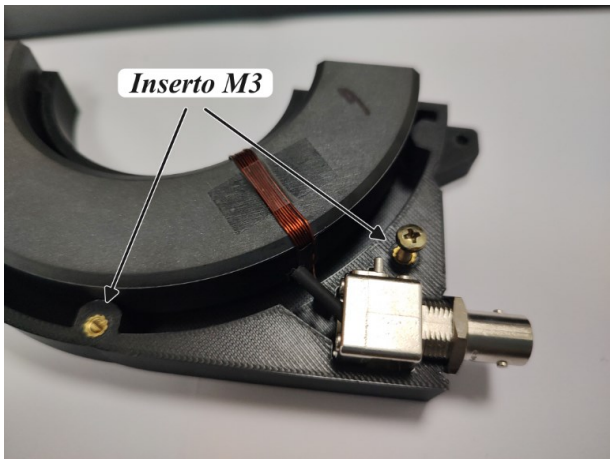
Figura 34 — Visão geral de todas as peças que compõem o sensor HRSS.



Fonte: O autor.

Na montagem do sensor, foram utilizados insertos metálicos roscados M3 nas peças que compõem a estrutura central, conforme ilustrado na Figura 35. A adoção desses insertos tem como objetivo aumentar a resistência mecânica das conexões roscadas e evitar o desgaste observado em roscas diretamente impressas em polímeros, garantindo maior durabilidade do conjunto. Essa solução permite o acoplamento e desacoplamento repetido do invólucro durante os ensaios experimentais, sem comprometer a integridade estrutural do protótipo.

Figura 35 — Inserto metálicos M3 no conjunto estrutural.

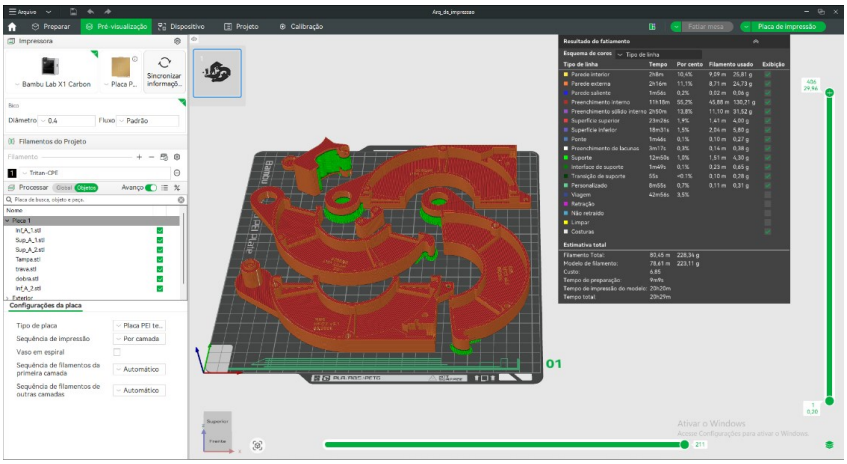


Fonte: O autor.

Os componentes estruturais do sensor foram fabricados por meio de manufatura aditiva, conforme ilustrado na Figura 36, utilizando impressora 3D. As peças foram posicionadas no volume de impressão de forma a otimizar a resistência mecânica do conjunto final e minimizar

deformações durante o processo de fabricação. O tempo total de fabricação dos componentes foi de aproximadamente 23 horas.

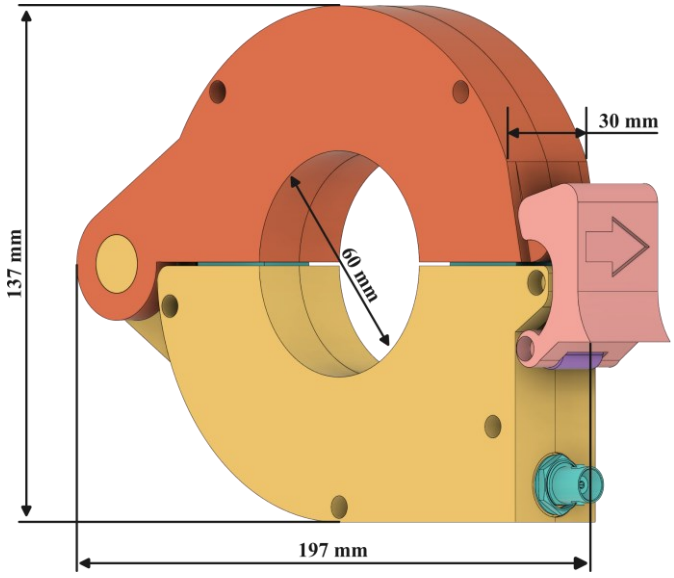
Figura 36 — Fatiamento digital e disposição das camadas para a impressão do encapsulamento do sensor HRSS.



Fonte: O autor.

A Figura 37 apresenta o modelo tridimensional completo do sensor HRSS desenvolvido em ambiente CAD, integrando os elementos construtivos descritos ao longo desta Seção. A representação permite visualizar a arquitetura do dispositivo e os componentes estruturais do encapsulamento. Essa configuração assegura a compatibilidade do sensor com a instalação em configuração *clamp-on*, mantendo a integridade mecânica do conjunto e viabilizando sua montagem e desmontagem para fins experimentais.

Figura 37 — Modelo tridimensional do sensor HRSS com as dimensões externas principais.



Fonte: O autor.

3.3 Ensaios Preliminares de Sensibilidade

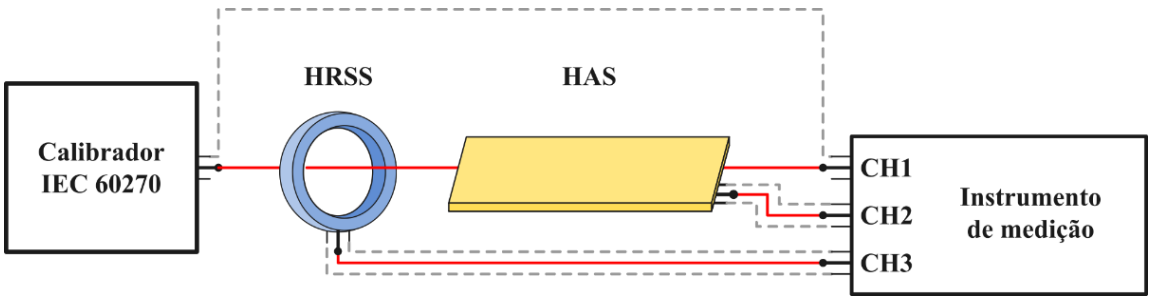
Nesta seção são apresentados os ensaios experimentais realizados para a caracterização dos sensores desenvolvidos, com o objetivo de avaliar seu desempenho e compreender seu comportamento antes da aplicação nos ensaios em ambiente de alta tensão. Para essa finalidade, a caracterização foi organizada em três etapas, correspondentes à validação funcional, à determinação experimental da sensibilidade em regime permanente e à caracterização da resposta em frequência por meio da medição do parâmetro S_{21}. Em conjunto, esses ensaios fornecem uma caracterização qualitativa e quantitativa dos sensores, estabelecendo uma base experimental para a análise dos resultados apresentados nas seções seguintes.

3.3.1 Validação funcional

Antes da realização dos ensaios definitivos em ambiente de alta tensão, os protótipos desenvolvidos foram submetidos a uma etapa preliminar de validação funcional em bancada. O objetivo desse procedimento foi verificar, de forma qualitativa, a capacidade de transdução eletromagnética e de acoplamento dos sensores HAS e HRSS, confirmando seu adequado funcionamento em condições controladas de baixa tensão antes da sua utilização em condições reais de estresse dielétrico.

Para a simulação de DPs em ambiente controlado, utilizou-se um calibrador de pulsos padronizado em conformidade com as diretrizes da norma IEC 60270, modelo Techimp PDCAL 100 (Techimp - Altanova Group, Itália). O equipamento foi configurado para injetar pulsos de DPs com magnitudes previamente conhecidas. O circuito de ensaio consistiu na aplicação desses pulsos em um condutor, reproduzindo a corrente associada a DPs, conforme ilustrado na Figura 38 [86, 98, 108].

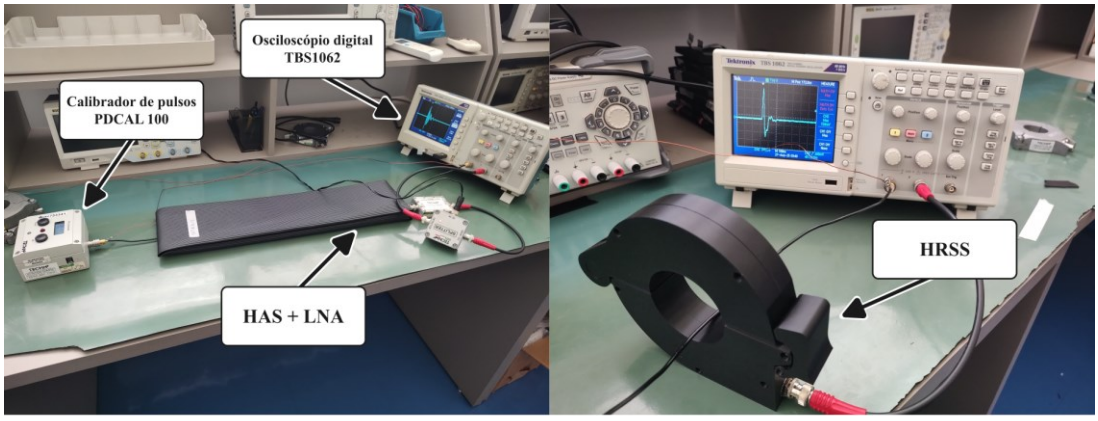
Figura 38 — Diagrama esquemático do circuito de validação funcional em bancada utilizando calibrador IEC 60270.



Fonte: O autor.

A montagem experimental foi realizada em duas configurações distintas, permitindo a avaliação individual de cada sensor. Para o HRSS, o condutor proveniente do calibrador foi conduzido através da abertura central do núcleo toroidal, atuando como um enrolamento primário de espira única e possibilitando a verificação do acoplamento indutivo. Para o HAS, o circuito foi disposto de modo que o pulso transitório irradiasse um campo eletromagnético no espaço livre, permitindo sua captação pelo elemento ressonante passivo por meio de acoplamento eletromagnético. A disposição física de ambos os arranjos experimentais é apresentada na Figura 39.

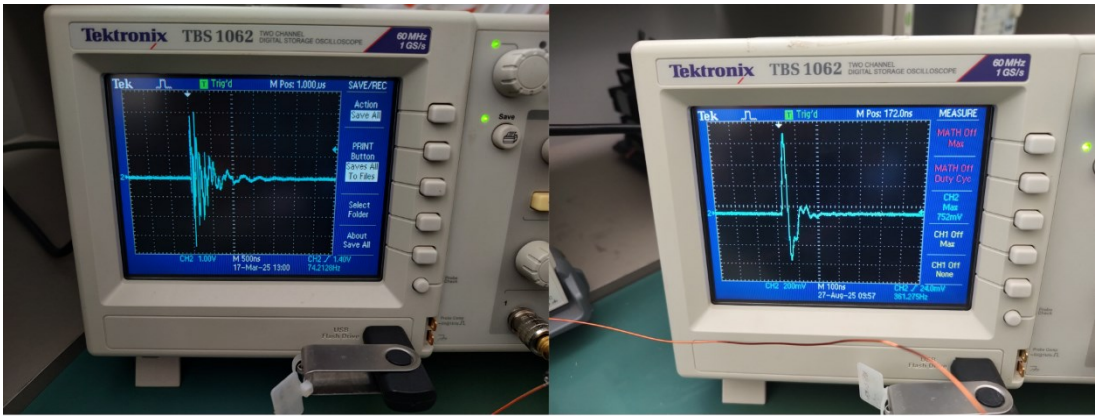
Figura 39 — Montagem experimental em bancada: (a) arranjo com o sensor HFCT; (b) arranjo com o HAS.



Fonte: O autor.

As saídas dos sensores foram conectadas ao osciloscópio digital, modelo TBS1062 (Tektronix, Estados Unidos), por meio de cabos coaxiais blindados, possibilitando o registro das formas de onda geradas durante os ensaios. A análise visual preliminar dos sinais adquiridos evidenciou que ambos os sensores apresentaram sensibilidade para detectar os impulsos de DPs produzidos pelo calibrador. As respostas temporais registradas apresentaram amplitudes bem definidas e a morfologia característica de sinais transitórios, com tempos de subida reduzidos seguidos de amortecimento, comportamento compatível com o esperado para pulsos típicos de DPs, conforme mostrado na Figura 40.

Figura 40 — Sinais transitórios capturados no osciloscópio durante a validação preliminar: (a) resposta temporal obtida pelo sensor HRSS (b) resposta temporal obtida pelo sensor HASS.



(a) **(b)**

Fonte: O autor.

Os resultados obtidos nesta etapa forneceram evidências iniciais da viabilidade técnica dos protótipos desenvolvidos, demonstrando que ambos os sensores foram capazes de detectar os pulsos padronizados gerados pelo calibrador IEC 60270. Essa validação funcional respaldou o avanço para a etapa subsequente de otimização e para a realização dos ensaios experimentais em ambiente de alta tensão mais próximas da realidade.

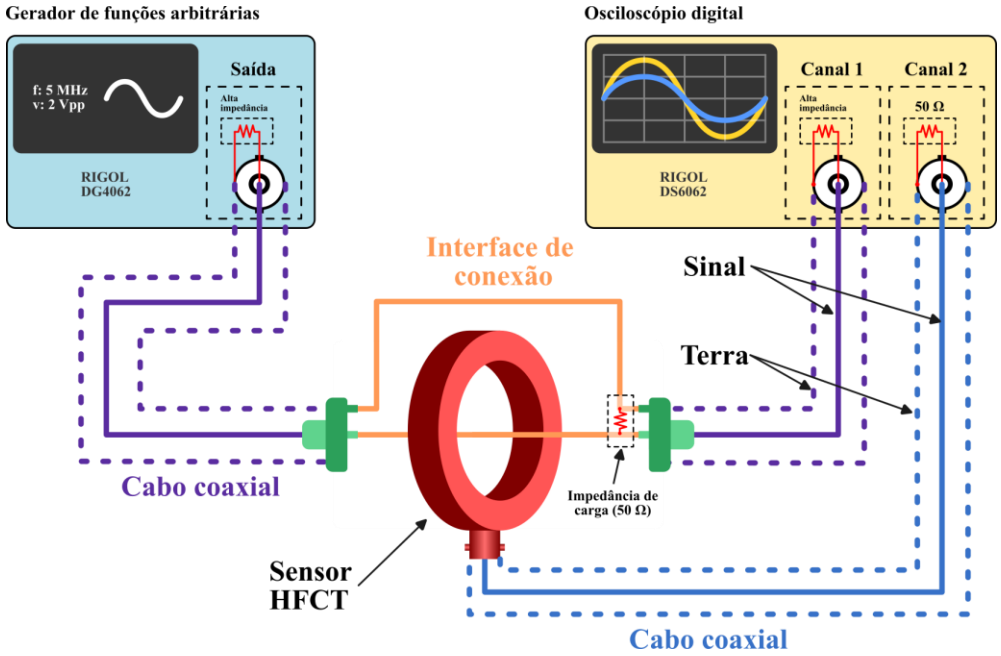
3.3.2 Determinação experimental da sensibilidade em regime permanente

Com o objetivo de avaliar quantitativamente a sensibilidade elétrica dos sensores desenvolvidos, foi realizado um ensaio em bancada empregando uma fonte de excitação senoidal em regime permanente. O procedimento experimental teve como finalidade determinar a relação entre a corrente aplicada ao condutor primário e a tensão induzida na saída dos sensores, permitindo comparar o desempenho dos protótipos desenvolvidos com um sensor HFCT comercial utilizado como referência. A frequência de ensaio foi fixada em 5 MHz com base nas especificações apresentadas no datasheet do sensor HFCT comercial utilizado como referência [13]. A adoção dessa condição permitiu que a comparação entre os protótipos desenvolvidos e o dispositivo comercial fosse realizada sob os mesmos parâmetros operacionais recomendados pelo fabricante, assegurando maior confiabilidade à avaliação experimental da sensibilidade.

Para a realização dos ensaios foi utilizado um gerador de funções arbitrárias modelo DG4062 (RIGOL *Technologies,* China), configurado para fornecer uma onda senoidal de

frequência igual a 5 MHz e amplitude de 2 Vpp. O arranjo experimental consistiu em uma linha de transmissão coaxial contendo uma interface de conexão responsável pela separação entre os condutores de fase e retorno, permitindo que os sensores HFCT envolvessem exclusivamente o condutor ativo. Na extremidade da linha foi instalada uma carga resistiva de 50 Ω, responsável pela terminação da linha de transmissão e pelo estabelecimento da corrente de ensaio. Em paralelo à resistência foi instalado um conector SMA destinado ao monitoramento da tensão aplicada sobre a carga. A Figura 41 apresenta o diagrama esquemático do circuito utilizado durante o ensaio.

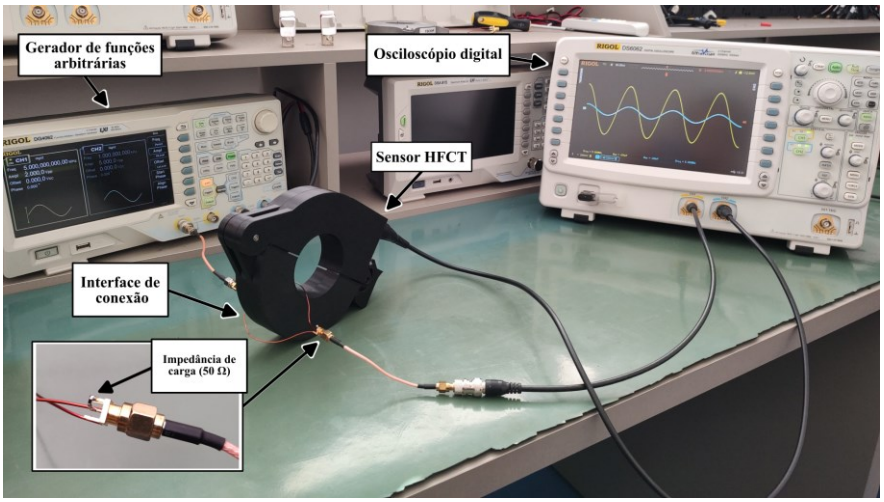
Figura 41 — Diagrama esquemático do arranjo experimental utilizado para determinação da sensibilidade dos sensores HFCT em regime permanente.



Fonte: O autor.

A montagem física da bancada experimental é apresentada na Figura 42. Durante os ensaios, os diferentes sensores foram acoplados individualmente ao condutor ativo, mantendo-se inalteradas todas as demais condições experimentais. A tensão sobre o resistor de carga foi monitorada pelo Canal 1 do osciloscópio digital modelo DS6062 (RIGOL *Technologies*, China). Simultaneamente, a saída do sensor em avaliação foi conectada ao Canal 2 do instrumento.

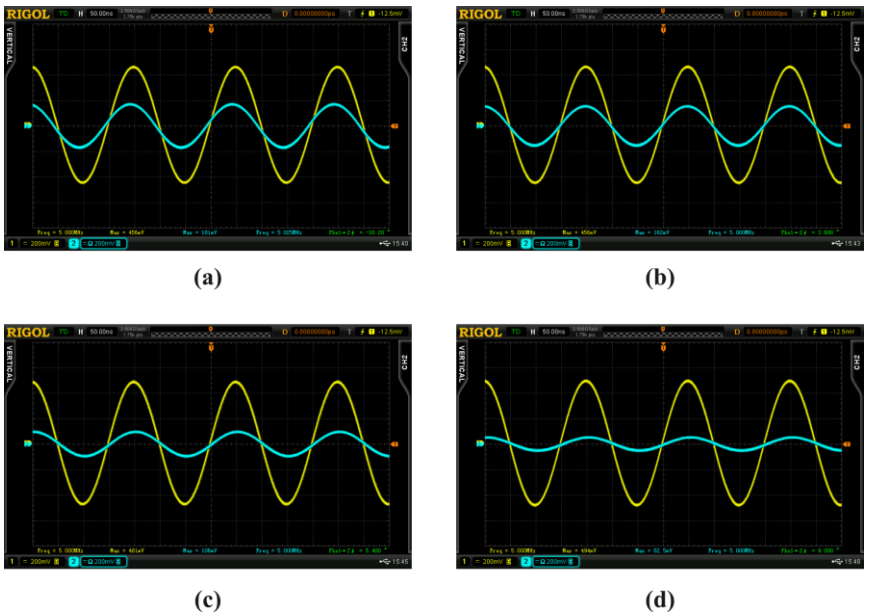
Figura 42 — Montagem experimental utilizada para determinação da sensibilidade dos sensores.



Fonte: O autor.

Os gráficos obtidos durante os ensaios são apresentados na Figura 43. Em todas as configurações avaliadas observou-se boa fidelidade na reprodução da forma de onda senoidal aplicada, não sendo identificadas distorções harmônicas significativas ou instabilidades durante a aquisição. A corrente circulante no condutor primário foi determinada a partir da tensão medida sobre a resistência terminal de $50\ \Omega$, enquanto a tensão induzida na saída dos sensores foi utilizada para o cálculo da sensibilidade elétrica, expressa em mV/mA. Os valores de sensibilidade determinados experimentalmente para todos os dispositivos avaliados são apresentados na Tabela 5.

Figura 43 — Os gráficos obtidos durante o ensaio de determinação da sensibilidade: (a) sensor HFCT comercial Techimp; (b) protótipo N = 2; (c) protótipo N = 4; (d) protótipo N = 8.



Fonte: O autor.

Tabela 5 — Sensibilidade elétrica determinada experimentalmente para os sensores HFCT.

Sensor	**Sensibilidade (mV/mA)**
HFCT Techimp	19,84
Protótipo $N = 2$	17,76
Protótipo $N = 4$	11,02
Protótipo $N = 8$	6,32

Fonte: O autor.

O sensor comercial Techimp apresentou sensibilidade de $19{,}84\ mV/mA$, valor que difere em aproximadamente 4,4 % da sensibilidade nominal de $19\ mV/mA$ especificada pelo *datasheet* [13]. Essa pequena discrepância valida o arranjo experimental empregado, demonstrando que a metodologia de ensaio reproduziu bem as condições operacionais recomendadas para o dispositivo de referência. Dessa forma, as comparações realizadas com os protótipos desenvolvidos podem ser consideradas consistentes, uma vez que todos os sensores foram avaliados sob a mesma frequência de operação.

Entre os protótipos desenvolvidos, o sensor com relação de espiras igual a $N = 2$ apresentou a maior sensibilidade, alcançando $17{,}76\ mV/mA$, comportamento bastante próximo ao observado para o dispositivo comercial. Os sensores com $N = 4$ e $N = 8$ apresentaram sensibilidades de $11{,}02\ mV/mA$ e $6{,}32\ mV/mA$, respectivamente, evidenciando uma redução progressiva da tensão induzida à medida que o número de espiras do enrolamento secundário foi aumentado.

Considerando o HFCT como um transformador de corrente ideal operando em sua região linear, a corrente induzida no enrolamento secundário pode ser descrita pela Equação 2,

$$I_{sec} = \frac{I_{pri}}{N} \tag{2}$$

sendo I_{pri} a corrente aplicada ao condutor primário, I_{sec} a corrente induzida no condutor secundário e N o número de espiras do enrolamento secundário. A tensão medida na saída do sensor corresponde à queda de tensão produzida pela corrente secundária sobre a carga de medição, sendo descrita pela Equação 3,

$$V_{out} = I_{sec} \cdot R_L \tag{3}$$

em que R_L representa a impedância interna do canal do osciloscópio conectada em paralelo ao secundário do transformador. Considerando a impedância padronizada de $50\,\Omega$ empregada durante os ensaios, como mostrada pela Equação 4:

$$V_{out} = 50 \cdot \frac{I_{pri}}{N} \tag{4}$$

Essas relações evidenciam que, mantendo-se constante a corrente aplicada ao condutor primário, a tensão induzida na saída do sensor tende a diminuir com o aumento do número de espiras do enrolamento secundário, comportamento observado experimentalmente nos três protótipos avaliados. Embora a relação inversamente proporcional represente adequadamente a tendência geral do fenômeno, pequenas discrepâncias em relação ao modelo ideal são esperadas em dispositivos reais, sendo atribuídas principalmente às perdas magnéticas do núcleo ferromagnético, às indutâncias de dispersão, às capacitâncias parasitas entre espiras e às limitações inerentes à resposta em frequência do conjunto sensor-circuito na faixa de $5\,MHz$. Adicionalmente, pequenas descontinuidades introduzidas pelos conectores e adaptadores coaxiais também podem contribuir para incertezas residuais nas medições.

Os resultados obtidos demonstram que todos os sensores desenvolvidos apresentaram funcionamento adequado durante o ensaio de sensibilidade em regime permanente, confirmando a viabilidade da metodologia empregada para sua caracterização elétrica.

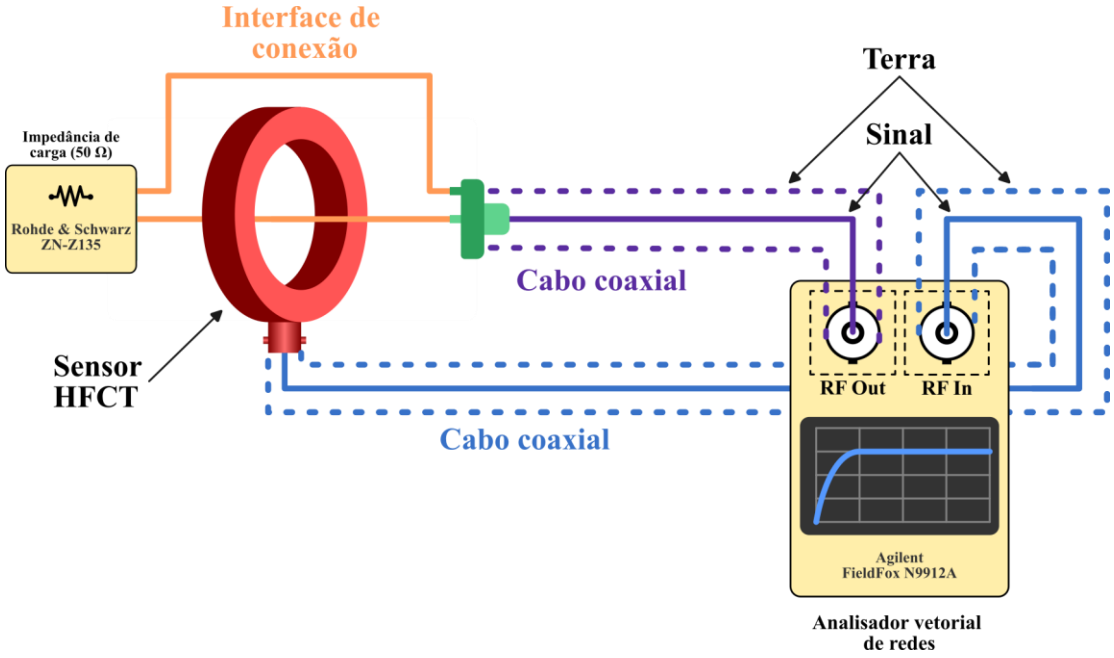
3.3.3 Caracterização da resposta em frequência por meio da medição do parâmetro S_{21}

Com o objetivo de caracterizar experimentalmente a resposta em frequência dos sensores HFCT desenvolvidos, foi realizado um ensaio utilizando um analisador vetorial de redes (*Vector Network Analyzer*, VNA), permitindo determinar a magnitude do parâmetro de transmissão S_{21} ao longo da faixa de frequências de interesse. Esse procedimento possibilitou comparar a função de transferência dos protótipos desenvolvidos com a de um sensor comercial de referência, avaliando sua capacidade de transdução em aplicações destinadas à detecção de DPs.

Para a realização dos ensaios foi empregado um analisador vetorial de redes modelo FieldFox N9912A (Agilent *Technologies*, EUA). O arranjo experimental como ilustrado na Figura 44, consistiu em uma linha de transmissão coaxial contendo uma interface destinada à

separação entre os condutores de fase e retorno, permitindo que os sensores envolvessem exclusivamente o condutor ativo. Na extremidade da linha foi instalada uma carga resistiva de 50 Ω, modelo ZN-Z135 (Rohde & Schwarz, Alemanha), responsável pela terminação da linha de transmissão e pelo estabelecimento da corrente de ensaio. O analisador foi previamente calibrado conforme instruções disponibilizadas pelo próprio equipamento, sendo posteriormente configurado para realizar uma varredura na faixa de frequências compreendida entre 2 MHz e 100 MHz. Durante os ensaios, a linha de transmissão foi conectada à porta de saída (RF *Out*) do equipamento, enquanto os sensores em avaliação foram ligados individualmente à porta de recepção (RF *In*), possibilitando a aquisição das curvas correspondentes ao parâmetro de transmissão S_{21}.

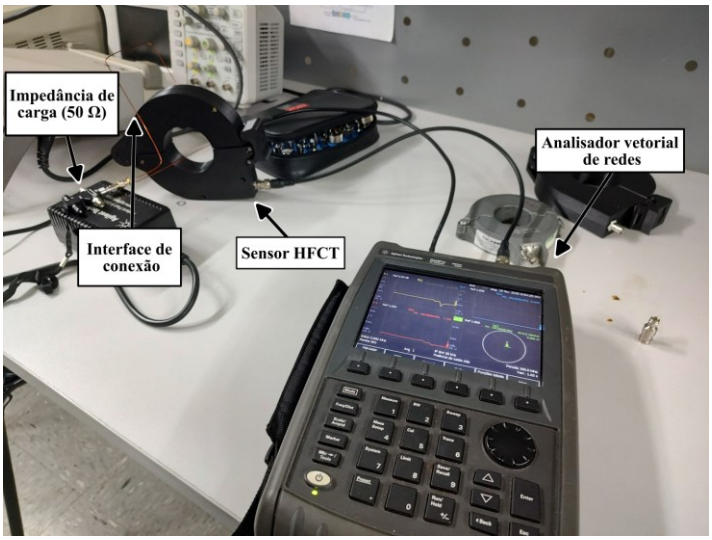
Figura 44 — Diagrama esquemático do arranjo experimental utilizado para caracterização da resposta em frequência dos sensores HFCT por meio da medição do parâmetro S_{21}.



Fonte: O autor.

A Figura 45 apresenta a montagem experimental empregada durante os ensaios. Todos os sensores foram avaliados individualmente, mantendo-se inalteradas as condições de calibração, a configuração da linha de transmissão e a impedância de terminação de 50 Ω, garantindo a reprodutibilidade das medições e a comparação direta entre os dispositivos.

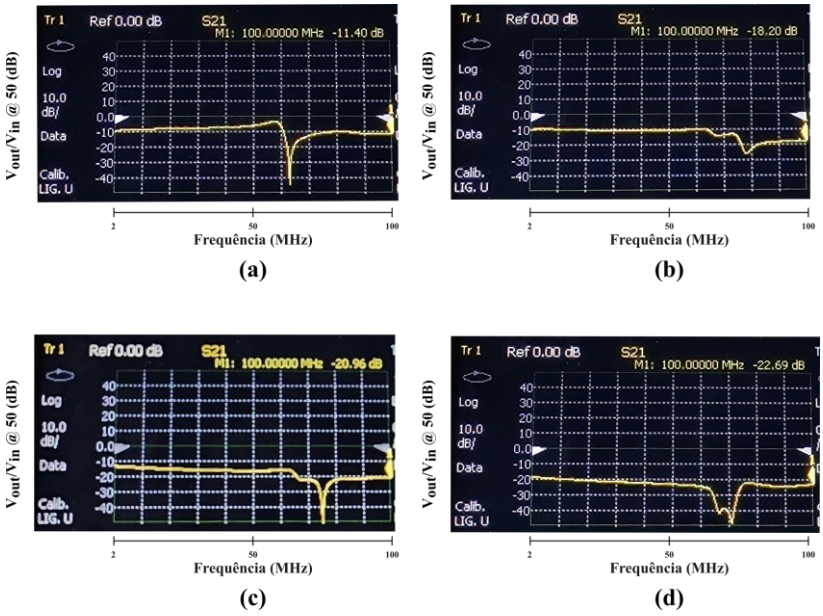
Figura 45 — Montagem experimental utilizada para caracterização da resposta em frequência.



Fonte: O autor.

As curvas experimentais da magnitude do parâmetro S_{21} obtidas para os quatro sensores avaliados são apresentadas na Figura 46. O eixo horizontal representa a frequência de excitação, enquanto o eixo vertical corresponde à magnitude do parâmetro de transmissão, expressa em decibéis (dB), representando a razão entre os sinais medidos nas portas de saída e entrada do VNA. Os valores de magnitude do parâmetro S_{21} medidos na frequência de $100\ MHz$ são apresentados na Tabela 6.

Figura 46 — Resposta em frequência da magnitude do parâmetro S_{21} para os sensores avaliados: (a) sensor comercial Techimp Clamp 39 mm; (b) protótipo N = 2; (c) protótipo N = 4; (d) protótipo N = 8.



Fonte: O autor.

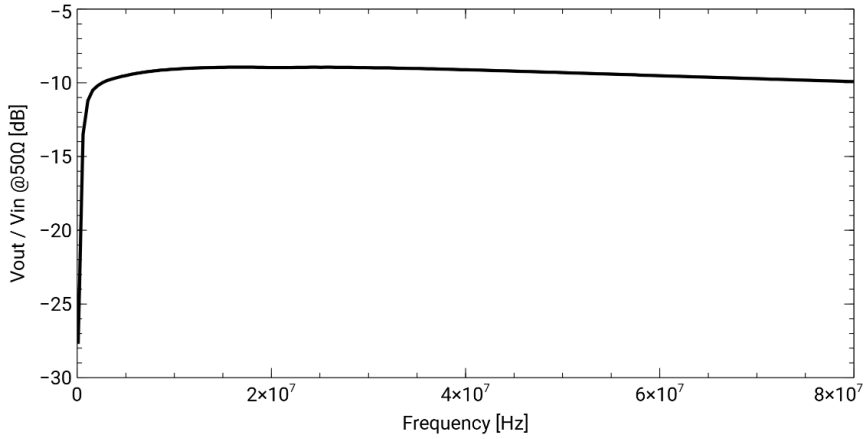
Tabela 6 — Magnitude do parâmetro S_{21} obtida para os sensores avaliados em 100 MHz.

Sensor	$\boldsymbol{S_{21}}$ $\boldsymbol{(dB)}$
HFCT Techimp	-11,40
Protótipo $N = 2$	-18,20
Protótipo $N = 4$	-20,96
Protótipo $N = 8$	-22,69

Fonte: O autor.

Com o objetivo de validar o procedimento experimental empregado, a Figura 47 apresenta a curva de resposta em frequência disponibilizada pelo fabricante para o sensor comercial Techimp *Clamp* 39 mm [13], utilizada como referência para comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

Figura 47 — Curva de resposta em frequência do sensor comercial Techimp Clamp 39 mm extraída do datasheet do fabricante.



Fonte: [13].

Os resultados apresentados na Figura 46 e nas Tabela 6 evidenciam que todos os sensores apresentam comportamento aproximadamente plano ao longo da maior parte da faixa de frequências investigada, característica desejável para detectar pulsos rápidos associados às DPs. Embora todos os dispositivos apresentem resposta semelhante em termos de formato da curva, observa-se uma redução progressiva da magnitude do parâmetro S_{21} com o aumento do número de espiras do enrolamento secundário.

O sensor comercial Techimp apresentou magnitude de $-11{,}40\ dB$ em $100\ MHz$, valor bastante próximo ao comportamento especificado pelo fabricante, cuja curva de resposta indica um patamar aproximadamente constante em torno de $-10\ dB$ ao longo da banda útil de operação [13]. A elevada concordância entre a curva experimental e a informação

disponibilizada no *datasheet* demonstra a adequação do procedimento experimental, o que confere confiabilidade à metodologia empregada na caracterização dos protótipos desenvolvidos.

Entre os sensores implementados, o protótipo com relação de espiras igual a $N = 2$ apresentou a maior magnitude do parâmetro de transmissão, registrando $-18{,}20\,dB$ na frequência de $100\,MHz$. Os protótipos com $N = 4$ e $N = 8$ apresentaram magnitudes de $-20{,}96\,dB$ e $-22{,}69\,dB$, respectivamente, evidenciando uma tendência monotônica de redução da resposta em frequência com o aumento do número de espiras.

Considerando o HFCT como um transformador de corrente operando em sua região linear, a corrente induzida no enrolamento secundário pode ser aproximada pela Equação 2 de modo que, mantendo-se constante a corrente aplicada ao condutor primário, o aumento do número de espiras reduz a corrente disponível no secundário. Consequentemente, a tensão desenvolvida sobre a impedância de entrada de $50\,\Omega$ do VNA também é reduzida, justificando a diminuição progressiva da magnitude do parâmetro S_{21} observada experimentalmente. Esse comportamento é coerente com os resultados obtidos anteriormente no ensaio de determinação da sensibilidade em regime permanente, reforçando a consistência física entre ambas as metodologias de caracterização.

Além da diferença de magnitude entre as curvas, observa-se também a presença de uma região de antirressonância. Enquanto o sensor comercial apresentou um vale de atenuação em aproximadamente $62\,MHz$, os protótipos com $N = 2$, $N = 4$ e $N = 8$ exibiram esse comportamento em cerca de $78\,MHz$, $76\,MHz$ e $72\,MHz$, respectivamente. Esse deslocamento evidencia que a resposta dinâmica do conjunto sensor-montagem é influenciada pelas características construtivas de cada dispositivo, as quais afetam os parâmetros elétricos distribuídos do sistema.

Em particular, alterações na geometria do enrolamento modificam as capacitâncias e indutâncias parasitas, resultando em deslocamentos da frequência de antirressonância observada experimentalmente. Embora o presente trabalho não tenha como objetivo determinar individualmente esses elementos parasitas, os resultados obtidos evidenciam sua influência sobre a resposta em frequência dos sensores e indicam que o fenômeno observado está associado às características eletromagnéticas do conjunto sensor-circuito, e não a erros aleatórios de medição.

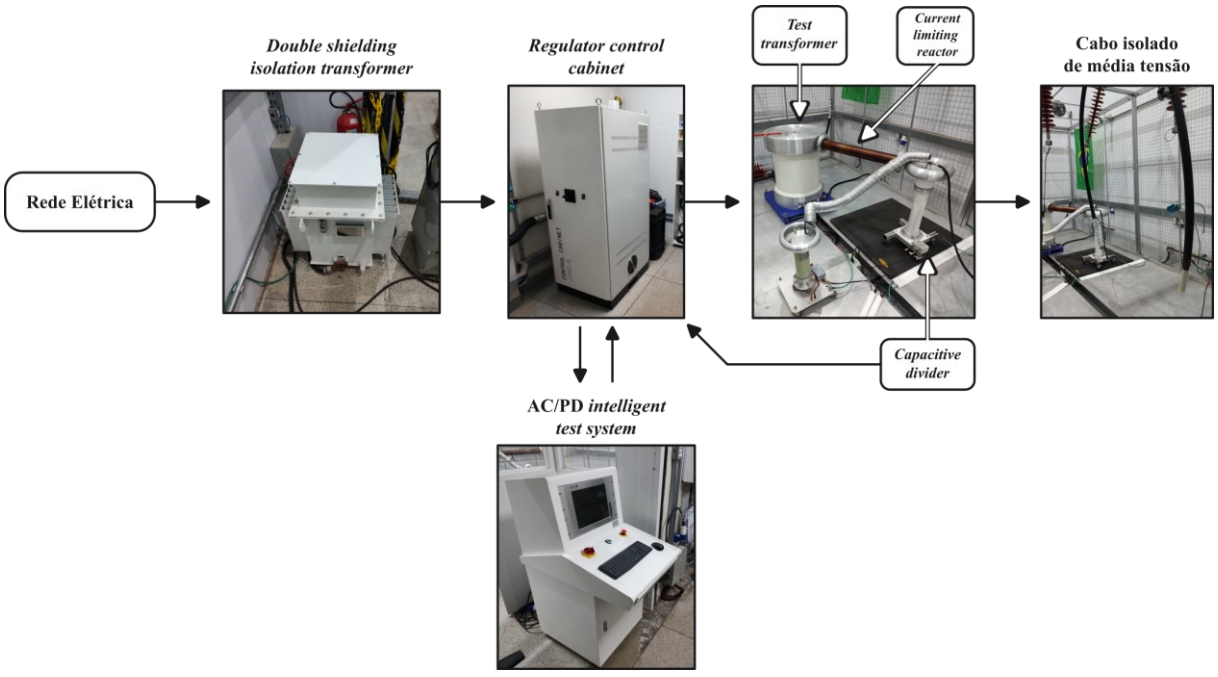
Os resultados obtidos demonstraram que todos os sensores apresentaram resposta em frequência compatível com a aplicação em sistemas de detecção de DPs, mantendo comportamento aproximadamente plano ao longo da maior parte da faixa de frequências

analisada. A comparação com o sensor comercial evidenciou que o método experimental empregado foi capaz de reproduzir satisfatoriamente sua resposta em frequência, conferindo confiabilidade à caracterização dos protótipos desenvolvidos.

3.4 Sistema experimental

Para avaliar o desempenho dos sensores propostos realizaram-se experimentos laboratoriais em ambiente controlado, utilizando um sistema de ensaios *power frequency test system*, modelo JTWGN-40kVA/75kV (Dielec, China), conforme ilustrado na Figura 48.

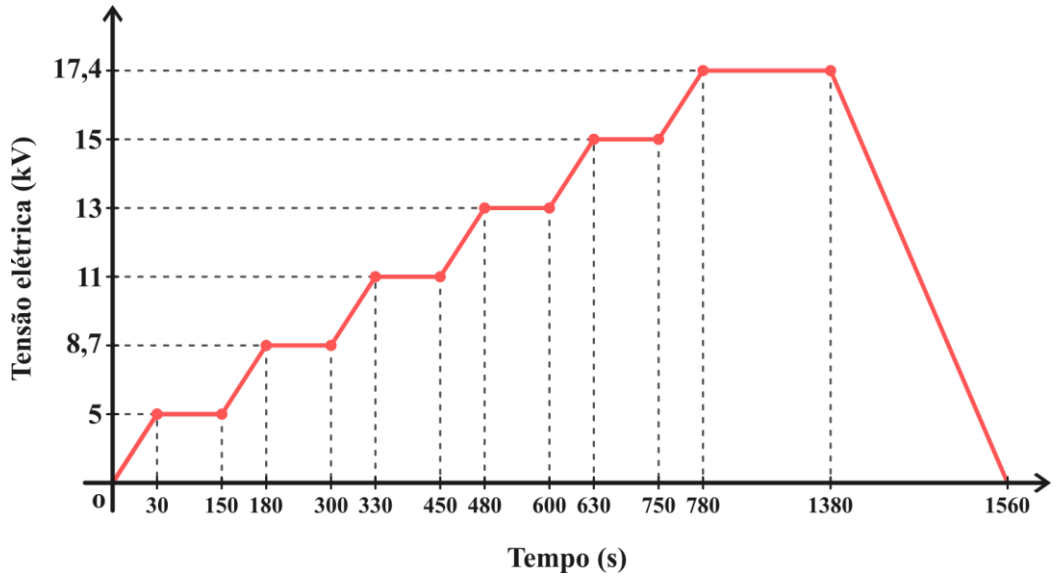
Figura 48 — Sistema de ensaios *power frequency test system* utilizado na avaliação experimental dos sensores.



Fonte: O autor.

Durante os ensaios, as amostras de cabos foram submetidas a diferentes níveis de tensão elétrica, aplicados de forma gradual. Entre níveis consecutivos, foi adotado um intervalo de estabilização de 2 minutos. Após atingir a tensão máxima, o ensaio foi mantido por até 10 minutos. A Figura 49 apresenta o perfil temporal de aplicação da tensão utilizado nos ensaios.

Figura 49 — Perfil de aplicação da tensão elétrica durante os ensaios experimentais.

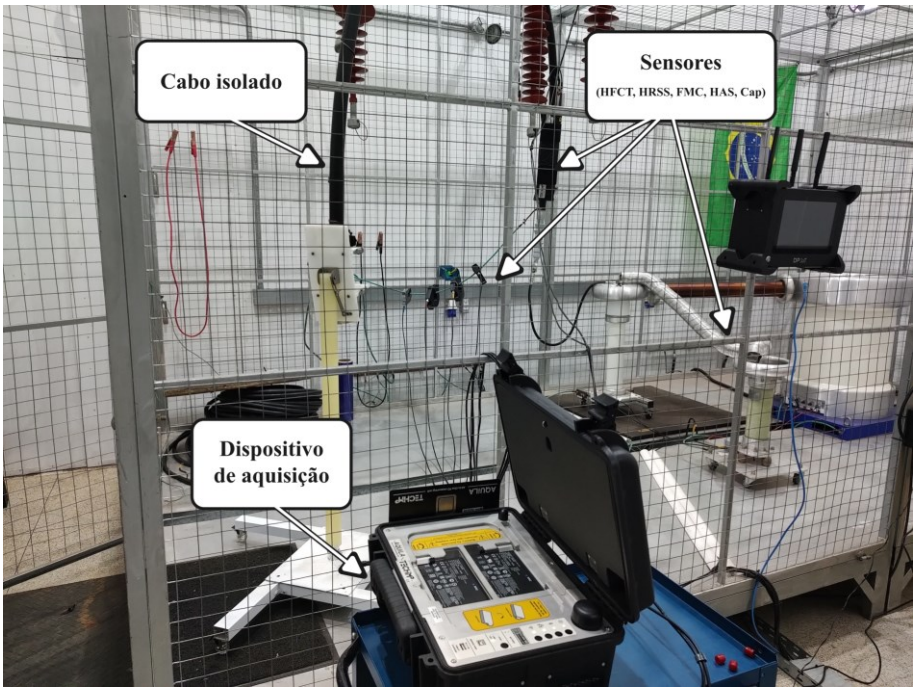


Fonte: O autor.

Com o objetivo de padronizar os procedimentos experimentais, as aquisições de dados referentes aos pulsos de DPs foram realizadas predominantemente na tensão de 17 kV, equivalente a 2 U_0, sendo U_0 a tensão nominal entre o condutor e a terra do cabo isolado.

Os ensaios foram conduzidos com diferentes tipos de sensores, incluindo o HFCT, utilizado em todos os experimentos como referência numérica, além de um sensor divisor capacitivo, um FMC e os sensores protótipos desenvolvidos ao longo deste trabalho. Para a aquisição dos sinais, utilizou-se o dispositivo Techimp AQUILA (Techimp - Altanova Group, Itália), cujas principais características incluem largura de banda de 16 kHz a 30 MHz, taxa de amostragem de 100 MS/s e resolução de 10 bits. O arranjo laboratorial é ilustrado na Figura 50.

Figura 50 — Arranjo experimental para aquisição de sinais de DPs em cabos isolados.



Fonte: O autor.

3.5 Cabos utilizados nos ensaios

Com o objetivo de diversificar os tipos de defeitos e condutores avaliados ao longo dos ensaios, selecionaram-se oito tipos de cabos isolados, com diferentes materiais constituintes e distintos tipos de defeitos estruturais, usados para gerar pulsos de DPs. Para melhor organização dos experimentos, a identificação dos cabos utilizados, bem como suas principais características construtivas (Tabela 7) e defeitos associados (Tabela 8).

Tabela 7 — Características dos cabos.

Cabo	Isolamento	Seção (mm²)	Condutor	Blindagem
1	EPR	300	Cobre	Cobre
2	EPR	35	Cobre	Cobre
3	XLPE	300	Alumínio	Cobre
4	EPR	300	Cobre	Chumbo
5	EPR	35	Cobre	Cobre
6	XLPE	35	Cobre	Cobre
7	XLPE	35	Cobre	Cobre
8	EPR	300	Cobre	Cobre

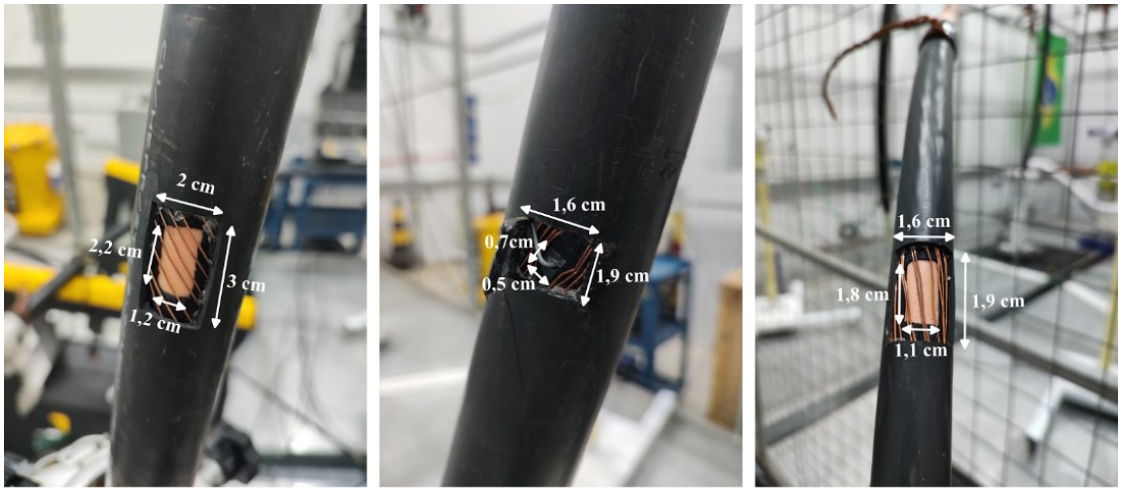
Fonte: O autor.

Tabela 8 - Defeitos analisados.

Cabo	Defeito estrutural
1	Inserção de janela entre isolamento, semicondutora externa, blindagem metálica e revestimento plástico (Figura 51(a)).
2	Fissuras internas no isolamento causadas por instalação inadequada de terminações (5080).
3	Inserção de janela entre as camadas do cabo e presença de fio metálico inserido no isolamento e conectado à blindagem (Figura 51(b)).
4	Fissuras internas no isolamento provocadas por manuseio durante o uso.
5	Fissuras internas ou bolhas de gás entre semicondutora interna, isolamento e semicondutora externa, provocadas por envelhecimento induzido por água e alta corrente.
6	Fissuras internas ou bolhas de gás entre as camadas semicondutoras e o isolamento, decorrentes de envelhecimento induzido por alta temperatura, com aproximadamente 20% de degradação.
7	Defeito semelhante ao do cabo 6, causado por envelhecimento acelerado por alta temperatura, com aproximadamente 20% de degradação.
8	Inserção de janela entre isolamento, semicondutora externa, blindagem metálica e cobertura externa (Figura 51(c)). Comprimento aproximado de 180 m.

Fonte: O autor.

Figura 51 — a) cabo nº1 defeito introduzido expondo material isolante, b) cabo nº3 defeito introduzido expondo material isolante e inserido um pino de 0,8 cm e c) cabo nº8 defeito introduzido expondo material isolante.



Fonte: O autor.

A utilização de diferentes tipos de cabos e defeitos teve como objetivo reproduzir condições representativas de DPs encontradas em sistemas reais de distribuição e transmissão de energia elétrica.

3.6 Descrição dos Experimentos

Nesta Seção são descritos os experimentos realizados para avaliar o desempenho dos sensores HAS e HRSS para detectar pulsos de DPs em cabos isolados de média e alta tensão. O planejamento geral dos experimentos é apresentado na Tabela 9, a descrição completa é apresentada nas seções subsequentes dividias em: ensaios com o sensor HAS, ensaios com o sensor HRSS e ensaios em cabo de maior extensão.

Tabela 9 — resumo do planejamento experimental.

Experimento	Objetivo	Cabos	Sensores	Variável analisada
1	Sensibilidade do HAS	1 & 5	HFCT + HAS	detectar
2	Otimização HAS	1	HFCT + HAS	comprimento e AWG
3	Tipos de DPs	2, 6 & 7	HFCT + HAS	resposta espectral
4	Cabo com chumbo	4	HFCT + HAS	blindagem metálica
5	Sensibilidade HRSS	3	HFCT + HRSS	detectar
6	Otimização HRSS	3	HFCT + HRSS	número de espiras
7	Tipos de DPs	2, 6 & 7	HFCT + HRSS	resposta espectral
8	Cabo com chumbo	4	HFCT + HRSS	blindagem metálica
9	Cabo longo	8	HFCT + HFCT + FMC + HAS + HRSS	Degradação do sinal de pulso de DPs

Fonte: O autor.

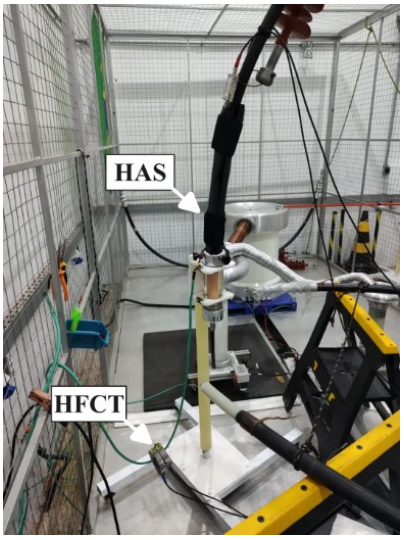
3.6.1 Experimento 1 — Teste de sensibilidade do sensor HAS

O **Experimento 1** teve como objetivo verificar se o sensor HAS apresenta capacidade de detectar pulsos de DPs em cabos isolados. Ao todo, foram realizados quatro ensaios utilizando os cabos nº1 e nº5. O detalhamento dos ensaios é apresentado a seguir.

- Ensaio A: seguindo o arranjo ilustrado na Figura 52, o cabo nº1 foi posicionado no interior da gaiola de proteção. Apenas uma de suas extremidades foi inserida no terminal

a óleo, com o objetivo de possibilitar a ocorrência de diferentes tipos de DPs. Os sensores utilizados foram o HFCT, posicionado no aterramento do cabo isolado, e o HAS, posicionado diretamente sobre o defeito induzido.

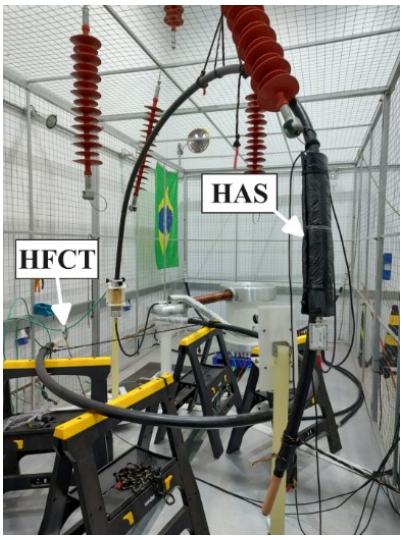
Figura 52 — Experimento 1 ensaio A, arranjo laboratorial.



Fonte: O autor.

- Ensaio B: utilizando o mesmo arranjo do Ensaio A, o sensor HAS foi reposicionado na extremidade oposta do cabo isolado, com o objetivo de avaliar sua sensibilidade a uma maior distância do defeito, conforme ilustrado na Figura 53.

Figura 53 — Experimento 1 ensaio B, arranjo laboratorial.

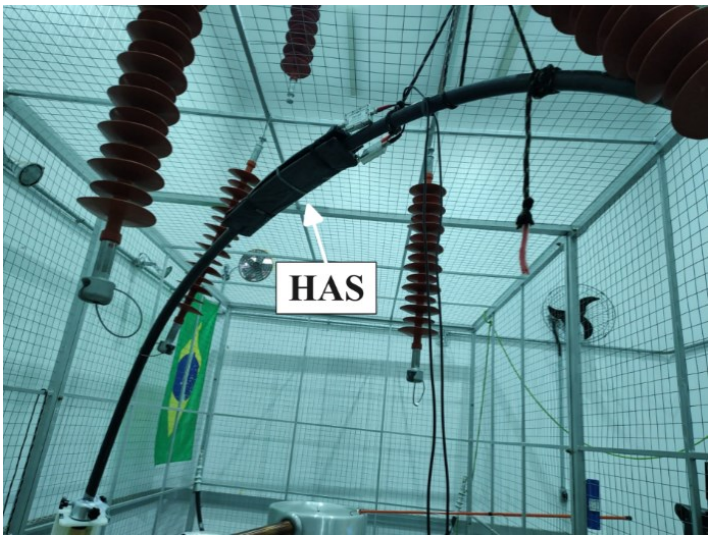


Fonte: O Autor.

- Ensaio C: mantendo o mesmo arranjo experimental, conforme ilustrado na Figura 54, o sensor HAS foi posicionado na região central do cabo isolado, com o objetivo de

verificar sua capacidade em detectar quando posicionado a uma distância intermediária em relação ao defeito.

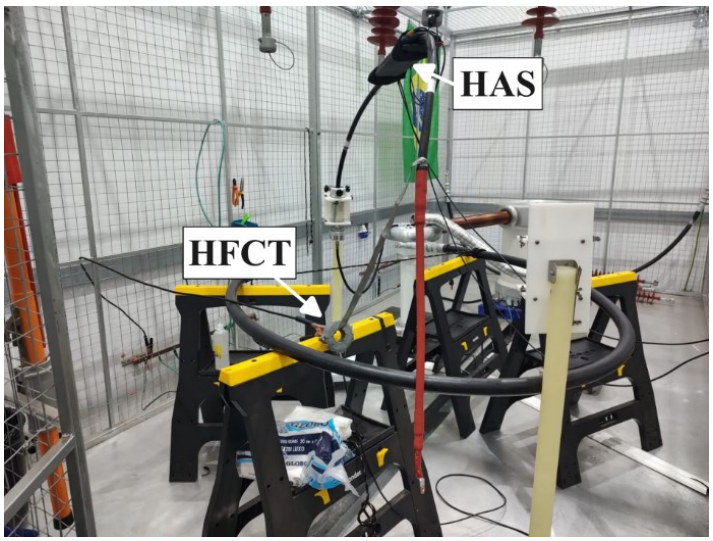
Figura 54 — Experimento 1 ensaio C, arranjo laboratorial.



Fonte: O autor.

- Ensaio D: seguindo o arranjo ilustrado na Figura 55, utilizou-se o cabo nº5, posicionado no interior da gaiola de proteção. Apenas uma de suas pontas foi inserida no terminal a óleo. Os sensores utilizados foram o HFCT, posicionado no aterramento do cabo isolado, e o HAS, posicionado na região central do cabo, uma vez que, para o tipo de defeito presente, a posição de instalação do sensor não influenciará na capacidade de detectar as DPs.

Figura 55 — Experimento 1 ensaio D, arranjo laboratorial.



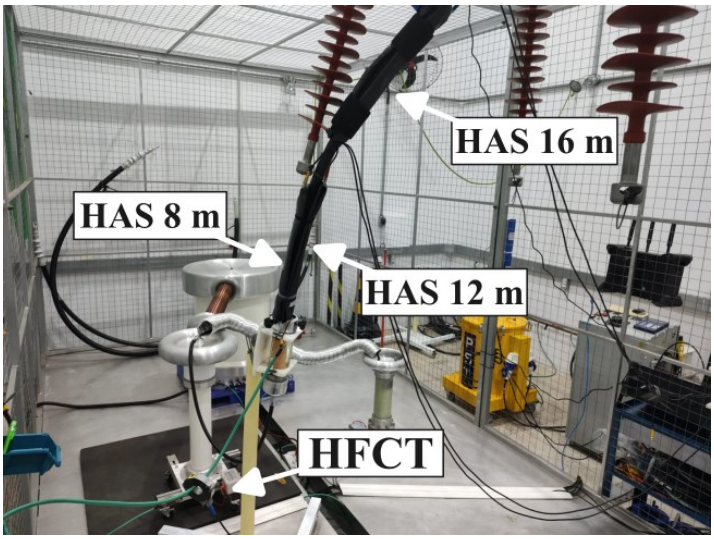
Fonte: O autor.

3.6.2 Experimento 2 — Otimização do sensor HAS

O **Experimento 2** teve como objetivo determinar a configuração mais adequada do comprimento do elemento ressonante passivo do sensor HAS para detectar pulsos de DPs. Para isso, foram realizados 12 ensaios, organizados em três grupos de acordo com a seção transversal do fio de cobre utilizado na construção dos sensores: 20, 22 e 26 AWG. Cada grupo foi composto por três sensores HAS com comprimentos de 8, 12,5 e 16 metros. Para todos os ensaios foi utilizado o cabo nº1. O detalhamento dos ensaios é apresentado a seguir.

- Ensaio A: seguindo o arranjo ilustrado na Figura 56, o cabo nº1 foi posicionado no interior da gaiola de proteção, com ambas as extremidades conectadas aos terminais a óleo. Os sensores utilizados foram o HFCT no aterramento do cabo e três sensores HAS pertencentes ao grupo 20 AWG, com comprimentos de 8, 12,5 e 16 metros, posicionados próximos ao defeito. O ensaio foi repetido quatro vezes em dias distintos.

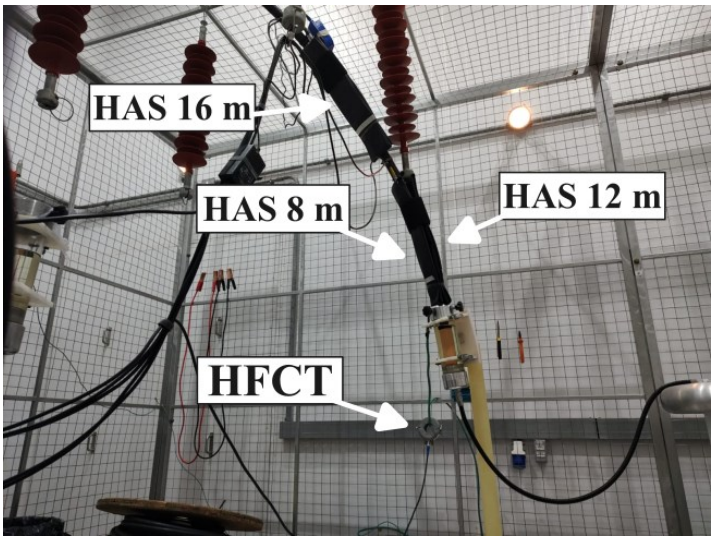
Figura 56 — Experimento 2 ensaio A, arranjo laboratorial.



Fonte: O autor.

- Ensaio B: mantendo a mesma organização experimental do ensaio A, foram utilizados sensores do grupo 22 AWG, conforme ilustrado na Figura 57. O ensaio foi repetido quatro vezes em dias distintos.

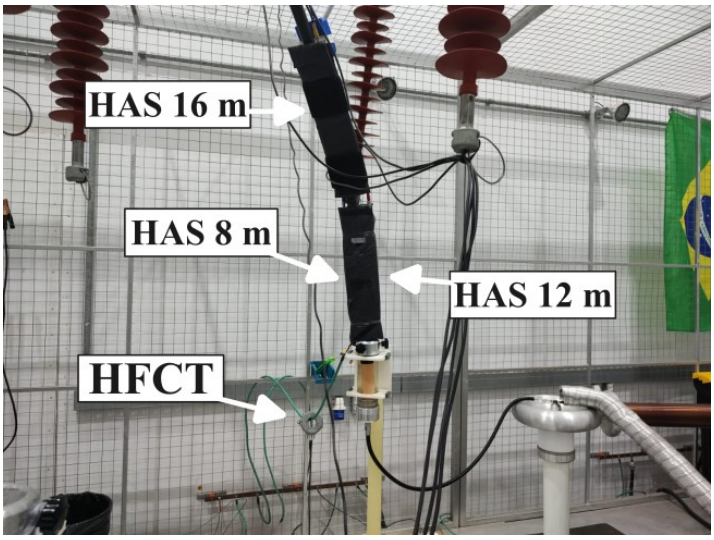
Figura 57 — Experimento 2 ensaio B, arranjo laboratorial.



Fonte: O autor.

- Ensaio C: utilizando a mesma configuração experimental do ensaio A, foram utilizados sensores do grupo 26 AWG, conforme ilustrado na Figura 58. O ensaio foi repetido quatro vezes em dias distintos.

Figura 58 — Experimento 2 ensaio C, arranjo laboratorial.



Fonte: O autor.

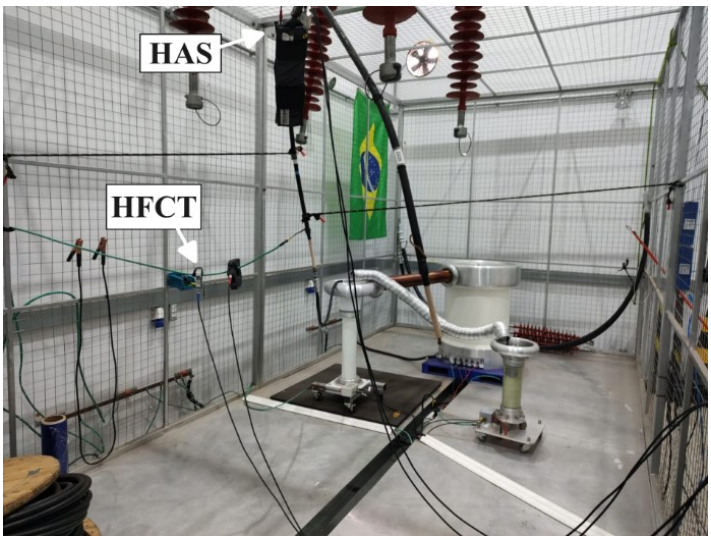
3.6.3 Experimento 3 — Tipos de DPs detectadas pelo sensor HAS

O **Experimento 3** teve como objetivo verificar se o sensor HAS apresenta não apenas a capacidade de detectar pulsos de DPs, mas também de apresentar resposta espectral coerente

para diferentes tipos de DPs. Para isso, foram selecionados três cabos isolados, cada um contendo defeitos capazes de reproduzir um dos três principais tipos de DPs: corona, descargas internas e descargas de superfície. As amostras utilizadas foram os cabos nº2, nº6 e nº7.

- Ensaio A: com o objetivo de provocar descargas do tipo corona, foi utilizado o arranjo ilustrado na Figura 59. O cabo nº6 foi posicionado no interior da gaiola de proteção, sendo uma de suas extremidades conectada diretamente ao sistema de teste, enquanto a outra permaneceu em condição flutuante, favorecendo a ocorrência de descargas do tipo corona. Os sensores utilizados foram o HFCT, posicionado no aterramento do cabo isolado, e o sensor HAS, instalado ao longo do cabo. O ensaio foi repetido três vezes em dias distintos, mantendo-se o mesmo arranjo experimental.

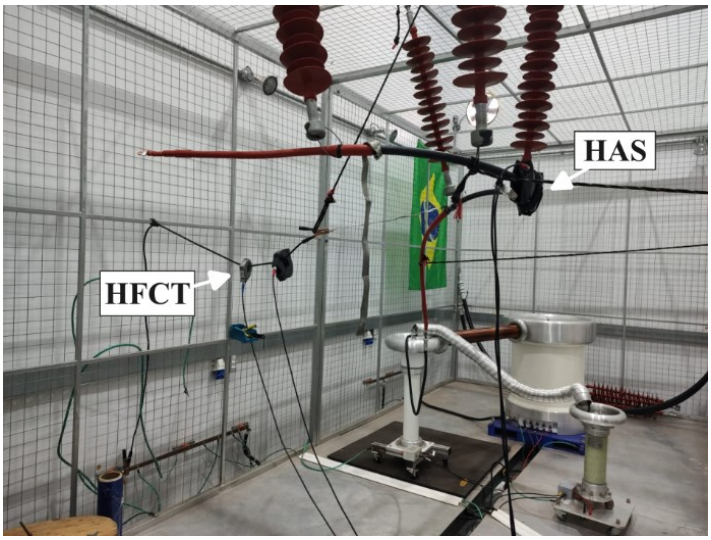
Figura 59 — Experimento 3 ensaio A, arranjo laboratorial.



Fonte: O autor.

- Ensaio B: com o objetivo de provocar descargas internas, utilizou-se o arranjo ilustrado na Figura 60. O cabo nº2 foi posicionado no interior da gaiola de proteção e conectado diretamente ao sistema de teste, uma vez que possui muflas instaladas. Foram utilizados o sensor HFCT no aterramento do cabo e o sensor HAS ao longo do condutor. O ensaio foi repetido três vezes em dias distintos, mantendo-se a mesma configuração experimental.

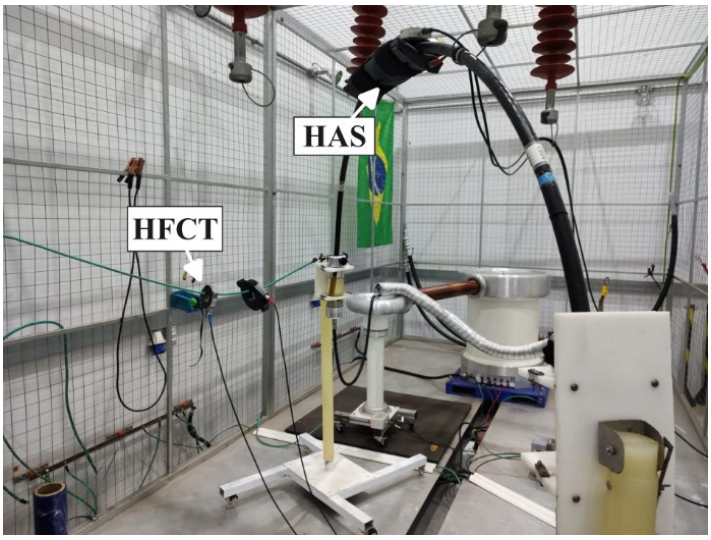
Figura 60 — Experimento 3 ensaio B, arranjo laboratorial.



Fonte: O autor.

- Ensaio C: para provocar descargas de superfície, utilizou-se o arranjo ilustrado na Figura 61. O cabo nº7 foi posicionado no interior da gaiola de proteção, com ambas as extremidades inseridas em terminais a óleo, com o objetivo de evitar a ocorrência de outros tipos de DPs. Os sensores utilizados foram o HFCT no aterramento do cabo isolado e o sensor HAS posicionado ao longo do cabo. O ensaio foi repetido três vezes em dias distintos.

Figura 61 — Experimento 3 ensaio C, arranjo laboratorial.



Fonte: O autor.

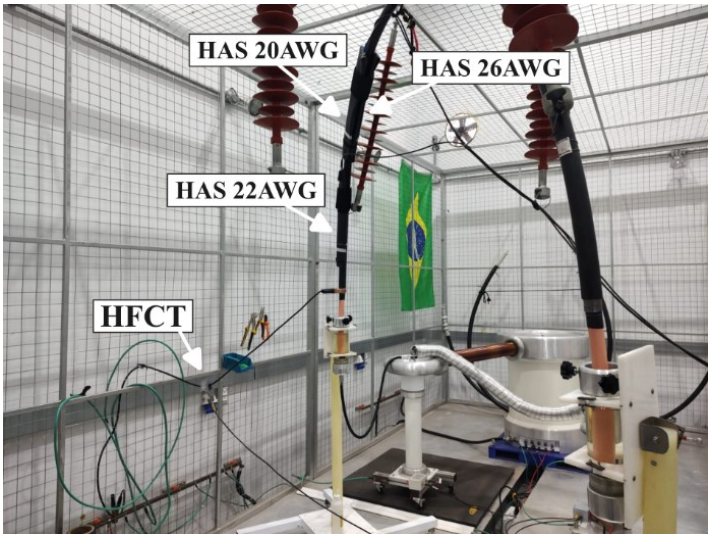
3.6.4 Experimento 4 — Cabo com blindagem de chumbo com o sensor HAS

O **Experimento 4** teve como objetivo verificar se o sensor HAS é capaz de detectar pulsos de DPs em cabos que possuem blindagem metálica de chumbo, em contraste com os cabos convencionais que utilizam blindagem em malha de cobre.

Para isso, utilizou-se o cabo nº4, devidamente posicionado no interior da gaiola de proteção, conforme ilustrado na Figura 62. Ambas as extremidades do cabo foram inseridas em terminais a óleo, com o objetivo de evitar a ocorrência de descargas do tipo corona.

Os sensores empregados foram o HFCT, instalado no aterramento do cabo isolado, e três sensores HAS com elemento ressonante passivo de 12,5 metros de comprimento, porém com diferentes seções transversais do condutor: 20, 22 e 26 AWG. O ensaio foi repetido três vezes em dias distintos, mantendo-se o mesmo arranjo experimental.

Figura 62 — Experimento 4, arranjo laboratorial.



Fonte: O autor.

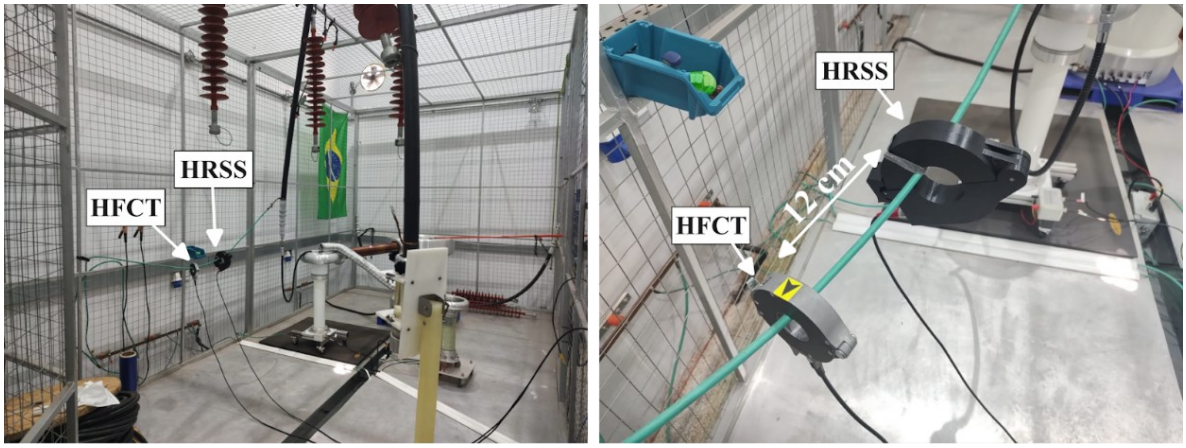
3.6.5 Experimento 5 — Teste de sensibilidade do sensor HRSS

O **Experimento 5** teve como objetivo avaliar a capacidade do sensor HRSS de detectar pulsos de DPs em cabos isolados. Para isso, foram realizados três ensaios em dias distintos, mantendo-se o mesmo arranjo experimental.

Nos ensaios, utilizou-se o cabo nº3, posicionado no interior da gaiola de proteção, conforme ilustrado na Figura 63. Para a execução do experimento, foi necessário inserir a

extremidade do cabo que não possuía mufla em um terminal a óleo, com o objetivo de evitar a ocorrência de descargas do tipo corona. Os sensores utilizados foram o HFCT e o sensor HRSS, ambos posicionados no aterramento do cabo isolado. Manteve-se uma distância aproximada de 12 cm entre os sensores, com o objetivo de minimizar os efeitos de indutância mútua.

Figura 63 — Experimento 5, (a) arranjo laboratorial, (b) posicionamento sensores.

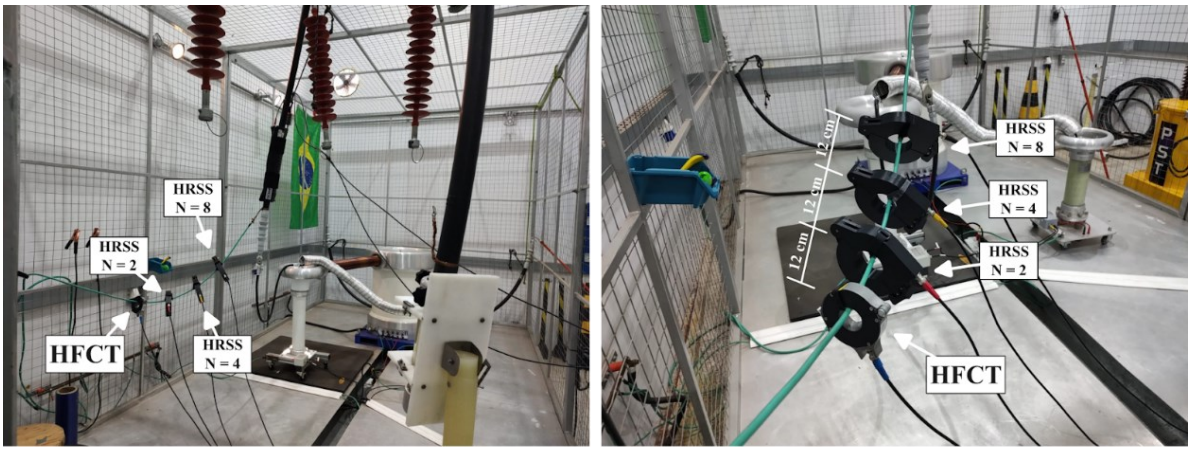


Fonte: O autor.

3.6.6 Experimento 6 — Otimização do sensor HRSS

O **Experimento 6** teve como objetivo determinar a configuração mais adequada do número de espiras da bobina do sensor HRSS para detectar pulsos de DPs. Com esse propósito, foram realizados três ensaios em dias distintos, mantendo-se o mesmo arranjo experimental. Utilizou-se o cabo nº3, posicionado no interior da gaiola de proteção, conforme ilustrado na Figura 64. A extremidade do cabo que não possuía mufla foi conectada a um terminal a óleo. Os sensores utilizados foram o HFCT e três sensores HRSS configurados com duas, quatro e oito espiras, respectivamente. Todos os sensores foram posicionados no aterramento do cabo isolado, mantendo-se a mesma distância entre eles.

Figura 64 — Experimento 6, (a) arranjo laboratorial, (b) posicionamento sensores.



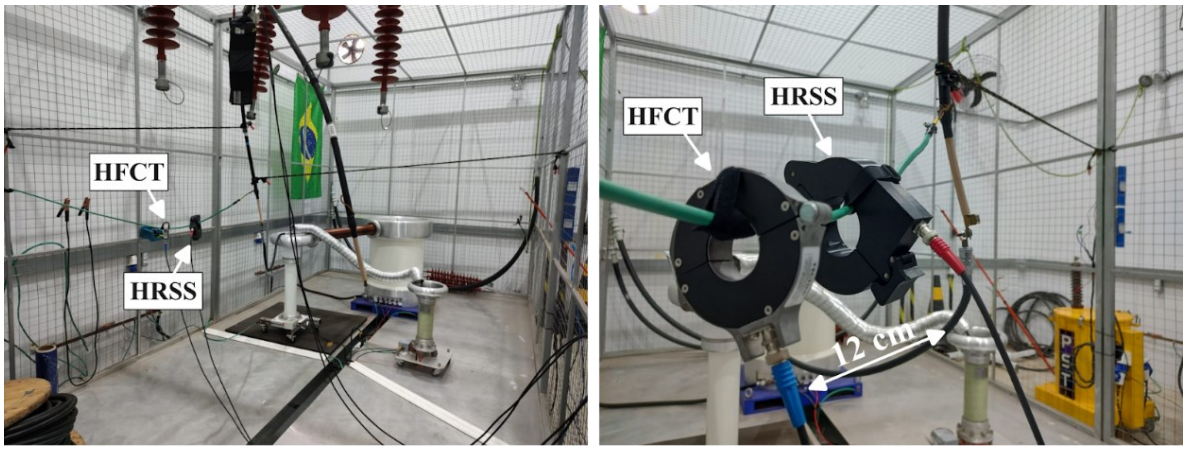
Fonte: O autor

3.6.7 Experimento 7 — Tipos de DPs detectadas pelo sensor HRSS

O **Experimento 7** teve como objetivo verificar se o sensor HRSS apresenta capacidade não apenas de detectar pulsos de DPs, mas também de apresentar resposta espectral coerente para diferentes tipos de DPs. Para isso, foram selecionados três cabos isolados contendo defeitos capazes de reproduzir os principais tipos de DPs (corona, internas e de superfície). As amostras utilizadas foram os cabos nº2, nº6 e nº7.

- Ensaio A: para provocar descargas do tipo corona, utilizou-se o arranjo ilustrado na Figura 65. O cabo nº6 foi posicionado no interior da gaiola de proteção, sendo uma extremidade conectada diretamente ao sistema de teste, enquanto a outra permaneceu flutuante. Os sensores utilizados foram o HFCT e o sensor HRSS, ambos posicionados no aterramento do cabo isolado. O ensaio foi repetido três vezes em dias distintos.

Figura 65 — Experimento 7 ensaio A, (a) arranjo laboratorial, (b) posicionamento sensores.



Fonte: O autor.

- Ensaio B: para provocar descargas internas, utilizou-se o cabo nº2, posicionado no interior da gaiola de proteção e conectado diretamente ao sistema de teste, uma vez que possui muflas instaladas, conforme ilustrado na Figura 66. Os sensores utilizados foram o HFCT e o HRSS no aterramento do cabo isolado. O ensaio foi repetido três vezes em dias distintos.

Figura 66 — Experimento 7 ensaio B, (a) arranjo laboratorial, (b) posicionamento sensores.

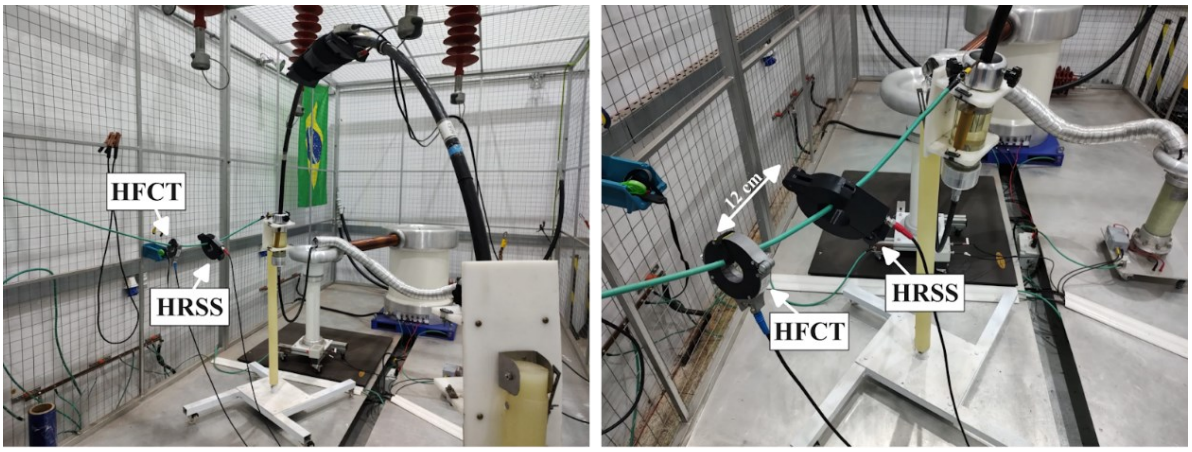


Fonte: O autor.

- Ensaio C: para provocar descargas de superfície, utilizou-se o cabo nº7, com ambas as extremidades conectadas em terminal a óleo, conforme ilustrado na Figura 67, com o objetivo de evitar a ocorrência de outros tipos de DPs. Os sensores utilizados foram o

HFCT e o HRSS no aterramento do cabo isolado. O ensaio foi repetido três vezes em dias distintos.

Figura 67 — Experimento 7 ensaio C, (a) arranjo laboratorial, (b) posicionamento sensores.



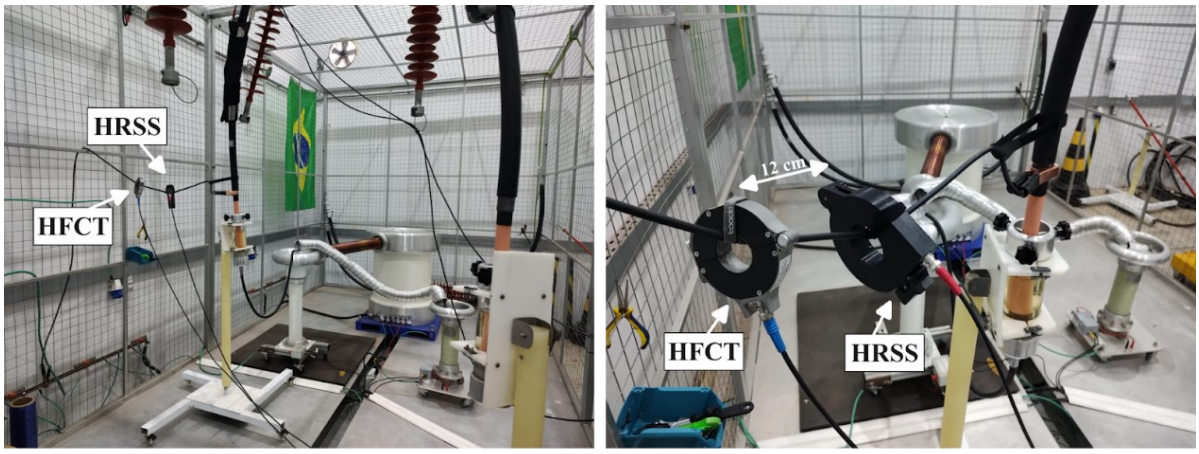
Fonte: O autor.

3.6.8 Experimento 8 — cabo com blindagem de chumbo com o sensor HRSS

O **Experimento 8** teve como objetivo verificar se o sensor HRSS apresenta capacidade de detectar pulsos de DPs em cabos que possuem blindagem metálica de chumbo, em contraste com os cabos convencionais que utilizam blindagem em malha de cobre.

Para isso, utilizou-se o cabo nº4, posicionado no interior da gaiola de proteção, conforme ilustrado na Figura 68. Ambas as extremidades do cabo foram inseridas em terminais a óleo, com o objetivo de evitar a ocorrência de descargas do tipo corona. Os sensores utilizados foram o HFCT e o HRSS, ambos posicionados no aterramento do cabo isolado. O ensaio foi repetido três vezes em dias distintos, mantendo-se o mesmo arranjo experimental.

Figura 68 — Experimento 8, (a) arranjo laboratorial, (b) posicionamento sensores.



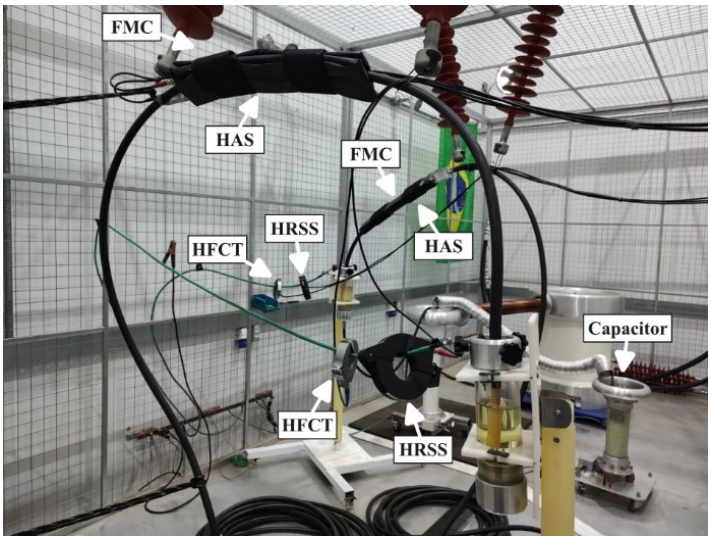
Fonte: O autor.

3.6.9 Experimento 9 — Ensaios em cabo de maior extensão

O **Experimento 9** teve como objetivo avaliar a capacidade dos sensores HAS e HRSS de detectar pulsos de DPs em um cabo de maior extensão. Para isso, foram realizados seis ensaios utilizando o cabo nº8, que possui comprimento estimado de 180 metros. Como o cabo não possuía muflas instaladas, foi necessária a utilização de terminais a óleo para sua conexão ao sistema de teste. Os ensaios foram realizados considerando duas configurações de aterramento, a primeira com ambas as extremidades aterradas e a segunda com apenas uma das extremidades aterradas. Essa abordagem foi adotada com o objetivo de avaliar possíveis interferências associadas ao efeito Ferranti.

- Ensaio A: seguindo o arranjo ilustrado na Figura 69, o cabo nº8 foi posicionado no interior da gaiola de proteção utilizando a primeira configuração de aterramento. Os sensores foram instalados em ambas as extremidades do cabo, denominadas PA e PB, sendo PA o lado conectado ao sistema de teste e PB o lado oposto. Ao todo foram utilizados nove sensores. Em PA foram instalados: um HFCT e um HRSS no aterramento, um sensor FMC e um sensor HAS na superfície do cabo, além de um capacitor conectado junto ao sistema de teste. Em PB foram utilizados os mesmos sensores, com exceção do capacitor. O ensaio foi repetido três vezes em dias distintos.

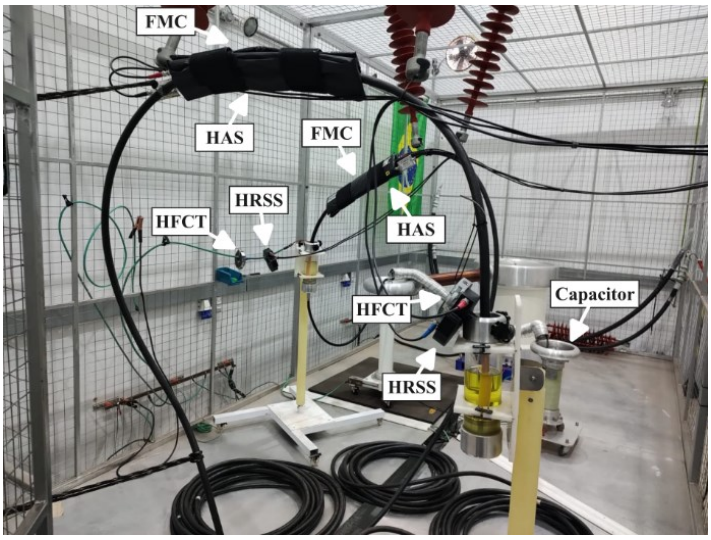
Figura 69 — Experimento 9 ensaio A, arranjo laboratorial.



Fonte: O autor.

- Ensaio B: manteve-se o mesmo arranjo experimental do Ensaio A, porém utilizando a segunda configuração de aterramento, conforme ilustrado na Figura 70. O ensaio também foi repetido três vezes em dias distintos, mantendo-se a mesma disposição dos sensores.

Figura 70 — Experimento 9 ensaio B, arranjo laboratorial.



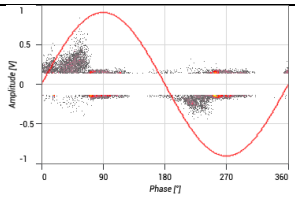
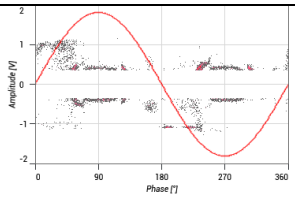
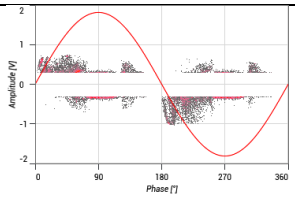
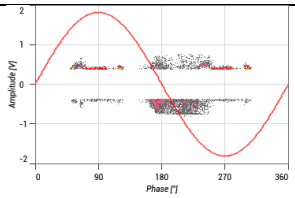
Fonte: O autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

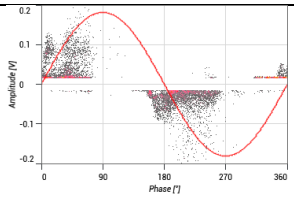
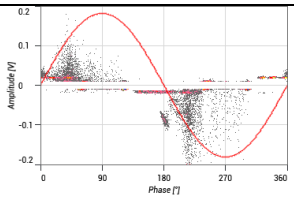
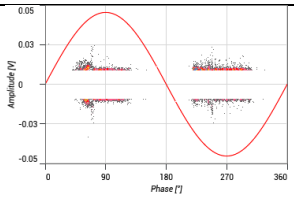
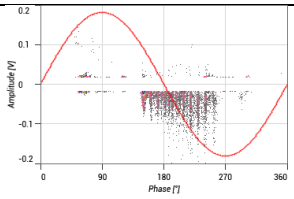
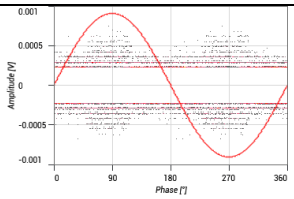
Neste Capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados neste trabalho. Para a avaliação quantitativa do desempenho dos sensores e da qualidade das estimativas obtidas nos diferentes arranjos experimentais, foram empregadas métricas estatísticas, incluindo a Raiz do Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error*, RMSE), o Erro Médio Absoluto (*Mean Absolute Error*, MAE), o Viés (Bias) e a variância (S^2). Essas métricas possibilitam quantificar a magnitude dos erros, identificar tendências sistemáticas nas estimativas e avaliar a dispersão dos resultados, fornecendo uma base objetiva para a comparação do desempenho dos sensores e das diferentes configurações experimentais investigadas. O panorama geral dos ensaios é sintetizado na Tabela 10, enquanto a análise mais detalhada dos resultados é desenvolvida nas Seções subsequentes, organizadas de acordo com os tipos de sensor, objetivos propostos e os diferentes arranjos experimentais investigados.

Tabela 10 — Síntese dos experimentos e principais resultados e discussão.

(continua)

Experimento	Objetivo	Seção	Resultado gráfico	Discussão
1	Sensibilidade do HAS	4.1.1		O sensor HAS apresentou sensibilidade suficiente para detectar pulsos de DPs.
2	Otimização HAS	4.1.2		Antenas longas provocaram distorções nos pulsos de DPs capturado.
3	Tipos de DPs	4.1.3		o HAS apresentou sensibilidade na detectar os três principais tipos de pulsos de DPs.
4	Cabo com chumbo	4.1.4		O HAS foi capaz de capturar pulsos de DPs em cabos com blindagem metálica de chumbo.

(conclusão)

Experimento	Objetivo	Seção	Resultado gráfico	Discussão
5	Sensibilidade HRSS	4.2.1		o sensor HRSS apresentou sensibilidade para detectar pulsos de DPs.
6	Otimização HRSS	4.2.2		Números elevados de espiras provocam atenuação na forma de onda.
7	Tipos de DPs	4.2.3		O sensor HRSS mostrou-se sensível em detectar dos três principais tipos de pulsos de DPs.
8	Cabo com chumbo	4.2.4		O sensor HRSS mostrou-se sensível em detectar de pulsos de DPs em cabos com blindagem metálica de chumbo.
9	Cabo longo	4.3		os sensores propostos apresentaram sensibilidade para detectar DPs, mesmo a grandes distâncias defeito.

Fonte: O autor.

4.1 Resultados experimentais sensor HAS

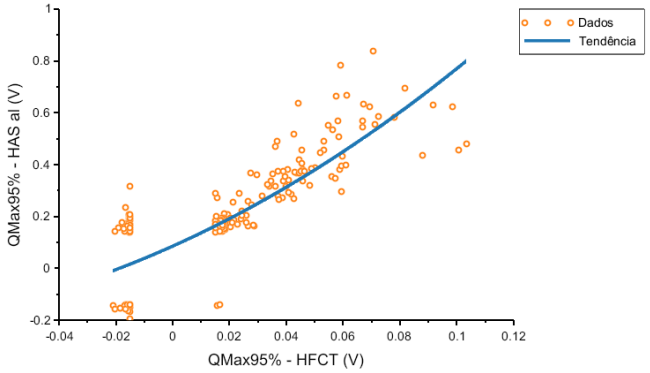
Esta Seção reúne os resultados mais expressivos do sensor HAS, fundamentados nos experimentos 1 a 4 detalhados no Capítulo 3. A consulta integral dos dados pode ser feita no Apêndice C.

4.1.1 Avaliação de funcionamento do sensor HAS

No Experimento 1, são analisados os sinais adquiridos pelo sensor HAS para verificar sua real capacidade diante de pulsos de DPs. Os principais resultados são apresentados na Tabela 13.

A partir dos dados obtidos, avaliam-se a distribuição dos pulsos e as características espectrais dos sinais. Conforme ilustrado na Figura 71, observa-se que a curva de tendência da métrica $QMax95\%$ entre os sensores HFCT e HAS, apresenta tendência positiva que é justificada pelo coeficiente de correlação de Pearson $r = 0{,}8002$, que aponta correlação forte entre os dois sensores.

Figura 71 — Experimento 1, distribuição dos pontos de QMax95% e reta tendência entre os sensores HAS e HFCT.



Fonte: O autor.

Por fim, as métricas de erro utilizadas na avaliação do desempenho do sensor são apresentadas na Tabela 11, permitindo quantificar sua relação com o sensor de referência.

Tabela 11 — Experimento 1, erro de medição do valor de QMax95% entre os sensores HFCT e HAS.

RMSE	MAE	Bias	S^2
0,1410443	0,0946557	0,0748459	0,0143314

Fonte: O autor.

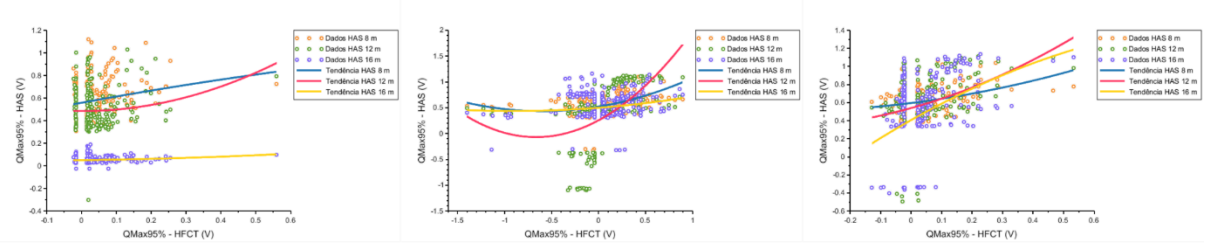
4.1.2 Otimização da geometria do sensor HAS

No Experimento 2, são analisados os efeitos da variação do comprimento e da seção transversal do elemento ressonante passivo do sensor HAS. Os resultados principais são apresentados na Tabela 14.

Com base nos dados coletados, avaliam-se a distribuição dos pulsos e os aspectos espectrais dos sinais. Conforme evidenciado na Figura 72, observa-se que a curva de tendência da métrica QMax95% apresenta comportamento crescente para todos os tipos de geometria, embora em diferentes magnitudes. Na Figura 72(a), nota-se que os sensores que empregam o material 20 AWG apresentam tendência fraca, ou seja $r < 0{,}5$, o que se justifica pelos

coeficientes de correlação de Pearson ($r = 0{,}1751$ para o sensor com elemento ressonante passivo de 8 m, $r = 0{,}1349$ para o de 12,5 m e $r = 0{,}1287$ para o de 16 m). Para os sensores que utilizam o material 22 AWG, observa-se tendência moderada, conforme ilustrado na Figura 72(b), evidenciada pelos coeficientes de correlação de Pearson ($r = 0{,}3469$ para o sensor de 8 m, $r = 0{,}4411$ para o de 12,5 m e $r = 0{,}1226$ para o de 16 m). No caso do material 26 AWG, a tendência apresenta-se como moderada a fraca, conforme mostrado na Figura 72(c), sendo explicada pelos coeficientes de correlação de Pearson ($r = 0{,}2833$ para o sensor de 8 m, $r = 0{,}2803$ para o de 12,5 m e $r = 0{,}3411$ para o de 16 m).

Figura 72 — Experimento 2, distribuição dos pontos de QMax95% e reta tendência dos sensores HAS com matérias (a) 20 AWG, (b) 22 AWG e (c) 26 AWG, e geometria de 8, 12,5 e 16 metros.



(a) (b) (c)

Fonte: O autor.

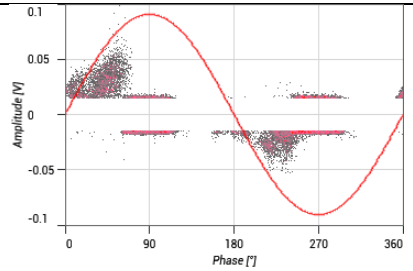
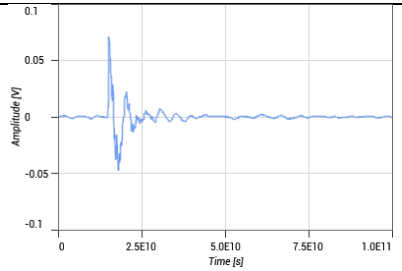
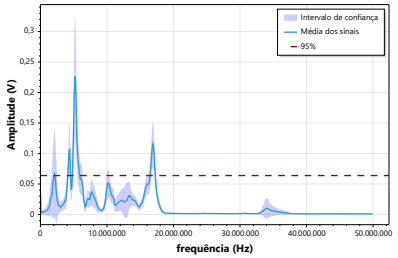
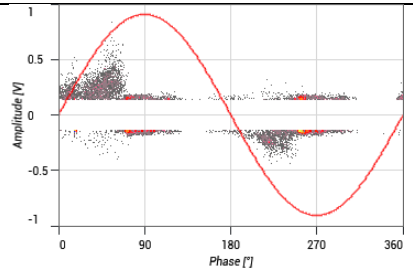
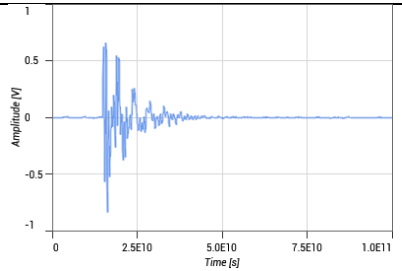
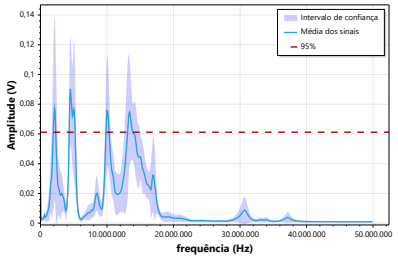
Por fim, as métricas de erro adotadas na avaliação do desempenho do sensor são apresentadas na Tabela 12, permitindo quantificar sua relação com o sensor de referência, Techimp HFCT *Clamp*.

Tabela 12 — Experimento 2, erro de medição do valor de QMax95% entre os sensores HAS com diferentes tipos de materiais e geometria.

Material (AWG)	Geometria	RMSE	MAE	Bias	S²
20	8	0,30718	0,2452865	0,2359766	0,0387823
	12,5	0,1483873	0,1133573	-0,0070608	0,0220301
	16	0,2447922	0,1982464	0,1416294	0,0399754
22	8	0,5167298	0,5004268	0,4990403	0,0180186
	12,5	0,2090461	0,1683883	0,015744	0,0435735
	16	0,4711813	0,4375665	0,4275993	0,0392798
26	8	0,2997638	0,2692506	0,2632337	0,0206236
	12,5	0,1835465	0,1320685	0,0851388	0,0265144
	16	0,3953824	0,3515663	0,3205602	0,0537176

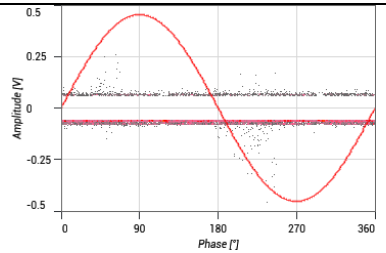
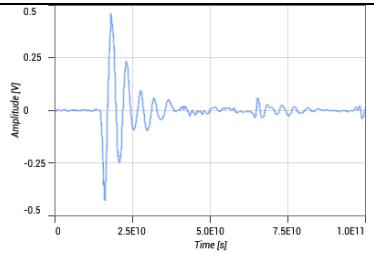
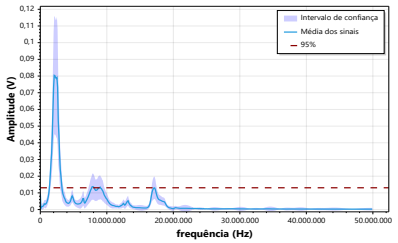
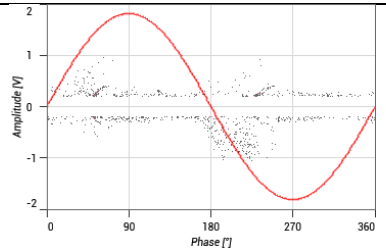
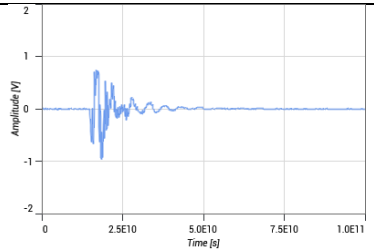
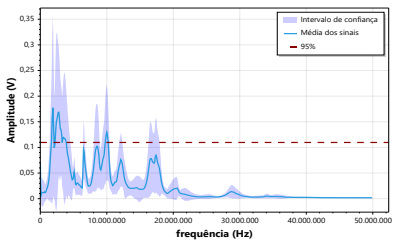
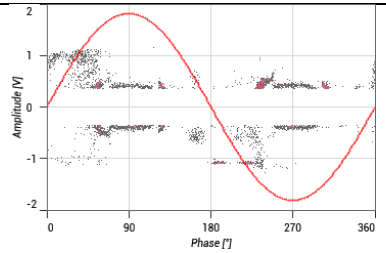
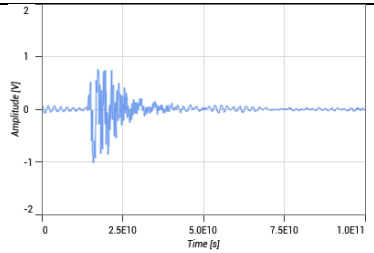
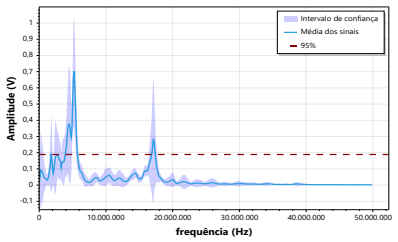
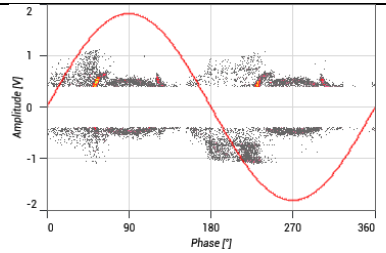
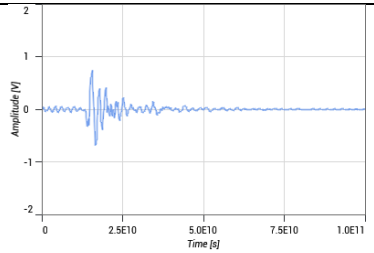
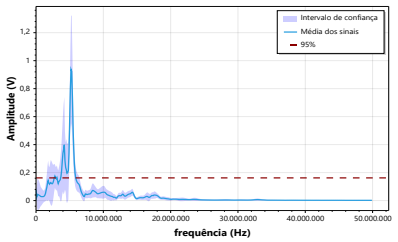
Fonte: O autor.

Tabela 13 — síntese do experimento 1 e principais resultados.

Sensores	PRPD	Forma de onda	FTT	QMax95%	Alfa	Beta
HFCT				0,0417	0,0263	2,8246
HAS				0,3266	0,2179	3,0710

Fonte: O autor.

Tabela 14 — síntese do experimento 2 e principais resultados.

Sensores	PRPD	Forma de onda	FTT	QMax95%	Alfa	Beta
HFCT				0,1009	0,06665	4,6246
HAS 12,5 m 20 AWG				0,7899	0,4575	2,191
HAS 12,5 m 22 AWG				1,0878	0,7588	2,57425
HAS 12,5 m 26 AWG				0,9885	0,66845	3,6504

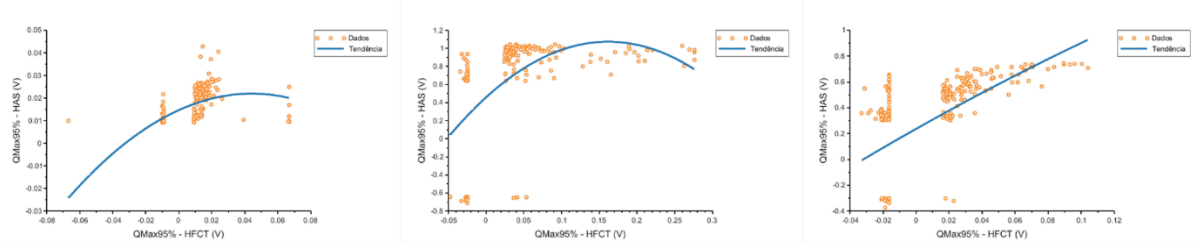
Fonte: O autor.

4.1.3 Avaliação da sensibilidade do sensor HAS em diferenciar tipos de DPs

No Experimento 3, os resultados permitem avaliar a resposta espectral do sensor HAS frente a diferentes tipos de DPs. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 17.

A partir dos dados analisados, examinam-se a distribuição dos pulsos e as propriedades espectrais dos sinais. Conforme apresentado na Figura 73, verifica-se que a curva de tendência da métrica QMax95% apresenta, para as DPs do tipo corona (Figura 73(a)), interna (Figura 73(b)) e de superfície (Figura 73(c)), um comportamento crescente e moderado, justificado pelos coeficientes de correlação de Pearson (r = 0,4017; r = 0,3538; r = 0,5710).

Figura 73 — Experimento 3, distribuição dos pontos de QMax95% e reta tendência dos sensores HAS diante de diferentes tipos de DPs, (a) corona, (b) interna e (c) superfície.



(a) **(b)** **(c)**

Fonte: O autor.

Por fim, as métricas de erro utilizadas na avaliação do desempenho do sensor são dispostas na Tabela 15, permitindo quantificar sua relação com o sensor de referência.

Tabela 15 — Experimento 3, erro de medição do valor de QMax95% entre os sensores HFCT e HAS.

Tipo de defeito	RMSE	MAE	Bias	S^2
Corona	0,3758051	0,3411274	-0,3348199	0,0292063
Interna	0,5762699	0,522811	0,5038438	0,0784464
Superfície	0,3758728	0,3256845	0,2985074	0,052319

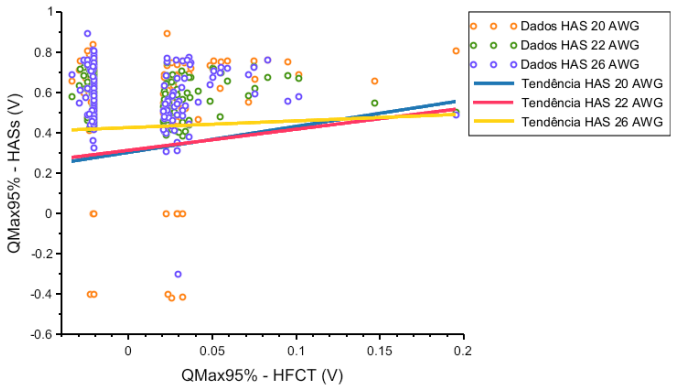
Fonte: O autor.

4.1.4 Verificação o desempenho do sensor HAS em cabo de média tensão com blindagem metálica de chumbo

Os resultados do Experimento 4 evidenciam o desempenho do sensor HAS em cabos com blindagem metálica de chumbo. Os resultados mais relevantes estão apresentados na Tabela 18.

Com base nos dados obtidos, analisam-se a distribuição dos pulsos e as características espectrais dos sinais. Conforme ilustrado na Figura 74, observa-se que a curva de tendência da métrica QMax95% apresenta comportamento aproximadamente constante, característico de uma reta com inclinação próxima de zero. Tal comportamento é corroborado pelos coeficientes de correlação de Pearson ($r = 0{,}0949$ para o HAS 20 AWG; $r = 0{,}0841$ para o HAS 22 AWG; $r = 0{,}0331$ para o HAS 26 AWG), os quais indicam correlação aproximadamente nula entre os sensores e sua referência.

Figura 74 — Experimento 4, distribuição de QMax95% e reta de tendência do sensor HAS para diferentes materiais em cabo com blindagem de chumbo.



Fonte: O autor.

Por fim, as métricas de erro empregadas na avaliação do desempenho do sensor são apresentadas na Tabela 16, permitindo quantificar sua relação com o sensor de referência.

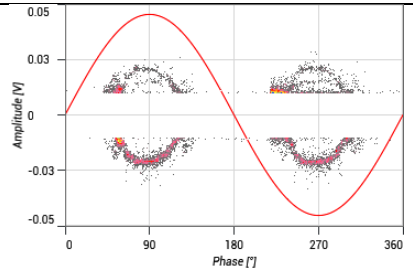
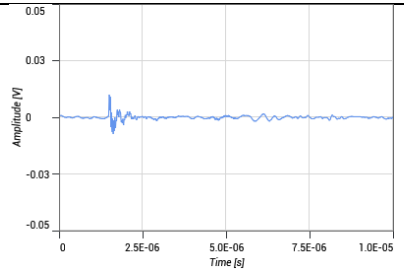
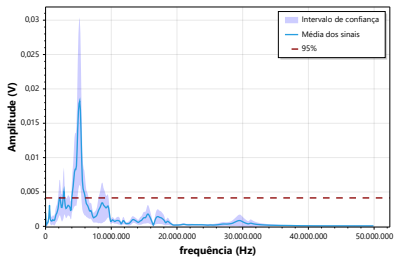
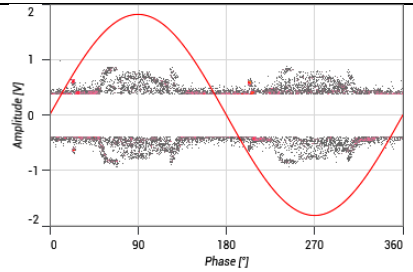
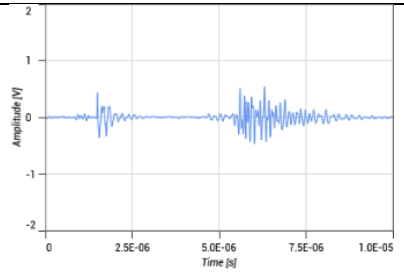
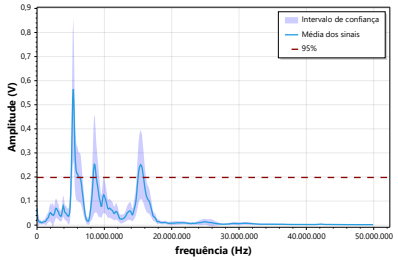
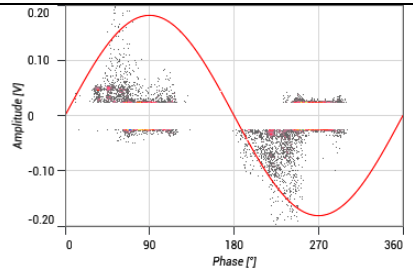
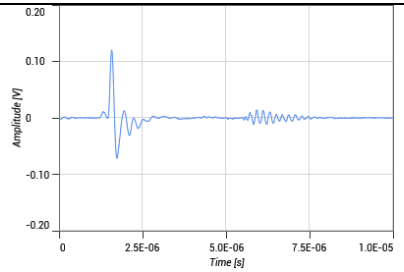
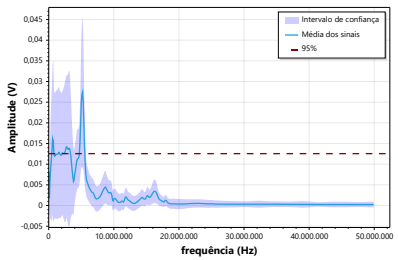
Tabela 16 — Experimento 4, erro de medição do valor de QMax95% entre os sensores HFCT e HAS em cabo com aterramento de chumbo.

Material (AWG)	RMSE	MAE	Bias	S^2
20	0,4670411	0,4037261	0,3931316	0,063752
22	0,5377315	0,4825104	0,4762758	0,0624901
26	0,5048964	0,4674074	0,4573873	0,0458446

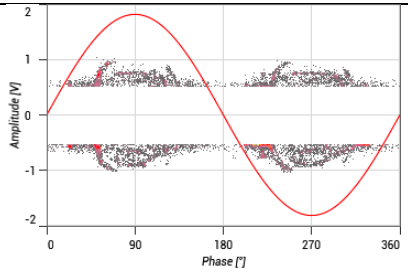
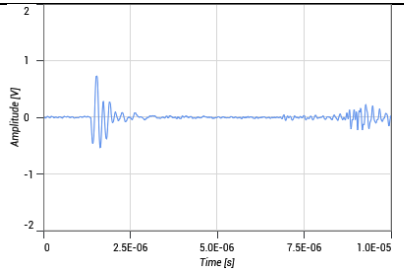
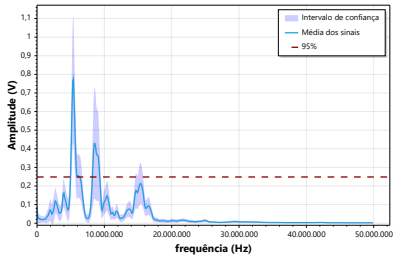
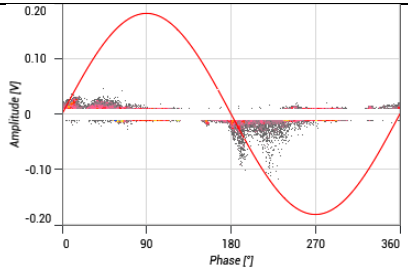
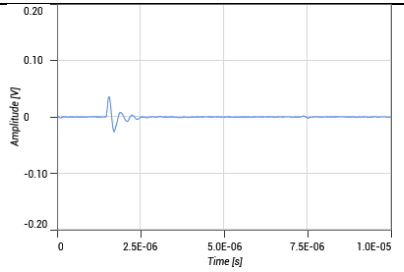
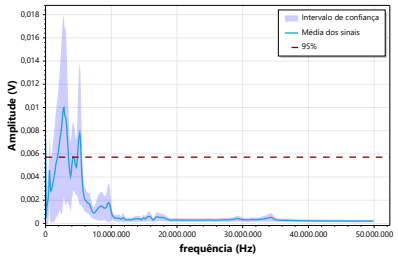
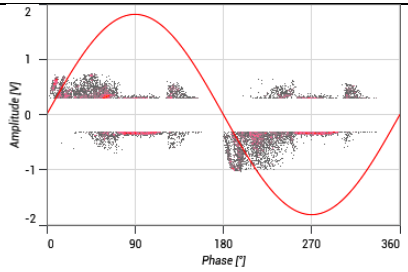
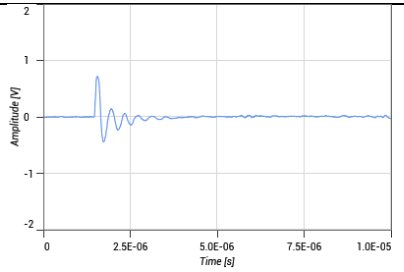
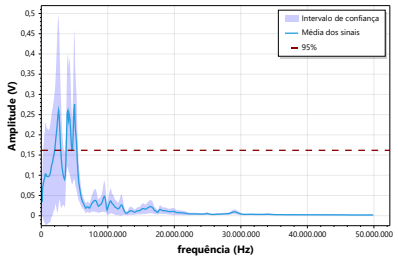
Fonte: O autor.

Tabela 17 — síntese dos experimentos 3 e principais resultados.

(continua)

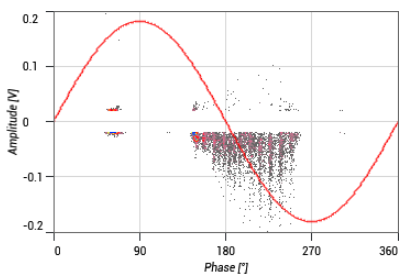
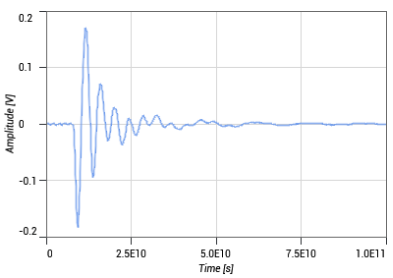
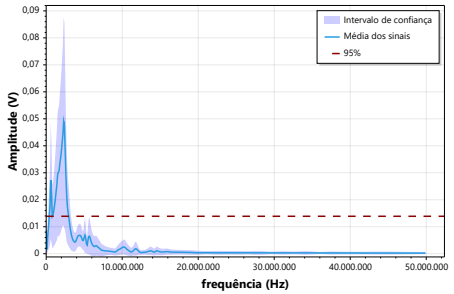
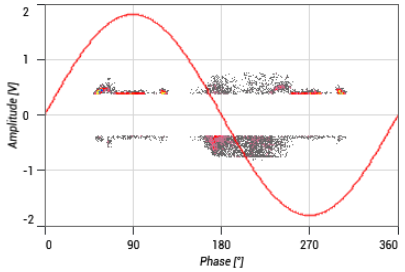
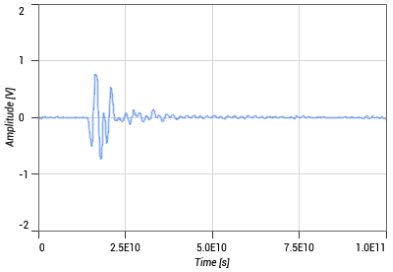
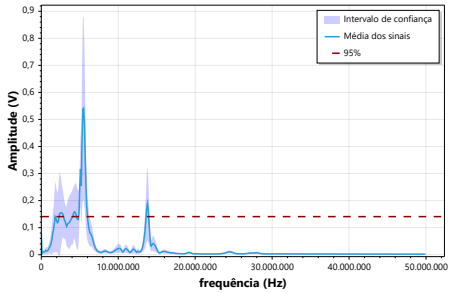
Tipo de DPs	Sensores	PRPD	Forma de onda	FTT	QMax95%	Alfa	Beta
Corona	HFCT				0,0324	0,0201	2,4983
	HAS				0,7809	0,53055	3,36525
Interna	HFCT				0,0958	0,04885	1,7534

(conclusão)

Tipo de DPs	Sensores	PRPD	Forma de onda	FTT	QMax95%	Alfa	Beta
Interna	**HAS**				0,8892	0,70875	5,6207
Superfície	**HFCT**				0,0216	0,0166	4,33005
	HAS				0,7538	0,5304	4,154

Fonte: O autor.

Tabela 18 — síntese do experimento 4 e principais resultados.

Sensores	PRPD	Forma de onda	FTT	QMax95%	Alfa	Beta
HFCT				0,0890	0,0464	1,8231
HAS				0,6680	0,5502	5,0993

Fonte: O autor.

4.2 Resultados experimentais sensor HRSS

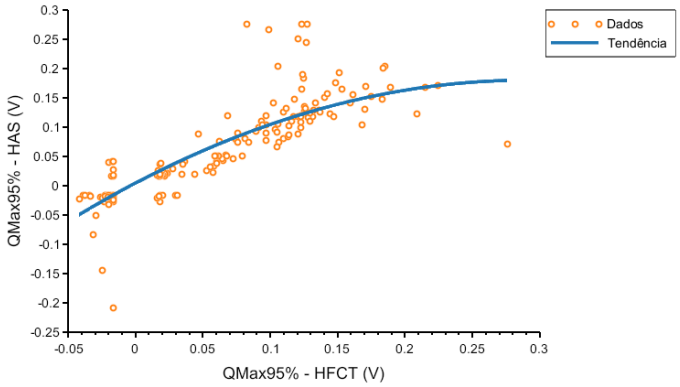
Quanto ao sensor HRSS, apresentam-se a seguir os dados mais relevantes derivados dos experimentos 5 a 8 detalhados no Capítulo 3. A totalidade dos resultados obtidos encontra-se compilada no Apêndice D.

4.2.1 Avaliação de funcionamento do sensor HRSS

No Experimento 5, são analisados os sinais adquiridos pelo sensor HRSS para detectar pulsos de DPs em cabos isolados. Os principais resultados encontram-se na Tabela 21.

A partir dos dados obtidos, avaliam-se a distribuição dos pulsos e as características espectrais dos sinais. Conforme indicado na Figura 75, verifica-se que a curva de tendência da métrica QMax95% apresenta tendência positiva que é justificada pelo coeficiente de correlação de Pearson $r = 0{,}8182$, que aponta correlação forte entre os dois sensores.

Figura 75 — Experimento 5, distribuição dos pontos de QMax95% e reta tendência entre os sensores HRSS e HFCT.



Fonte: O autor.

Por fim, apresentam-se na Tabela 19 as métricas de erro utilizadas na avaliação do desempenho do sensor, permitindo quantificar sua relação com o sensor de referência.

Tabela 19 — Experimento 5, erro de medição do valor de QMax95% entre os sensores HFCT e HRSS.

RMSE	MAE	Bias	S^2
0,2929036	0,2766139	0,2716173	0,01205

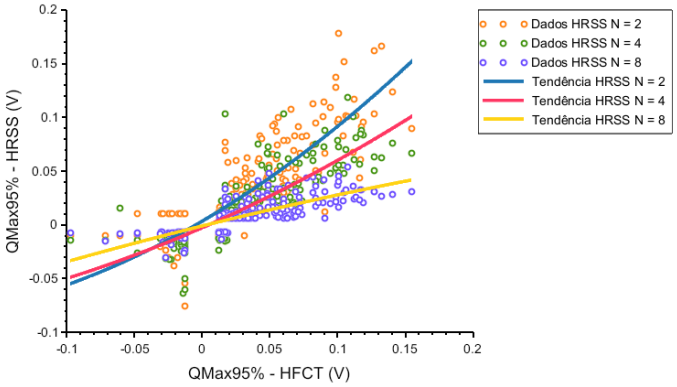
Fonte: O autor.

4.2.2 Otimização da relação de espiras do sensor HRSS

No Experimento 6, são apresentados os resultados associados à variação do número de espiras do sensor HRSS, permitindo avaliar sua influência na aquisição dos sinais. Os resultados principais são apresentados na Tabela 22.

Com base nos dados obtidos, examinam-se a distribuição dos pulsos e as propriedades espectrais dos sinais. Conforme mostrado na Figura 76Figura 76 — Experimento 6, distribuição dos pontos de QMax95% e reta tendência dos sensores HRSS com diferentes relações de enrolamento., observa-se que a curva de tendência da métrica QMax95% apresenta, para ambos os sensores, comportamento crescente, o qual é corroborado pelos coeficientes de correlação de Pearson ($r = 0{,}8610$ para $N = 2$; $r = 0{,}8332$ para $N = 4$; $r = 0{,}8139$ para $N = 8$), indicando forte correlação entre os sensores e sua referência.

Figura 76 — Experimento 6, distribuição dos pontos de QMax95% e reta tendência dos sensores HRSS com diferentes relações de enrolamento.



Fonte: O autor.

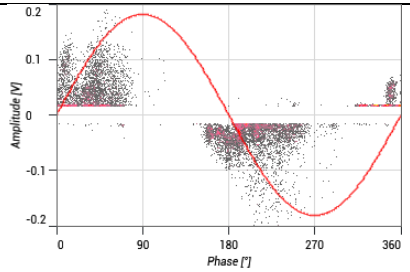
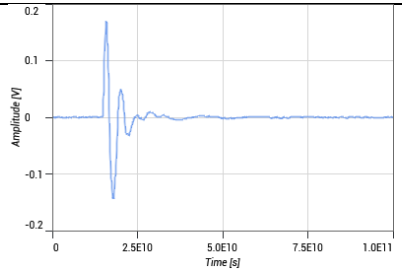
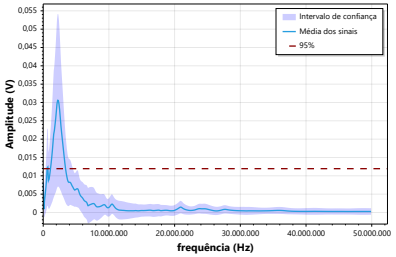
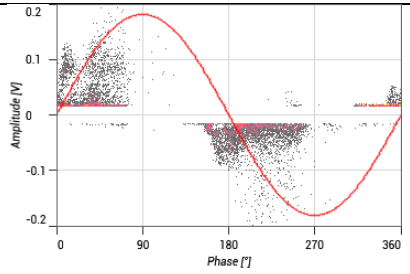
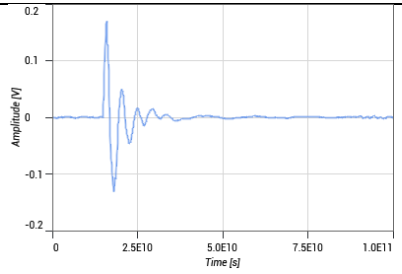
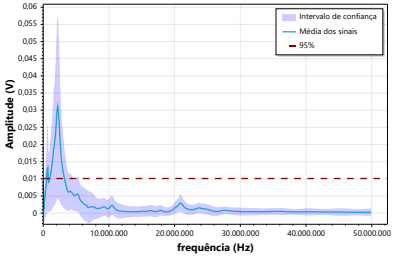
Por fim, as métricas de erro utilizadas na avaliação do desempenho do sensor são apresentadas na Tabela 20, permitindo quantificar sua relação com o sensor de referência.

Tabela 20 — Experimento 6, erro de medição do valor de QMax95% entre os sensores HRSS com diferente relação de enrolamento.

Sensor	RMSE	MAE	Bias	S^2
HRSS N = 2	0,115333	0,0987986	-0,0833545	0,0063714
HRSS N = 4	0,1072186	0,0834113	-0,0602044	0,0078932
HRSS N = 8	0,1074053	0,084763	-0,0445424	0,0095785

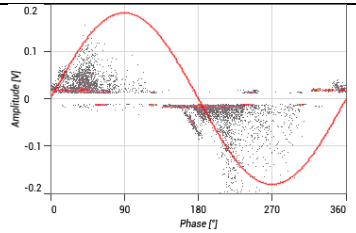
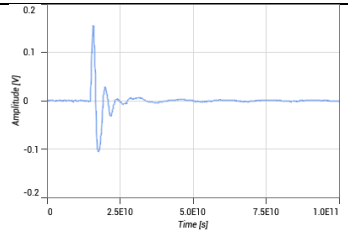
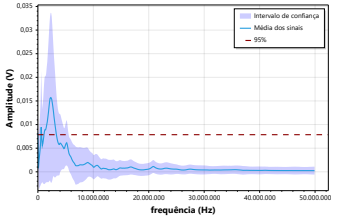
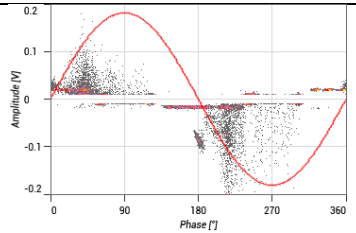
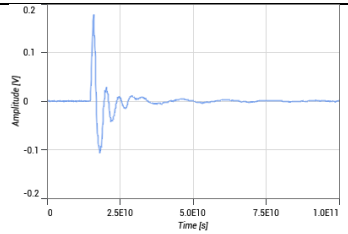
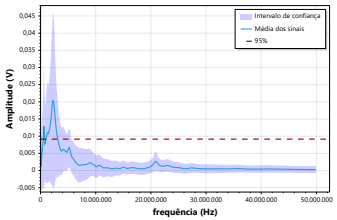
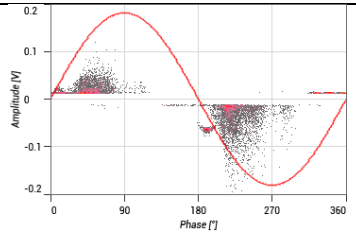
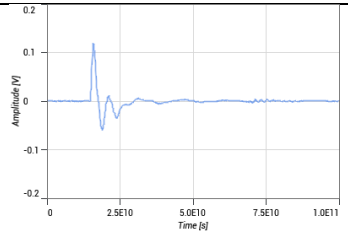
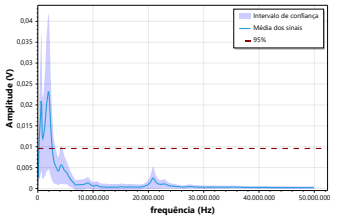
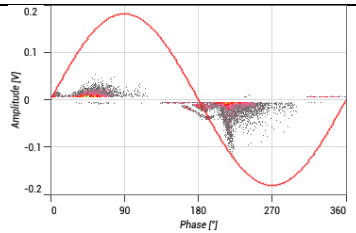
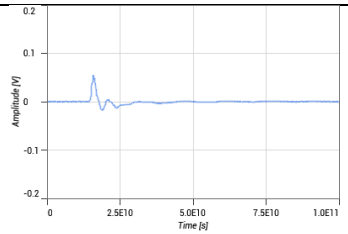
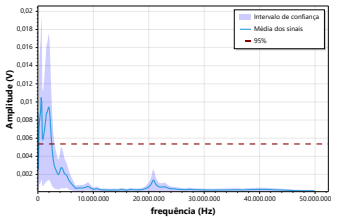
Fonte: O autor.

Tabela 21 — síntese dos experimentos 5 e principais resultados.

Sensores	PRPD	Forma de onda	FTT	QMax95%	Alfa	Beta
HFCT				0,102	0,0446	1,54965
HRSS				0,0988	0,03965	1,45325

Fonte: O autor.

Tabela 22 — síntese dos experimentos 6 e principais resultados.

Sensores	PRPD	Forma de onda	FTT	QMax95%	Alfa	Beta
HFCT				0,0729	0,0297	1,50275
HRSS N = 2				0,1009	0,0341	1,3781
HRSS N = 4				0,0804	0,0351	1,7344
HRSS N = 8				0,0426	0,0164	1,72845

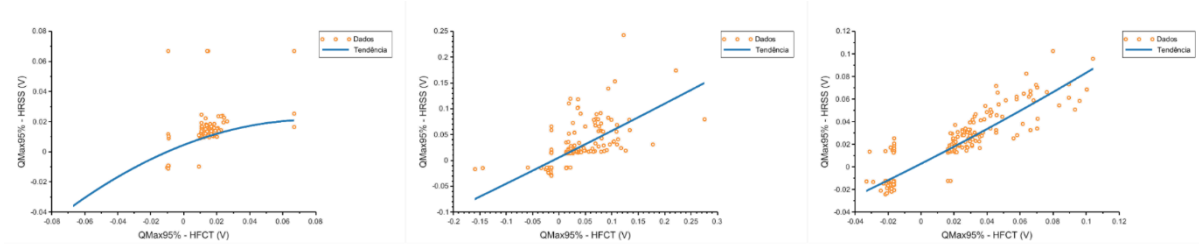
Fonte: O autor.

4.2.3 Avaliação da sensibilidade do sensor HRSS em diferenciar tipos de DPs

O Experimento 7 avalia a resposta do sensor HRSS frente a diferentes tipos de DPs. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 25.

A partir dos dados analisados, examinam-se a distribuição dos pulsos e as propriedades espectrais dos sinais. Conforme apresentado na Figura 77, verifica-se que a curva de tendência da métrica QMax95% apresenta, para as DPs do tipo corona (Figura 77(a)), interna (Figura 77(b)) e de superfície (Figura 77(c)), um comportamento crescente e moderado, justificado pelos coeficientes de correlação de Pearson ($r = 0{,}4158$; $r = 0{,}6546$; $r = 0{,}8706$).

Figura 77 — Experimento 7, distribuição dos pontos de QMax95% e reta tendência dos sensores HRSS diante de diferentes tipos de DPs, (a) corona, (b) interna e (c) superfície.



(a) **(b)** **(c)**

Fonte: O autor.

Por fim, apresentam-se na Tabela 23 as métricas de erro utilizadas na avaliação do desempenho do sensor, permitindo quantificar sua relação com o sensor de referência.

Tabela 23 — Experimento 7, erro de medição do valor de QMax95% entre os sensores HFCT e HRSS.

Tipo de defeito	RMSE	MAE	Bias	S^2
Corona	0,344907	0,332898	-0,3217911	0,0154542
Interna	0,2566124	0,2476888	-0,2423977	0,0071131
Superfície	0,0955283	0,0672862	-0,0221119	0,0086608

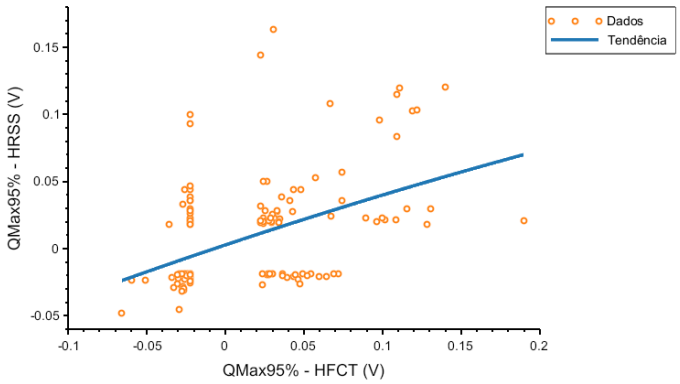
Fonte: O autor.

4.2.4 Verificação o desempenho do sensor HRSS em cabo de média tensão com blindagem metálica de chumbo

No Experimento 8, são apresentados os resultados obtidos para o sensor HRSS em cabos com blindagem metálica de chumbo. Os principais resultados encontram-se na Tabela 26.

Com base nos dados obtidos, analisam-se a distribuição dos pulsos e as propriedades espectrais dos sinais. Conforme apresentado na Figura 78, observa-se que a curva de tendência da métrica QMax95% apresenta comportamento crescente e aproximadamente linear. Tal comportamento é corroborado pelos coeficientes de correlação de Pearson $r = 0{,}4333$, o qual indicam correlação moderada e positiva entre o sensor e sua referência.

Figura 78 — Experimento 8, distribuição de QMax95% e reta de tendência do sensor HRSS em cabo com blindagem de chumbo.



Fonte: O autor.

Por fim, as métricas de erro utilizadas na avaliação do desempenho do sensor são apresentadas na Tabela 24, permitindo quantificar sua relação com o sensor de referência.

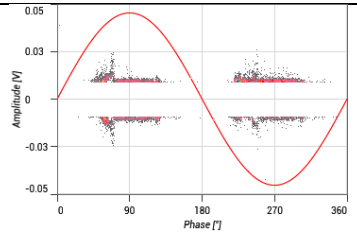
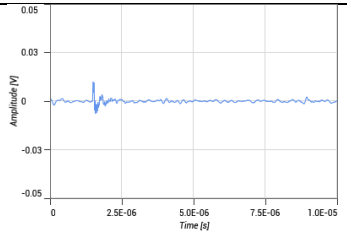
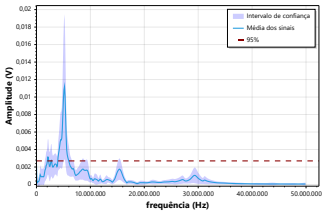
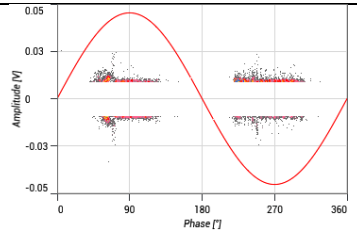
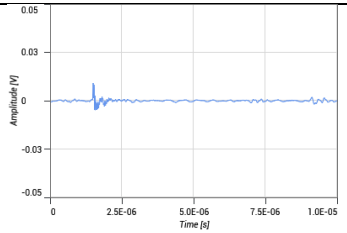
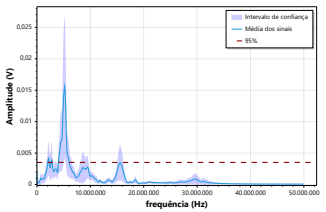
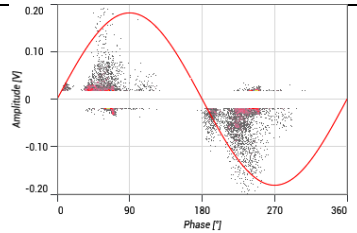
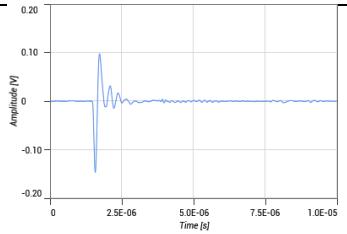
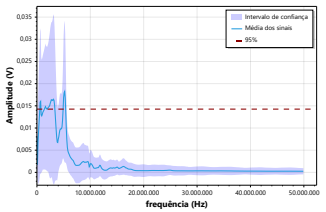
Tabela 24 — Experimento 8, erro de medição do valor de QMax95% entre os sensores HFCT e HRSS em cabo com aterramento de chumbo.

RMSE	MAE	Bias	S²
0,1441284	0,089591	-0,0325609	0,0197677

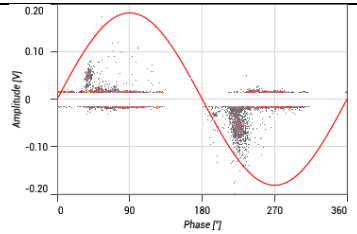
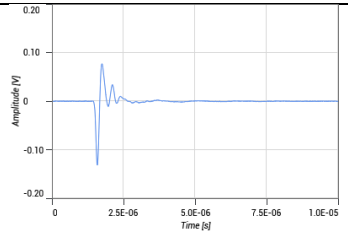
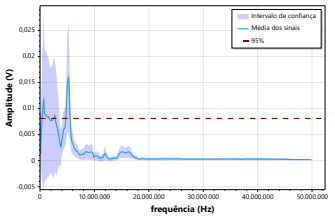
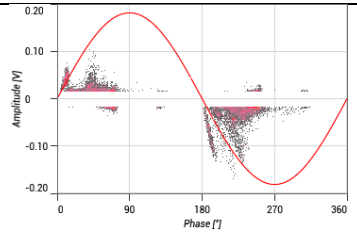
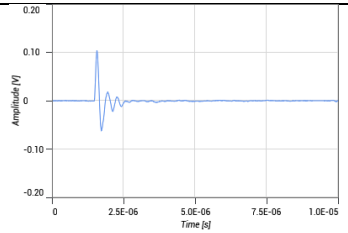
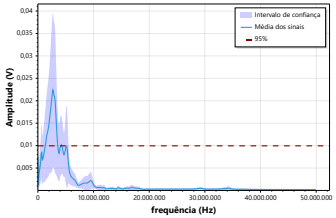
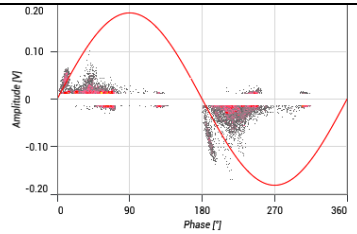
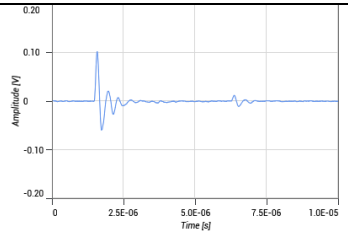
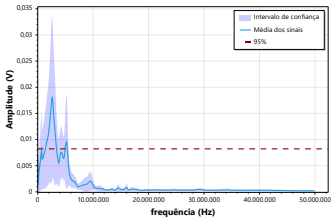
Fonte: O autor.

Tabela 25 — síntese dos experimentos 7 e principais resultados.

(continua)

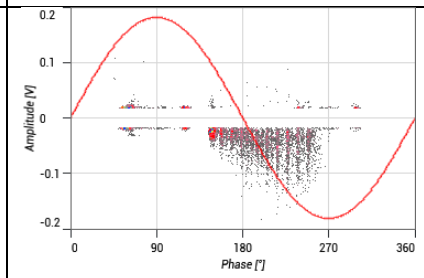
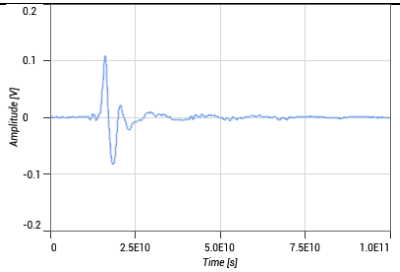
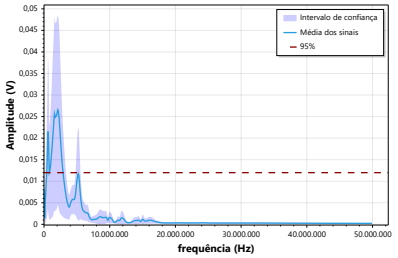
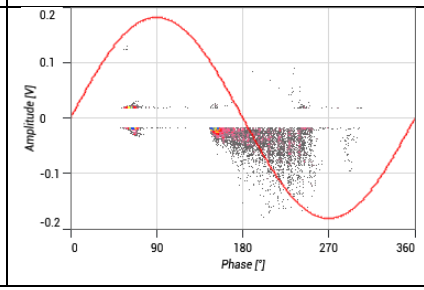
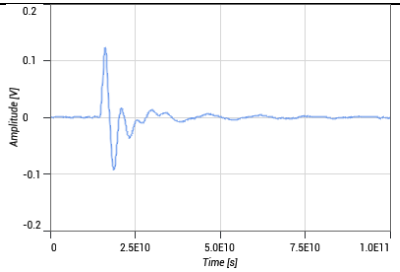
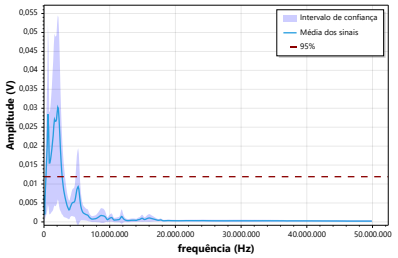
Tipo de DPs	Sensores	PRPD	Forma de onda	FTT	QMax95%	Alfa	Beta
Corona	HFCT				0,0128	0,01095	3,9677
	HRSS				0,0206	0,01565	3,7929
Interna	HFCT				0,1037	0,04385	1,5583

(conclusão)

Tipo de DPs	Sensores	PRPD	Forma de onda	FTT	QMax95%	Alfa	Beta
Interna	**HRSS**				0,0642	0,0376	1,7837
Superfície	**HFCT**				0,0863	0,037	1,96545
	HRSS				0,0685	0,031	1,776

Fonte: O autor.

Tabela 26 — síntese dos experimentos 8 e principais resultados.

Sensores	PRPD	Forma de onda	FTT	QMax95%	Alfa	Beta
HFCT				0,0756	0,03165	2,62695
HRSS				0,0804	0,03205	1,89465

Fonte: O autor.

4.3 Resultados experimentais cabo de maior extensão

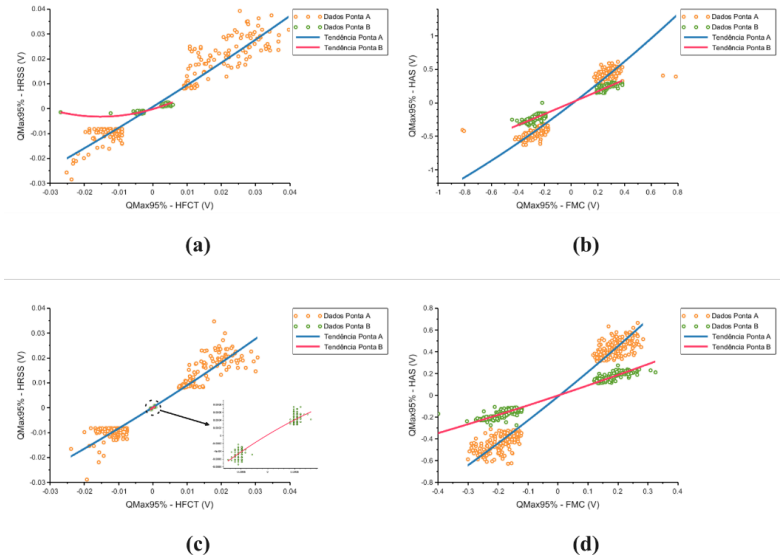
Por fim, são apresentados os resultados obtidos em condições mais próximas da aplicação prática, considerando cabos de maior extensão. No Experimento 9, são analisados os sinais adquiridos pelos sensores HAS e HRSS em um cabo de maior extensão, sob diferentes configurações de aterramento. Os resultados mais relevantes são apresentados na Tabela 28. Informações detalhadas encontram-se dispostas no Apêndice E.

A partir dos dados obtidos, avaliam-se a distribuição dos pulsos e as características espectrais dos sinais. Conforme evidenciado na Figura 79, a curva de tendência da métrica QMax95% apresenta padrão crescente em todos os cenários, confirmado pelos coeficientes de correlação de Pearson.

No cenário em que o cabo de maior extensão foi aterrado em ambas as terminações, observa-se comportamento crescente do sensor HRSS em relação ao HFCT (Figura 79(a)), com r = 0,9225 em PA e r = 0,9370 em PB. O sensor HAS, comparado ao FMC (Figura 79(b)), apresenta comportamento semelhante, com r = 0,9870 em PA e r = 0,9678 em PB.

Quando o cabo foi aterrado apenas em PA, o padrão crescente se mantém para o sensor HRSS em relação ao HFCT (Figura 79(c)), com r = 0,9716 em PA e r = 0,9462 em PB, e para o sensor HAS, comparado ao FMC (Figura 79(d)), com r = 0,9863 em PA e r = 0,9821 em PB.

Figura 79 — Experimento 9, distribuição de QMax95% e reta de tendência do sensor HRSS em cabo de maior extensão: (a) HRSS e HFCT com ambas as extremidades aterradas; (b) FMC e HAS com ambas as extremidades aterradas; (c) HRSS e HFCT com apenas uma extremidade aterrada; (d) FMC e HAS com apenas uma extremidade aterrada.



Fonte: O autor.

Por fim, apresentam-se na Tabela 27 as métricas de erro utilizadas na avaliação do desempenho do sensor, permitindo quantificar sua relação com o sensor de referência.

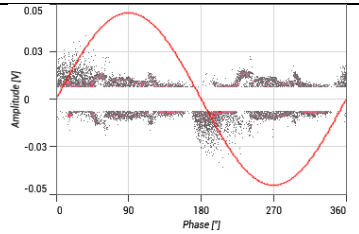
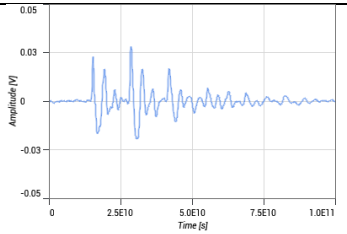
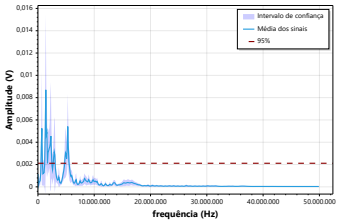
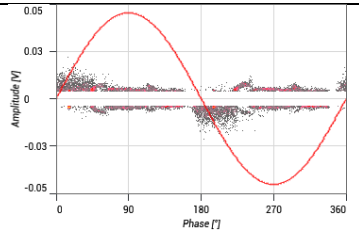
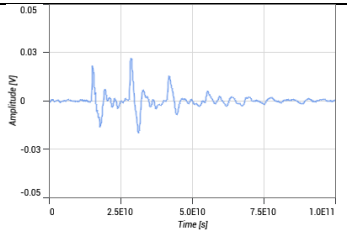
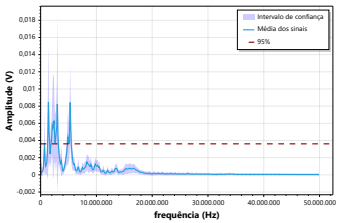
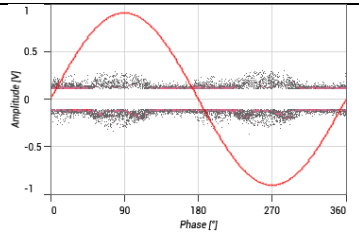
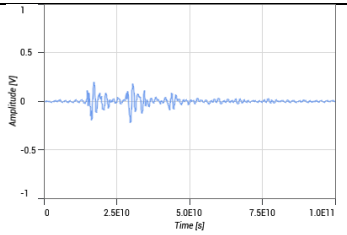
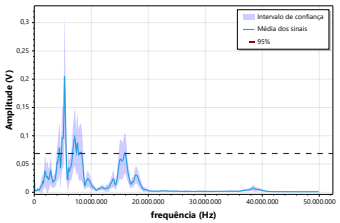
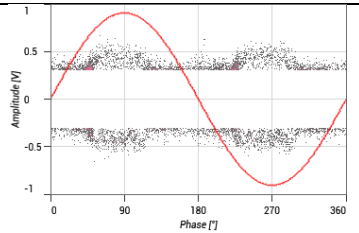
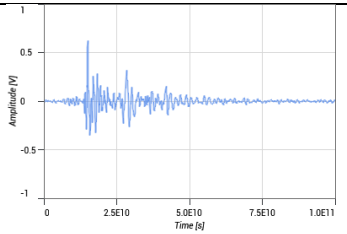
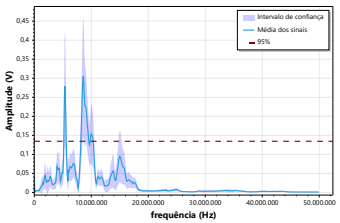
Tabela 27 — Experimento 9, erro de medição do valor de QMax95% com sensor HAS e HRSS em cabo de maior extensão.

Conexão com o terra	**Posição**	**Sensor**	**RMSE**	**MAE**	**Bias**	**S²**
2 terminais	PA	HRSS	0,0901482	0,0721304	0,0416745	0,0064077
		HAS	0,1883857	0,1838421	-0,007102	0,0355375
	PB	HRSS	0,3813472	0,3218262	-0,3193645	0,043553
		HAS	0,0578182	0,0426927	-0,0023304	0,0033468
1 terminal	PA	HRSS	0,086887	0,0654426	0,0177421	0,0072547
		HAS	0,0682596	0,0551673	-0,0240804	0,0040909
	PB	HRSS	0,0856085	0,0738376	0,0167422	0,0070682
		HAS	0,086316	0,068588	-0,0452074	0,0054218

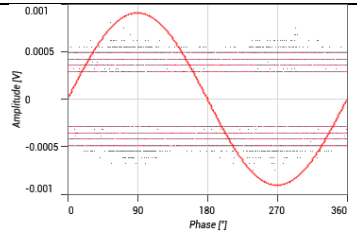
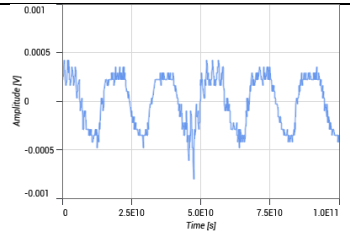
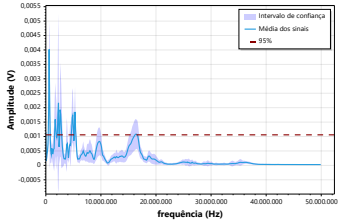
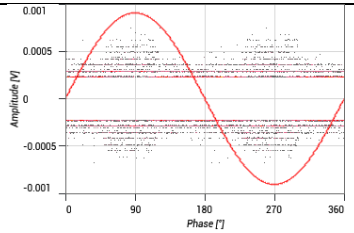
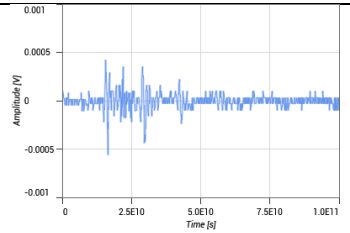
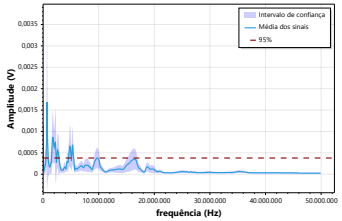
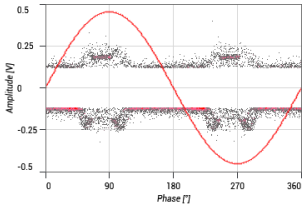
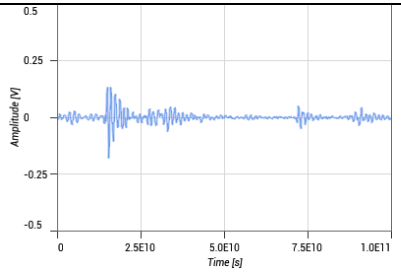
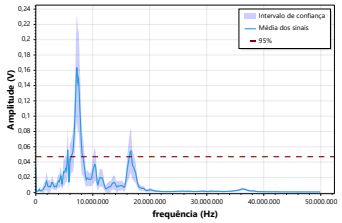
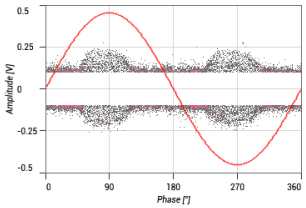
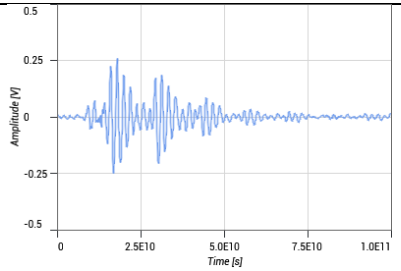
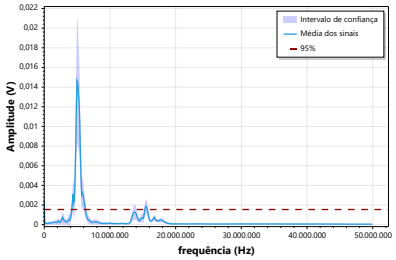
Fonte: O autor.

Tabela 28 — síntese dos experimentos 9 e principais resultados.

(continua)

Localização	Sensor	PRPD	Forma de onda	FTT	QMax95%	Alfa	Beta
PA (1 terminal conectado ao terra)	**HFCT**				0,0152	0,0105	2,7446
	HRSS				0,0098	0,00635	2,57105
PA (1 terminal conectado ao terra)	**FMC**				0,2067	0,1473	3,9163
	HAS				0,4979	0,39655	5,8211

(conclusão)

Localização	Sensor	PRPD	Forma de onda	FTT	QMax95%	Alfa	Beta
PB (2 terminais conectado ao terra)	**HFCT**				0,0005	0,0004	5,28635
	HRSS				0,0004	0,0003	3,53565
PB (2 terminais conectado ao terra)	**FMC**				0,2254	0,16495	4,38705
	HAS				0,1936	0,13675	4,14465

Fonte: O autor.

4.4 Discussões dos resultados

Ressalta-se que as métricas de erro RMSE, MAE, Bias e variância (S^2) foram calculadas a partir de dados previamente normalizados no intervalo [0, 1]. Dessa forma, tais métricas devem ser interpretadas como medidas relativas, permitindo a comparação direta entre diferentes cenários experimentais e configurações dos sensores, independentemente da magnitude absoluta dos sinais. Assim, os valores obtidos refletem a dispersão, tendência e consistência dos dados em termos proporcionais, e não em unidades físicas absolutas.

A análise dos resultados experimentais do sensor HAS evidencia que seu desempenho está diretamente relacionado às condições de operação e às características construtivas adotadas. No Experimento 1, conforme apresentado na Tabela 11 e ilustrado na Figura 71, observou-se forte correlação com o sensor de referência, indicando adequada capacidade de detectar e acompanhamento da métrica QMax95%, nestes termos. A análise das métricas de erro, especialmente RMSE e MAE, indica dispersão relativa moderada ao longo da faixa normalizada, com indícios de ocorrência pontual de valores discrepantes. O valor positivo de Bias evidencia uma tendência relativa à superestimação, enquanto a variância S^2 indica que, embora o sensor apresente boa aderência ao comportamento global, ainda há margem para aprimoramento da precisão.

Os resultados do Experimento 2, apresentados na Tabela 12 e nas Figura 72, evidenciam a influência significativa da geometria do sensor em seu desempenho. Observa-se que determinadas configurações apresentam aumento nos valores de RMSE sem crescimento proporcional em MAE, o que, no contexto de dados normalizados, sugere a presença de valores discrepantes com maior impacto sobre o erro quadrático. Ainda assim, algumas configurações, especialmente em comprimentos intermediários, apresentam redução consistente das métricas de erro e melhor equilíbrio entre Bias e S^2, indicando que a otimização geométrica pode resultar em desempenho satisfatório e mais estável.

No Experimento 3, conforme apresentado na Tabela 15 e ilustrado na Figura 73, o sensor demonstrou capacidade de diferenciar os tipos de DPs, apresentando correlação moderada em todos os casos. Os valores de RMSE e MAE indicam dispersão relativa mais acentuada. A diferença entre RMSE e MAE sugere a ocorrência de eventos com maior intensidade relativa dentro da faixa normalizada, enquanto os valores de Bias e S^2 indicam que, embora a quantificação apresente limitações, o sensor mantém consistência na identificação dos padrões de descarga.

No Experimento 4, os resultados apresentados na Tabela 16 e na Figura 74 indicam redução significativa do desempenho do sensor em cabos com blindagem metálica de chumbo. Os valores de RMSE e MAE refletem aumento da dispersão relativa dos dados, enquanto a proximidade entre essas métricas sugere que os erros estão distribuídos de forma relativamente uniforme ao longo das amostras. Os valores de Bias e S^2 indicam limitações tanto na exatidão quanto na precisão relativa, evidenciando que o ambiente altamente blindado reduz o acoplamento eletromagnético e, consequentemente, a sensibilidade do sensor. Ainda assim, tais resultados são coerentes com o princípio de funcionamento do dispositivo.

Em relação ao sensor HRSS, pode-se notar no experimento 5, como representado na Tabela 19 e na Figura 75, observa-se forte correlação com o sensor de referência, com valores de RMSE e MAE relativamente próximos, indicando distribuição homogênea dos erros ao longo da faixa normalizada e baixa influência de outliers. O Bias positivo indica leve tendência sistemática, enquanto o baixo valor de S^2 evidência boa precisão relativa das medições.

No Experimento 6, conforme apresentado na Tabela 20 e na Figura 76, os baixos valores de RMSE e MAE para todas as configurações indicam desempenho consistente, independentemente do número de espiras. A proximidade entre essas métricas sugere ausência de valores discrepantes relevantes, enquanto os valores de Bias negativos indicam leve subestimação sistemática. Os baixos valores de S^2 reforçam a elevada precisão relativa do sensor, evidenciando sua robustez construtiva. Dessa forma, a atenuação da forma de onda é a principal característica entre os sensores, de modo que maiores números de espiras podem levar a uma menor amplitude nos pulsos detectados.

No Experimento 7, os resultados apresentados na Tabela 23 e na Figura 77 evidenciam um desempenho consistente do sensor na distinção entre os diferentes tipos de DPs. Para descargas de superfície, observa-se elevada consistência entre os valores de RMSE e MAE, indicando medições estáveis ao longo da faixa normalizada. Para os demais tipos, a diferença entre essas métricas sugere a ocorrência de eventos discrepantes, porém com impacto limitado sobre o desempenho global. Além disso, os baixos valores de Bias e S^2 indicam reduzido erro sistemático e baixa dispersão dos resultados, corroborando a capacidade do sensor em caracterizar os diferentes padrões de descarga parcial.

No Experimento 8, conforme evidenciado na Tabela 24 e na Figura 78, o sensor manteve desempenho satisfatório mesmo em cabos com blindagem metálica de chumbo. Os valores moderados de RMSE e MAE, aliados à sua proximidade, indicam distribuição uniforme dos erros. O Bias próximo de zero sugere boa exatidão relativa, enquanto o valor de S^2 confirma a manutenção da precisão, evidenciando a robustez do sensor em condições adversas.

Por fim, no Experimento 9, apresentado na Tabela 27 e ilustrado na Figura 79, observa-se que ambos os sensores apresentam desempenho aprimorado em condições mais próximas da aplicação prática. O sensor HRSS apresenta valores de RMSE e MAE baixos e próximos, sugerindo alta consistência das medições e baixa influência de outliers, além de valores reduzidos de Bias e S^2, que evidenciam considerável exatidão e precisão relativa em diferentes configurações de aterramento.

O sensor HAS, por sua vez, apresenta maior variabilidade nos valores de RMSE e MAE, refletindo potencial maior sensibilidade às condições de instalação e à posição de medição. Ainda assim, em configurações específicas, os valores relativos de erro são reduzidos e comparáveis aos do sensor HRSS, indicando que, sob condições favoráveis, o sensor pode apresentar desempenho competitivo. Os valores de Bias e S^2 variam entre os cenários, sugerindo que a exatidão e a precisão dependem diretamente das condições de aplicação.

Dessa forma, a análise conjunta das métricas RMSE, MAE, Bias e S^2, interpretadas no contexto de dados normalizados, indica que o sensor HRSS apresenta maior robustez e estabilidade global, enquanto o sensor HAS se destaca pela sensibilidade e potencial de desempenho quando adequadamente otimizado, sendo ambos viáveis para aplicação em monitoramento de DPs, desde que consideradas suas características específicas de operação.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo implementação e avaliação experimental de duas arquiteturas de sensores eletromagnéticos para detectar DPs em cabos isolados de média e alta tensão, denominadas *Helicoidal Antenna Sensor* (HAS) e HFCT *Relative Signature Sensor* (HRSS). A proposta fundamentou-se na utilização de materiais comercialmente acessíveis e técnicas de manufatura aditiva, buscando soluções de custo significativamente reduzido em relação às alternativas comerciais, boa flexibilidade construtiva e potencial aplicação em sistemas de monitoramento *on-line*. Os resultados obtidos demonstram que os objetivos propostos foram plenamente alcançados, evidenciando que ambas as arquiteturas são capazes de detectar pulsos associados às DPs e produzir assinaturas compatíveis com aquelas obtidas pelo sensor comercial de referência.

A estratégia experimental adotada permitiu validar progressivamente os sensores desenvolvidos, iniciando por ensaios preliminares de bancada e culminando em experimentos em ambiente de alta tensão cada vez mais representativos das condições encontradas em sistemas elétricos reais. A validação funcional confirmou que os protótipos foram capazes de detectar os pulsos padronizados gerados pelo calibrador conforme a IEC 60270. Os resultados demonstraram que os sensores apresentam formas de onda com morfologia e padrões visuais similares aos observados em arquiteturas comerciais, indicando o potencial das propostas para a detecção de DPs sob condições controladas. Em seguida, os ensaios de sensibilidade em regime permanente e de caracterização da resposta em frequência forneceram evidências quantitativas da influência dos parâmetros construtivos sobre o desempenho eletromagnético dos sensores, estabelecendo critérios objetivos para sua otimização.

Os resultados obtidos para o sensor HAS demonstraram que seu desempenho é fortemente dependente da geometria do elemento ressonante passivo. Entre as configurações investigadas, a combinação de comprimento efetivo de 12,5 m e condutor de cobre de 22 AWG apresentou o melhor desempenho experimental, evidenciado pelo maior coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0,4411$), quando comparado às configurações de 8 m ($r = 0,3469$) e 16 m ($r = 0,1226$). Esse comportamento está diretamente associado ao ajuste da frequência de ressonância do sensor para aproximadamente 3 MHz, frequência para a qual sua geometria foi concebida. Nessa condição, o acoplamento eletromagnético entre os pulsos irradiados pelas DPs e o elemento ressonante passivo torna-se mais eficiente, otimizando a transferência de potência e a resposta dinâmica dos sinais capturados. Em contrapartida, alterações no

comprimento efetivo do elemento ressonante passivo deslocam a frequência de ressonância e modificam a impedância equivalente da estrutura, reduzindo a eficiência de acoplamento e, consequentemente, a correspondência entre os sinais adquiridos e aqueles fornecidos pelo sensor de referência.

Para o sensor HRSS, os experimentos evidenciaram que a relação de espiras do enrolamento secundário constitui o principal parâmetro responsável pelo desempenho do dispositivo. O protótipo com $N = 2$ apresentou sensibilidade de 17,76 mV/mA, valor superior aos obtidos para as configurações com $N = 4$ (11,02 mV/mA) e $N = 8$ (6,32 mV/mA), aproximando-se do comportamento do sensor comercial utilizado como referência. Esse resultado é consistente com o modelo teórico de um transformador de corrente operando em sua região linear, no qual a corrente induzida no secundário é inversamente proporcional ao número de espiras. Como consequência, o aumento de N reduz a corrente secundária e, para uma impedância de carga constante, diminui a tensão disponível na saída do sensor. As pequenas diferenças observadas em relação ao comportamento ideal podem ser atribuídas aos efeitos das perdas magnéticas do núcleo, das indutâncias de dispersão, das capacitâncias parasitas entre espiras e das limitações impostas pela resposta em frequência do conjunto sensor-circuito.

A caracterização em frequência corroborou essa interpretação física. Todos os protótipos apresentaram resposta aproximadamente plana e adequada para aplicações envolvendo DPs, mantendo estabilidade até aproximadamente 60 MHz. Observou-se ainda que o aumento do número de espiras promove redução progressiva da magnitude do parâmetro S_{21} e deslocamento da frequência de antirressonância, fenômenos associados às alterações das indutâncias e capacitâncias parasitas introduzidas pela própria geometria do enrolamento. A concordância entre os resultados obtidos nos ensaios de sensibilidade e na caracterização espectral demonstra consistência entre os diferentes métodos experimentais empregados e confirma que o desempenho dos sensores é governado pelos parâmetros eletromagnéticos decorrentes de sua construção.

Os ensaios em ambiente de alta tensão constituíram a principal etapa de validação da pesquisa, permitindo avaliar os sensores em diferentes condições de operação, incluindo otimização construtiva, identificação de diferentes tipos de defeitos, monitoramento em cabos com blindagem metálica de chumbo e ensaios em um circuito com aproximadamente 180 m de cabo, representando um cenário significativamente mais próximo das condições encontradas em campo. Em todas as situações investigadas, os sensores foram capazes de detectar os pulsos

de DPs e produzir padrões PRPD coerentes com os mecanismos físicos de geração das descargas, demonstrando robustez frente às diferentes condições experimentais.

No experimento 9, cenário que melhor representa uma aplicação prática, a comparação estatística com o sensor de referência evidenciou elevado grau de concordância entre as arquiteturas desenvolvidas e o dispositivo comercial. O sensor HRSS apresentou RMSE de 0,0856, MAE de 0,0738, Bias de 0,0167 e S^2 de 0,0070, indicando elevada precisão relativa, baixa tendência sistemática e reduzida influência de valores discrepantes. O sensor HAS apresentou RMSE de 0,0863, MAE de 0,0685, Bias de -0,0452 e S^2 de 0,0054, evidenciando desempenho igualmente competitivo, embora mais dependente das condições de instalação e do correto ajuste de seus parâmetros construtivos. Esses resultados demonstram que ambas as arquiteturas alcançaram desempenho compatível com o monitoramento de DPs, sendo o HRSS caracterizado por maior robustez global, enquanto o HAS apresenta maior sensibilidade ao processo de otimização geométrica, podendo alcançar desempenho equivalente quando corretamente ajustado à faixa de frequência de interesse.

Como contribuição científica e tecnológica, este trabalho contribuiu para a compreensão da influência dos parâmetros geométricos, construtivos e dos materiais empregados sobre o desempenho eletromagnético de sensores destinados ao monitoramento de DPs. Os resultados obtidos fornecem subsídios para o aprimoramento dessas arquiteturas e para o desenvolvimento de futuras pesquisas na área.

Embora os resultados obtidos sejam consistentes, algumas limitações devem ser consideradas. Os ensaios foram realizados exclusivamente em ambiente laboratorial controlado, não sendo avaliadas condições reais de operação em campo, envelhecimento dos materiais ou efeitos associados à exposição prolongada a ambientes industriais. Além disso, não foram conduzidas análises estatísticas aprofundadas envolvendo grandes quantidades de protótipos ou longos períodos de monitoramento contínuo.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de ensaios em ambientes industriais reais, visando avaliar o comportamento dos sensores sob diferentes condições operacionais e níveis de interferência eletromagnética. Sugere-se também a utilização de ferramentas de modelagem eletromagnética numérica para otimização das geometrias desenvolvidas, bem como a investigação de novos materiais e configurações estruturais capazes de ampliar a faixa de frequência e a sensibilidade dos dispositivos.

Adicionalmente, destaca-se como oportunidade futura a integração dos sensores desenvolvidos com técnicas avançadas de processamento digital de sinais e algoritmos de Inteligência Artificial voltados à classificação automática de padrões de DPs. A combinação

entre sensores de custo significativamente reduzido em relação às alternativas comerciais, processamento inteligente e sistemas embarcados poderá contribuir para o desenvolvimento de soluções compactas e portáteis para monitoramento contínuo de ativos em redes elétricas inteligentes (Smart Grids).

REFERÊNCIAS

[1] STONE, Greg C. et al. Practical Partial Discharge Measurement on Electrical Equipment. 1. ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2023.
https://doi.org/10.1002/9781119833345

[2] HUSSAIN, G. A.; HASSAN, W.; MAHMOOD, F.; SHAFIQ, M.; REHMAN, H.; KAY, J. A. Review on partial discharge diagnostic techniques for high voltage equipment in power systems. IEEE Access, v. 11, p. 51382-51394, 2023.
https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279355

[3] ZHANG, W.; SONG, Y.; WU, X.; LIU, H.; TIAN, H.; TANG, Z.; XU, S.; CHEN, W. Detecting partial discharge in cable joints based on implanting optical fiber using MZ–Sagnac interferometry. Sensors, v. 25, p. 3166, 2025.
https://doi.org/10.3390/s25103166

[4] LI, Y.; CHEN, D.; LI, L.; ZHANG, J.; LI, G.; LIU, H. Study of comparison between ultra-high frequency (UHF) method and ultrasonic method on PD detection for GIS. In: IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE, 2017. Anais [...]. [S. l.]: IOP Publishing, 2017. v. 94, art. 012086.
https://doi.org/10.1088/1755-1315/94/1/012086

[5] LI, J.; HAN, X.; LIU, Z.; YAO, X. A novel GIS partial discharge detection sensor with integrated optical and UHF methods. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 33, n. 4, p. 2047-2049, ago. 2018.
https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2635382

[6] ÁLVAREZ, F.; GARNACHO, F.; ORTEGO, J.; SÁNCHEZ-URÁN, M. Á. Application of HFCT and UHF sensors in on-line partial discharge measurements for insulation diagnosis of high voltage equipment. Sensors, v. 15, p. 7360-7387, 2015.
https://doi.org/10.3390/s150407360

[7] ROSLE, N.; MUHAMAD, N. A.; ROHANI, M. N. K. H.; JAMIL, M. K. M. Partial discharges classification methods in XLPE cable: a review. IEEE Access, v. 9, p. 133258-133273, 2021.
https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3115519

[8] YAACOB, M. M.; ALSAEDI, M. A.; RASHED, J. R. et al. Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors. Photonic Sensors, v. 4, p. 325-337, 2014.
https://doi.org/10.1007/s13320-014-0146-7

[9] WEN, H.; ABU TALIP, M. S.; OTHMAN, M.; AZAM, S. M. K.; MOHAMAD, M.; IBRAHIM, M. F.; AROF, H.; ABABNEH, A. Advanced signal processing methods for partial discharge analysis: a review. Sensors, v. 25, p. 7318, 2025.
https://doi.org/10.3390/s25237318

[10] KAZIZ, S.; SAID, M. H.; IMBURGIA, A.; MAAMER, B.; FLANDRE, D.; ROMANO, P.; TOUNSI, F. Radiometric partial discharge detection: a review. Energies, v. 16, p. 1978, 2023.
https://doi.org/10.3390/en16041978

[11] BINDI, M.; PICCIRILLI, M. C.; LUCHETTA, A.; GRASSO, F. A comprehensive review of fault diagnosis and prognosis techniques in high voltage and medium voltage electrical power lines. Energies, v. 16, p. 7317, 2023.
https://doi.org/10.3390/en16217317

[12] TAO, J.; REHMAN, S. U.; ALI, R.; RAZA, S. A. Advancement and challenges: a review of power cable aging monitoring and diagnostic techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 222, p. 115970, 2025.
https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115970

[13] TECHIMP. HFCT 39mm: high performance inductive PD sensors. Data sheet. Rev. 20200324. Zola Predosa: Altanova Group, 2020. Disponível em: https://www.doble.com/wp-content/uploads/HFCT-Clamp-39mm-Datasheet.pdf. Acesso em: 15 jun. 2026.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 60270: técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – medição de descargas parciais. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

[15] CIGRE TASK FORCE 15.11/33.03.02. Knowledge rules for partial discharge diagnosis in service. Paris: CIGRE, 2003. (CIGRE Brochure, 226).

[16] BOONPOKE, S.; MARUNGSRI, B. Pattern recognition of partial discharge by using simplified fuzzy ARTMAP. World Academy of Science, Engineering and Technology, v. 65, n. 5, p. 212-219, 2010.

[17] ILLIAS, H. A.; OTHMAN, M. E.; TUNIO, M. A.; BAKAR, A. H. A.; MOKHLIS, H.; CHEN, G.; LEWIN, P. L.; ARIFFIN, A. M. Measurement and simulation of partial discharge activity within a void cavity in a polymeric power cable model. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID DIELECTRICS (ICSD), 2013, Bologna. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2013. p. 105-108.
https://doi.org/10.1109/ICSD.2013.6619829

[18] WU, M.; CAO, H.; CAO, J.; NGUYEN, H.-L.; GOMES, J. B.; KRISHNASWAMY, S. P. An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 31, p. 22-35, 2015.
https://doi.org/10.1109/MEI.2015.7303259

[19] QUERCIO, M.; DEL PINO LOPEZ, J. C.; GRASSO, S. et al. Numerical and experimental analysis of thermal behaviour of high voltage power cable in unfilled ducts. Scientific Reports, v. 14, p. 20599, 2024.
https://doi.org/10.1038/s41598-024-71281-x

[20] LI, Y.; JIANG, L.; XIE, M.; YU, J.; QIAN, L.; XU, K.; CHEN, M.; WANG, Y. Advancements and challenges in power cable laying. Energies, v. 17, p. 2905, 2024.
https://doi.org/10.3390/en17122905

[21] METWALLY, I. A. The evolution of medium voltage power cables. IEEE Potentials, v. 31, n. 3, p. 20-25, maio/jun. 2012.
https://doi.org/10.1109/MPOT.2011.2178190

[22] KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. Electrical breakdown in gases. In: KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. High voltage engineering fundamentals. 2. ed. Oxford: Newnes, 2000. cap. 5, p. 281-366.
https://doi.org/10.1016/B978-075063634-6/50006-X

[23] MAMEDE FILHO, João. Instalações elétricas industriais. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1995.

[24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14039: instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

[25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7286: cabos de potência com isolação extrudada de borracha etileno propileno (EPR, HEPR ou EPR 105) para tensões de 1 kV a 35 kV — requisitos de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

[26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7287: cabos de potência com isolação sólida extrudada de polietileno reticulado (XLPE) para tensões de 1 kV a 35 kV — requisitos de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. Confirmada em 2022.

[27] PAPAZYAN, R. Concepts for market-based MV cable operations and maintenance using insulation parameters measurements. In: ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY CONFERENCE (BULEF), 12., 2020, Varna. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2020. p. 1-5.
https://doi.org/10.1109/BulEF51036.2020.9326055

[28] ZHU, X.; WU, J.; WANG, Y.; YIN, Y. Characteristics of electrical tree defect during the growth period in high-voltage DC cable under stepped DC voltage. IET Generation, Transmission & Distribution, v. 13, p. 3195-3201, 2019.
https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.0078

[29] SHI, X.; QIAO, B.; ZHENG, Z.; LIN, G.; WANG, Y.; YIN, Y. Effect of discharge amplitude on electrical trees based on three-capacitance model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY ENGINEERING AND POWER SYSTEMS (EEPS), 3., 2023, Dali. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2023.
https://doi.org/10.1109/EEPS58791.2023.10256710

[30] TAYLOR, B.; MORRISON, G. Evaluating medium voltage cable splices and terminations. In: PULP AND PAPER INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE, 2000. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2000. p. 188-194.
https://doi.org/10.1109/PAPCON.2000.854224

[31] HYVONEN, P. Prediction of insulation degradation of distribution power cables based on chemical analysis and electrical measurements. 2008. Tese (Doutorado) - Helsinki University of Technology, Espoo, 2008.

[32] IEEE. IEEE Std 400.3-2006: IEEE guide for partial discharge testing of shielded power cable systems in a field environment. [S. l.]: IEEE, 2007. p. 1-44.

[33] HUI, L.; YUFENG, C.; QINGHE, S.; BO, Y.; XIAOBIN, S.; ZHAO, Q. Cluster analysis on signals from XLPE cable partial discharge detection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 2014, Chengdu. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2014. p. 1535-1540.
https://doi.org/10.1109/POWERCON.2014.6993822

[34] KINDL, V.; SKALA, B.; PECHANEK, R.; KUS, V.; HORNAK, J. Low-pass filter for HV partial discharge testing. Sensors, v. 18, p. 482, 2018.
https://doi.org/10.3390/s18020482

[35] MORSALIN, S.; DAS, N. Diagnostic aspects of partial discharge measurement at very low frequency: a review. IET Science, Measurement & Technology, v. 14, p. 825-841, 2020.
https://doi.org/10.1049/iet-smt.2020.0225

[36] KAZIZ, S.; ROMANO, P.; IMBURGIA, A.; ALA, G.; SGHAIER, H.; FLANDRE, D.; TOUNSI, F. PCB-based planar inductive loops for partial discharges detection in power cables. Sensors, v. 23, p. 290, 2023.
https://doi.org/10.3390/s23010290

[37] ZHANG, Y.; GLOVER, I. Design of an ultrawideband VHF/UHF antenna for partial discharge detection. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING, COMMUNICATIONS AND COMPUTING (ICSPCC), 2014, Guilin. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2014. p. 487-490.
https://doi.org/10.1109/ICSPCC.2014.6986241

[38] ROBLES, G.; MARTINEZ-TARIFA, J. M.; ROJAS-MORENO, M. V.; SANZ-FEITO, J. Inductive sensor for measuring high frequency partial discharges within electrical insulation. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 58, n. 11, p. 3907-3913, nov. 2009.
https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2021239

[39] ROZI, F.; KHAYAM, U. Development of loop antennas for partial discharge detection. International Journal on Electrical Engineering and Informatics, v. 7, n. 1, p. 29, 2015. [NOTA: referência duplicada, ver item 108]
https://doi.org/10.15676/ijeei.2015.7.1.3

[40] KREUGER, F. H.; GULSKI, E.; KRIVDA, A. Classification of partial discharges. IEEE Transactions on Electrical Insulation, v. 28, n. 6, p. 917-931, dez. 1993.
https://doi.org/10.1109/14.249365

[41] AZAM, S. K.; OTHMAN, M.; ILLIAS, H. A.; LATEF, T. A.; ISLAM, M. T.; AIN, M. F. Ultra-high frequency printable antennas for partial discharge diagnostics in high voltage equipment. Alexandria Engineering Journal, v. 64, p. 709-729, 2023.
https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.11.026

[42] SCHWARZ, R.; MUHR, M. Modern technologies in optical partial discharge detection. In: ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2007, Vancouver. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2007. p. 163-166.
https://doi.org/10.1109/CEIDP.2007.4451557

[43] QIAN, S.; CHEN, H.; XU, Y.; SU, L. High sensitivity detection of partial discharge acoustic emission within power transformer by sagnac fiber optic sensor. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 25, p. 2313-2320, 2018.
https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007131

[44] BARTNIKAS, R. Partial discharges: their mechanism, detection and measurement. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 9, p. 763-808, 2002.
https://doi.org/10.1109/TDEI.2002.1038663

[45] BAKAR, N. A.; ABU-SIADA, A.; ISLAM, S. A review of dissolved gas analysis measurement and interpretation techniques. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 30, p. 39-49, 2014.
https://doi.org/10.1109/MEI.2014.6804740

[46] WANG, Z.; COTTON, I.; NORTHCOTE, C. et al. Dissolved gas analysis of alternative fluids for power transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 23, p. 5-14, 2007.
https://doi.org/10.1109/MEI.2007.4318269

[47] NIEMEYER, L. A generalized approach to partial discharge modeling. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 2, p. 510-528, 1995.
https://doi.org/10.1109/94.407017

[48] BÚA NÚÑEZ, I.; POSADA-ROMÁN, J. E.; RUBIO-SERRANO, J.; GARCIA-SOUTO, J. A. Instrumentation system for location of partial discharges using acoustic detection with piezoelectric transducers and optical fiber sensors. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 63, p. 1002-1013, 2013.
https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2286891

[49] LIU, B.; MA, H.; JU, P. Partial discharge diagnosis by simultaneous observation of discharge pulses and vibration signal. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 24, p. 288-295, 2017.
https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.006072

[50] NGUYEN, M.-T.; NGUYEN, V.-H.; YUN, S.-J.; KIM, Y.-H. Recurrent neural network for partial discharge diagnosis in gas-insulated switchgear. Energies, v. 11, p. 1202, 2018.
https://doi.org/10.3390/en11051202

[51] JIANG, L.; YANG, X.; WANG, X.; QU, Q.; ZHANG, Y.; LIU, J. Partial discharge signal analysis method for transmission cables supported by deep learning. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC TECHNOLOGY, COMMUNICATION AND INFORMATION (ICETCI), 4., 2024, Changchun. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2024. p. 1174-1178.
https://doi.org/10.1109/ICETCI61221.2024.10594059

[52] GONÇALVES JÚNIOR, A. M.; DE PAULA, H.; DO COUTO BOAVENTURA, W. Practical partial discharge pulse generation and location within transformer windings using regression models adjusted with simulated signals. Electric Power Systems Research, v. 157, p. 118-125, 2018.
https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.12.013

[53] KHAYAM, U.; SURANDAKA, Y. A. Design, implementation, and testing of partial discharge signal processing system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF INDUSTRIAL, MECHANICAL, ELECTRICAL, AND CHEMICAL ENGINEERING (ICIMECE), 2., 2016, Yogyakarta. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2016. p. 175-179. https://doi.org/10.1109/ICIMECE.2016.7910448

[54] FANG, H.; YUAN, Z.; ZHANG, T.; CAO, T.; ZHANG, H.; MA, D. Research on partial discharge pattern recognition of small samples based on STFT and CNN-SVM. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL TECHNOLOGY AND AUTOMATION ENGINEERING (ETAE), 2., 2025, Xi'an. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2025. p. 258-263. https://doi.org/10.1109/ETAE65337.2025.11089834

[55] ALMEHDHAR, A.; PROCHAZKA, R. Robust classification of PD sources using deep learning and signal processing techniques. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIAGNOSTICS IN ELECTRICAL ENGINEERING (DIAGNOSTIKA), 2024, Pilsen. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2024. p. 1-5. https://doi.org/10.1109/Diagnostika61830.2024.10693892

[56] YAN, Y.; TRINCHERO, R.; STIEVANO, I. S.; LI, H.; XIE, Y.-Z. An automatic tool for partial discharge de-noising via short-time Fourier transform and matrix factorization. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 71, p. 1-12, 2022. https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3216583

[57] ROJAS, H. E.; FORERO, M. C.; CORTES, C. A. Application of the local polynomial Fourier transform in the evaluation of electrical signals generated by partial discharges in distribution transformers. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 24, n. 1, p. 227-236, fev. 2017. https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.005910

[58] GU, F.-C.; CHEN, H.-C.; CHEN, B.-Y. A fractional Fourier transform-based approach for gas-insulated switchgear partial discharge recognition. Journal of Electrical Engineering & Technology, v. 14, p. 2073-2084, 2019. https://doi.org/10.1007/s42835-019-00219-5

[59] CUNHA, C. F. F. C.; CARVALHO, A. T.; PETRAGLIA, M. R.; LIMA, A. C. S. A new wavelet selection method for partial discharge denoising. Electric Power Systems Research, v. 125, p. 184-195, 2015. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.04.005

[60] ANTONOVA, L. The wavelet filters recognising of partial discharge location. In: ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY CONFERENCE (BULEF), 10., 2018, Sozopol. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2018. p. 1-3. https://doi.org/10.1109/BULEF.2018.8646959

[61] JAYAKRISHNAN, M.; RAO, B. N. Application of modified wavelet packet transform for de-noising during partial discharge measurement on power cables. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDITION ASSESSMENT TECHNIQUES IN ELECTRICAL SYSTEMS (CATCON), 3., 2017, Chennai. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2017. p. 253-258. https://doi.org/10.1109/CATCON.2017.8280223

[62] SRI, K. B.; CHANDRASEKARAN, K. Partial discharge signal denoising analysis using wavelet transformation with singular value decomposition method. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT TECHNOLOGIES (CONIT), 3., 2023, Hubballi. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2023. p. 1-7.
https://doi.org/10.1109/CONIT59222.2023.10205551

[63] RAUSCHER, A.; HUFNAGEL, M.; ENDISCH, C. Pareto optimization of wavelet filter design for partial discharge detection in electrical machines. Measurement, v. 205, p. 112163, 2022.
https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112163

[64] SHANG, H.; LI, Y.; XU, J.; QI, B.; YIN, J. A novel hybrid approach for partial discharge signal detection based on complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise and approximate entropy. Entropy, v. 22, p. 1039, 2020.
https://doi.org/10.3390/e22091039

[65] PAN, J.; WANG, M.; HU, Q.; LI, C. A detection method of partial discharge signal based on wavelet. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTEGRATED CIRCUITS AND MICROSYSTEMS (ICICM), 7., 2022, Shanghai. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2022. p. 626-630.
https://doi.org/10.1109/ICICM56102.2022.10011290

[66] RODRIGO MOR, A.; MUÑOZ, F. A.; WU, J.; CASTRO HEREDIA, L. C. Automatic partial discharge recognition using the cross wavelet transform in high voltage cable joint measuring systems using two opposite polarity sensors. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 117, p. 105695, 2020.
https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105695

[67] MACEDO, E.; ARAUJO, D.; DA COSTA, E.; FREIRE, R.; LOPES, W.; TORRES, I.; DE SOUZA NETO, J.; BHATTI, S.; GLOVER, I. Wavelet transform processing applied to partial discharge evaluation. Journal of Physics: Conference Series, v. 364, p. 012054, 2012.
https://doi.org/10.1088/1742-6596/364/1/012054

[68] ZAENI, A.; KASNALESTARI, T.; KHAYAM, U. Application of wavelet transformation symlet type and coiflet type for partial discharge signals denoising. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC VEHICULAR TECHNOLOGY (ICEVT), 5., 2018, Surakarta. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2018. p. 78-82.
https://doi.org/10.1109/ICEVT.2018.8628460

[69] NING, H.; ZHUO, D. Partial discharge signal feature extraction based on Hilbert-Huang transform. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION, MECHANICAL, AND ELECTRICAL ENGINEERING (TMEE), 2011, Changchun. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2011. p. 2398-2401.
https://doi.org/10.1109/TMEE.2011.6199704

[70] SAGAR, S. R.; AMARNATH, J.; NARASIMHAM, S. V. L. Wavelet transform technique for denoising of UHF PD signals in GIS. In: IEEE REGION 10 AND THE THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL AND INFORMATION SYSTEMS, 2008, Kharagpur. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2008. p. 1-4.
https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2008.4798458

[71] WANG, X.; LI, B.; LIU, Z.; ROMAN, H. T.; RUSSO, O. L.; CHIN, K. K.; FARMER, K. R. Analysis of partial discharge signal using the Hilbert-Huang transform. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 21, p. 1063-1067, 2006.
https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.861328

[72] LIN, M. Y.; TAI, C. C.; TANG, Y. W.; SU, C. C. Partial discharge signal extracting using the empirical mode decomposition with wavelet transform. In: ASIA-PACIFIC INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING, 7., 2011, Chengdu. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2011. p. 420-424.
https://doi.org/10.1109/APL.2011.6110158

[73] TANG, Y.-W.; TAI, C.-C.; SU, C.-C.; CHEN, C.-Y.; CHEN, J.-F. A correlated empirical mode decomposition method for partial discharge signal denoising. Measurement Science and Technology, v. 21, p. 085106, 2010.
https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/8/085106

[74] CALVO, M. S.; LEE, H. S. Enhanced complete ensemble EMD with superior noise handling capabilities: a robust signal decomposition method for power systems analysis. Engineering Reports, v. 6, n. 11, p. e12862, 2024.
https://doi.org/10.1002/eng2.12862

[75] SUN, K.; ZHANG, J.; SHI, W.; GUO, J. Extraction of partial discharge pulses from the complex noisy signals of power cables based on CEEMDAN and wavelet packet. Energies, v. 12, p. 3242, 2019.
https://doi.org/10.3390/en12173242

[76] DHANDAPANI, R.; MITICHE, I.; MCMEEKIN, S.; MALLELA, V. S.; MORISON, G. Enhanced partial discharge signal denoising using dispersion entropy optimized variational mode decomposition. Entropy, v. 23, p. 1567, 2021.
https://doi.org/10.3390/e23121567

[77] SHI, F.; YAN, Y.; ZHAO, Y.; JIN, L.; WANG, T. Accurate estimation of time-of-arrival of partial discharge pulses based on empirical mode decomposition and energy criterion method. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND RENEWABLE ENERGY (ICPRE), 7., 2022, Xi'an. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2022. p. 103-106.
https://doi.org/10.1109/ICPRE55555.2022.9960594

[78] SAHNOUNE, M. A.; ZEGNINI, B.; SEGHIER, T.; CHAKKEM, I. Deep learning for partial discharge classification: a CNN-based approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN ELECTRICAL AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES (ICAECOT), 2024, Shanghai. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2024. p. 1-5.
https://doi.org/10.1109/ICAECOT62402.2024.10829295

[79] KIM, J.; JEONG, M.; LEE, H.; KIM, Y.; KANG, H. Artificial intelligence-based recognition and classification of PRPD patterns in power cable. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDITION MONITORING AND DIAGNOSIS (CMD), 10., 2024, Gangneung. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2024. p. 612-615.
https://doi.org/10.23919/CMD62064.2024.10766212

[80] DU, X.; QI, J.; KANG, J.; SUN, Z.; WANG, C.; XIE, J. Partial discharge data augmentation and pattern recognition method based on DAE-GAN. Algorithms, v. 17, p. 487, 2024.
https://doi.org/10.3390/a17110487

[81] GAO, A.; ZHU, Y.; CAI, W.; ZHANG, Y. Pattern recognition of partial discharge based on VMD-CWD spectrum and optimized CNN with cross-layer feature fusion. IEEE Access, v. 8, p. 151296-151306, 2020.
https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3017047

[82] HAMPTON, B.; MEATS, R. Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations. IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution, v. 135, p. 137-144, 1988.
https://doi.org/10.1049/ip-c.1988.0017

[83] AHMED, N. H.; SRINIVAS, N. N. On-line partial discharge detection in cables. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 5, n. 2, p. 181-188, abr. 1998.
https://doi.org/10.1109/94.671927

[84] ZACHARIADES, C.; SHUTTLEWORTH, R.; GIUSSANI, R.; MACKINLAY, R. Optimization of a high-frequency current transformer sensor for partial discharge detection using finite-element analysis. IEEE Sensors Journal, v. 16, n. 20, p. 7526-7533, out. 2016.
https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2600272

[85] ROMANO, P.; IMBURGIA, A.; ALA, G. Partial discharge detection using a spherical electromagnetic sensor. Sensors, v. 19, p. 1014, 2019.
https://doi.org/10.3390/s19051014

[86] FRITSCH, M.; WOLTER, M. High-frequency current transformer design and construction guide. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 71, p. 1-9, 2022.
https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3177189

[87] LUO, G.; ZHANG, D. Study on performance of HFCT and UHF sensors in partial discharge detection. In: CONFERENCE PROCEEDINGS IPEC, 2010, Singapura. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2010. p. 630-635.
https://doi.org/10.1109/IPECON.2010.5697070

[88] HASHMI, G. M.; LEHTONEN, M.; NORDMAN, M. Modeling and experimental verification of on-line PD detection in MV covered-conductor overhead networks. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 17, n. 1, p. 167-180, fev. 2010.
https://doi.org/10.1109/TDEI.2010.5412015

[89] SAMIMI, M. H.; MAHARI, A.; FARAHNAKIAN, M. A.; MOHSENI, H. The Rogowski coil principles and applications: a review. IEEE Sensors Journal, v. 15, n. 2, p. 651-658, fev. 2015.
https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2362940

[90] PAULUS, S.; KAMMERER, J. B.; PASCAL, J. et al. Continuous calibration of Rogowski coil current transducer. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, v. 89, p. 77-88, 2016.
https://doi.org/10.1007/s10470-016-0764-7

[91] METWALLY, I. A. Self-integrating Rogowski coil for high-impulse current measurement. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 59, n. 2, p. 353-360, fev. 2010. https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2023821

[92] MORENO, M. V. R.; ROBLES, G.; ALBARRACÍN, R. et al. Study on the self-integration of a Rogowski coil used in the measurement of partial discharges pulses. Electrical Engineering, v. 99, p. 817-826, 2017. https://doi.org/10.1007/s00202-016-0456-4

[93] HAN, R.-Y. et al. Hybrid PCB Rogowski coil for measurement of nanosecond-risetime pulsed current. IEEE Transactions on Plasma Science, v. 43, n. 10, p. 3555-3561, out. 2015. https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2415517

[94] KUMAR, C. L. G. P. et al. Development and validation of Rogowski coil with commercial high frequency current transformer for partial discharge detection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE (ICECOS), 2018, Pangkal Pinang. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2018. p. 315-320. https://doi.org/10.1109/ICECOS.2018.8605212

[95] SHAFIQ, M.; KUTT, L.; LEHTONEN, M.; NIEMINEN, T.; HASHMI, M. Parameters identification and modeling of high-frequency current transducer for partial discharge measurements. IEEE Sensors Journal, v. 13, n. 3, p. 1081-1091, mar. 2013. https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2227712

[96] SHARIFINIA, S.; ALLAHBAKHSHI, M.; GHANBARI, T.; AKBARI, A.; MIRZAEI, H. R. A new application of Rogowski coil sensor for partial discharge localization in power transformers. IEEE Sensors Journal, v. 21, n. 9, p. 10743-10751, maio 2021. https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3062770

[97] WALDI, E. P.; LESTARI, A. I.; FERNANDEZ, R.; MULYADI, S.; MURAKAMI, Y.; HOZUMI, N. Rogowski coil sensor in the digitization process to detect partial discharge. TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), v. 18, p. 1062-1071, 2020. https://doi.org/10.12928/telkomnika.v18i2.14282

[98] ARDILA-REY, J. A.; BARRUETO, A.; ZERENE, A.; CASTRO, B. A. de; ULSON, J. A. C.; MAS'UD, A. A.; VALDIVIA, P. Behavior of an inductive loop sensor in the measurement of partial discharge pulses with variations in its separation from the primary conductor. Sensors, v. 18, p. 2324, 2018. https://doi.org/10.3390/s18072324

[99] ARDILA-REY, J. A.; MONTAÑA, J.; DE CASTRO, B. A.; SCHURCH, R.; COVOLAN ULSON, J. A.; MUHAMMAD-SUKKI, F.; BANI, N. A. A comparison of inductive sensors in the characterization of partial discharges and electrical noise using the chromatic technique. Sensors, v. 18, p. 1021, 2018. https://doi.org/10.3390/s18041021

[100] ROJAS-MORENO, M. V.; ROBLES, G.; MARTÍNEZ-TARIFA, J. M.; SANZ-FEITO, J. Self-integrating inductive loop for measuring high frequency pulses. Review of Scientific Instruments, v. 82, p. 085102, 2011. https://doi.org/10.1063/1.3622521

[101] IMBURGIA, A. et al. Investigation of PCB-based inductive sensors orientation for corona partial discharge detection. In: MEDITERRANEAN ELECTROTECHNICAL CONFERENCE (MELECON), 21., 2022, Palermo. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2022. p. 559-563. https://doi.org/10.1109/MELECON53508.2022.9843026

[102] TOZZI, Marco; CANDELA, Roberto. A sensor and process for detecting an electric pulse caused by a partial discharge. Depositante: Techimp Technologies S.r.l. WO2010095086A1. Depósito: 15 fev. 2010. Publicação: 26 ago. 2010. Disponível em: https://patents.google.com/patent/WO2010095086A1/en. Acesso em: 31 jul. 2025.

[103] MOR, A. R.; HEREDIA, L. C.; MUÑOZ, F. A magnetic loop antenna for partial discharge measurements on GIS. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 115, p. 105514, 2020.
https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105514

[104] RODRIGO-MOR, A.; MUÑOZ, F. A.; CASTRO-HEREDIA, L. C. A novel antenna for partial discharge measurements in GIS based on magnetic field detection. Sensors, v. 19, p. 858, 2019.
https://doi.org/10.3390/s19040858

[105] LOPEZ-ROLDAN, J.; TANG, T.; GASKIN, M. Optimisation of a sensor for onsite detection of partial discharges in power transformers by the UHF method. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 15, n. 6, p. 1634-1639, dez. 2008.
https://doi.org/10.1109/TDEI.2008.4712667

[106] ZEIDI, N.; KAZIZ, S.; SAID, M. H.; RUFER, L.; CAVALLINI, A.; TOUNSI, F. Partial discharge detection with on-chip spiral inductor as a loop antenna. Review of Scientific Instruments, v. 92, p. 094701, 2021.
https://doi.org/10.1063/5.0051419

[107] HUSSAIN, G. A.; ZAHER, A. A.; HUMMES, D.; SAFDAR, M.; LEHTONEN, M. Hybrid sensing of internal and surface partial discharges in air-insulated medium voltage switchgear. Energies, v. 13, p. 1738, 2020.
https://doi.org/10.3390/en13071738

[108] KAZIZ, S. et al. Performances of a PCB-based loop antenna inductive sensor for partial discharges detection. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIELECTRICS (ICD), 4., 2022, Palermo. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2022. p. 9-12.
https://doi.org/10.1109/ICD53806.2022.9863503

[109] TECHIMP. FMC: flexible magnetic coupler. Data sheet. Zola Predosa: Altanova Group, 2020. Disponível em: https://www.doble.com/wp-content/uploads/FMC-Datasheet.pdf. Acesso em: 15 jun. 2026.

[110] BALANIS, Constantine A. Loop antennas. In: BALANIS, Constantine A. Antenna theory: analysis and design. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. cap. 5, p. 232-246.

[111] MINI-CIRCUITS. ZFL-500LN+: Low noise amplifier coaxial 50Ω 0.1 to 500 MHz. In: MINI-CIRCUITS. Coaxial components and amplifiers catalog. Rev. F. Brooklyn: Mini-Circuits, 2015. p. 1-2. 1 arquivo PDF.

[112] KLÜSS, J. V.; ELG, A.-P.; WINGQVIST, C. High-frequency current transformer design and implementation considerations for wideband partial discharge applications. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 70, p. 1-9, 2021. https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3052002

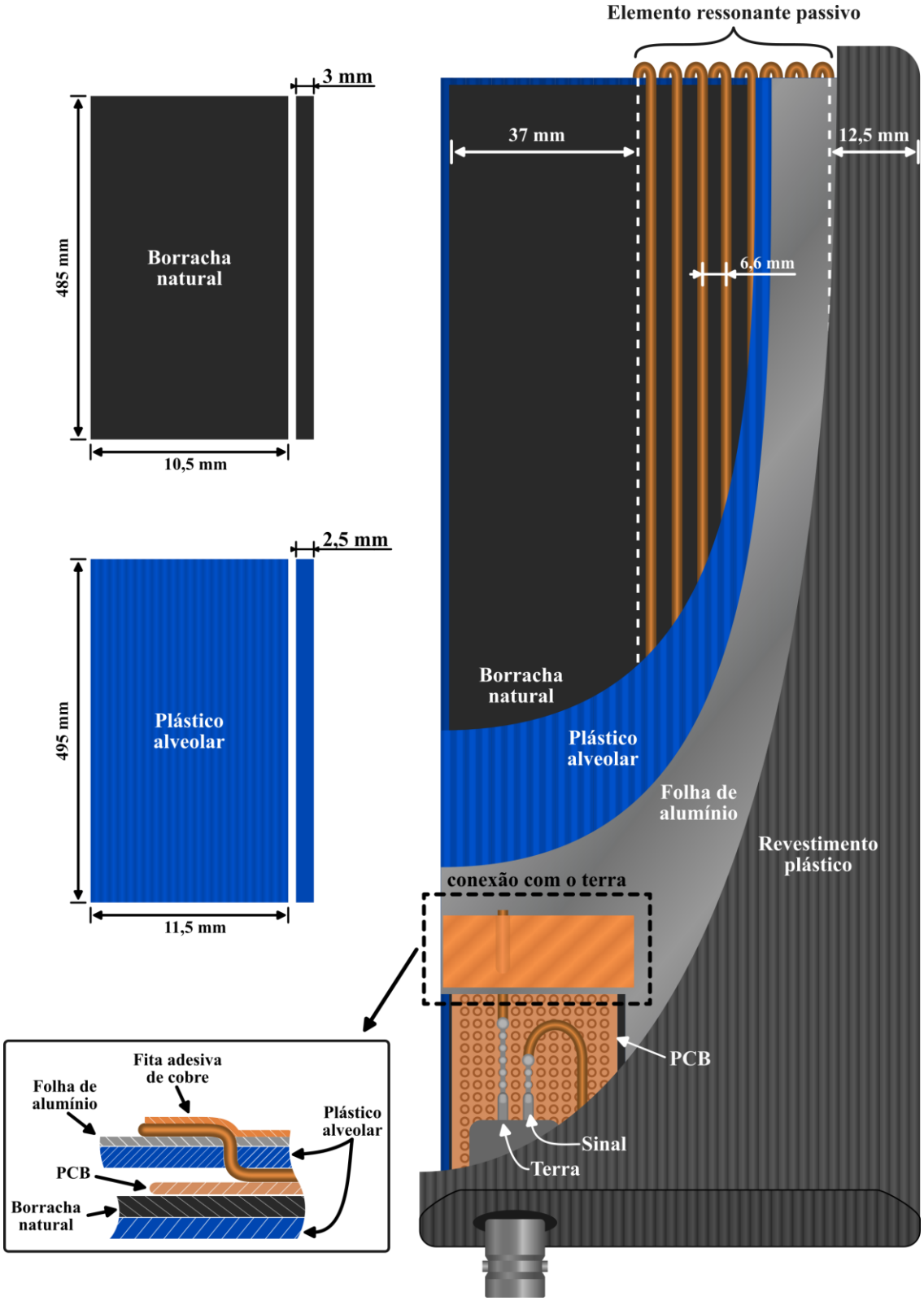
[113] CAREFUL. Soft Ferrite: the curves of material characteristic: FN120 material. In: CAREFUL. Soft ferrite cores product catalog. Huzhou: Huzhou Careful Magnetism, [20--]. 1 arquivo PDF.

[114] GTMAX3D. Tritan: material copoliester tritan. In: GTMAX3D. Catálogo técnico de filamentos para impressão 3D. Americana: GTMax3D, [20--]. 1 arquivo PDF.

[115] DYNALABS. Filamento Simpliflex Azul Celeste DynaLabs 1.75mm 1Kg. In: DYNALABS. Catálogo de dados técnicos de filamentos. Curitiba: Dynalabs, 2026. Disponível em: https://dynalabs.com.br/produtos/filamento-simpliflex-azul-celeste-dynalabs-1-75mm-1kg/. Acesso em: 01 ago. 2025.

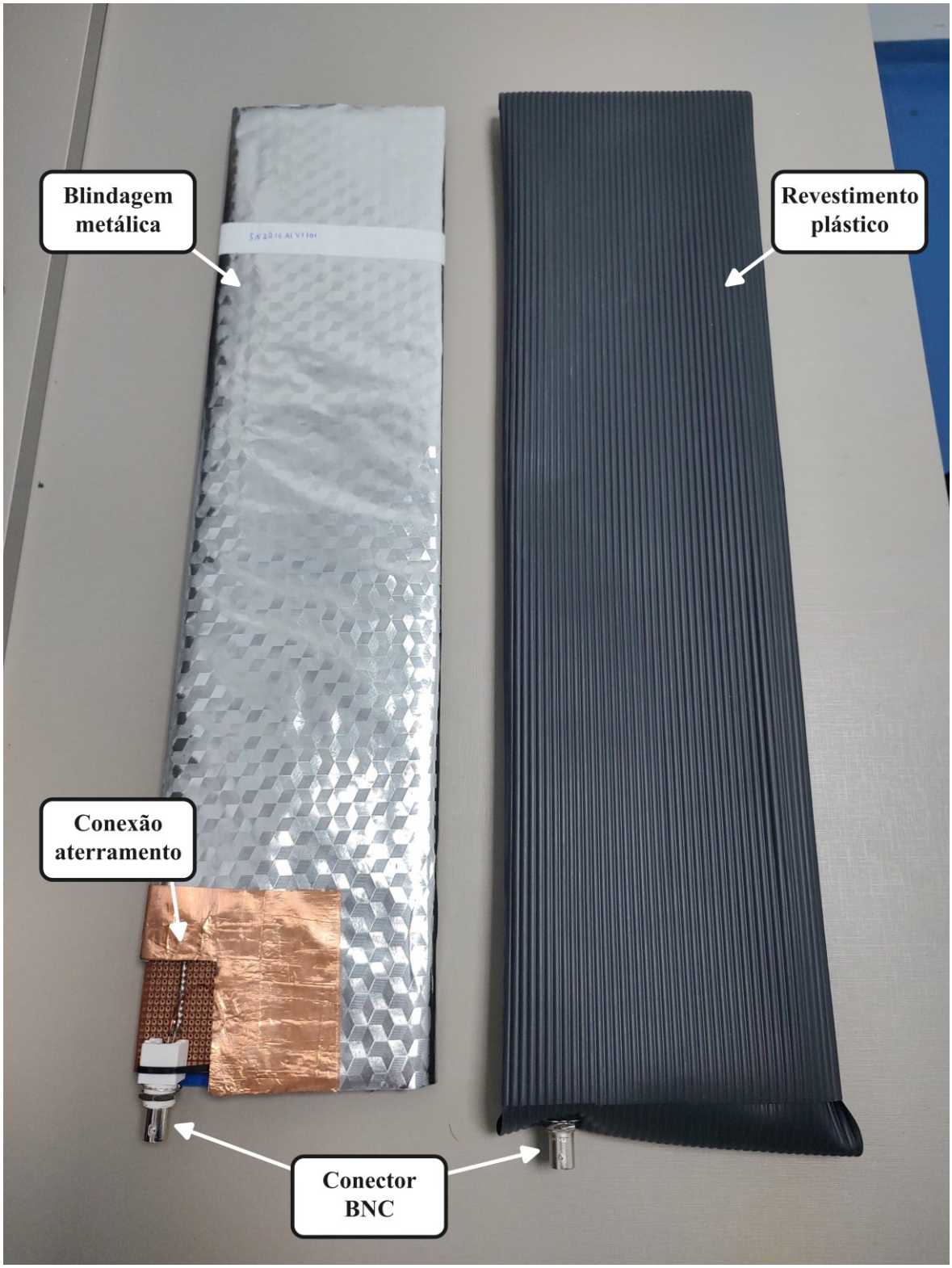
APÊNDICE A – APRESENTAÇÃO DAS IMAGENS DETALHADAS DA CONSTRUÇÃO DO SENSOR HAS

Figura A- 1 — Visão geral dos elementos construtivos do sensor HAS e suas respectivas dimensões.



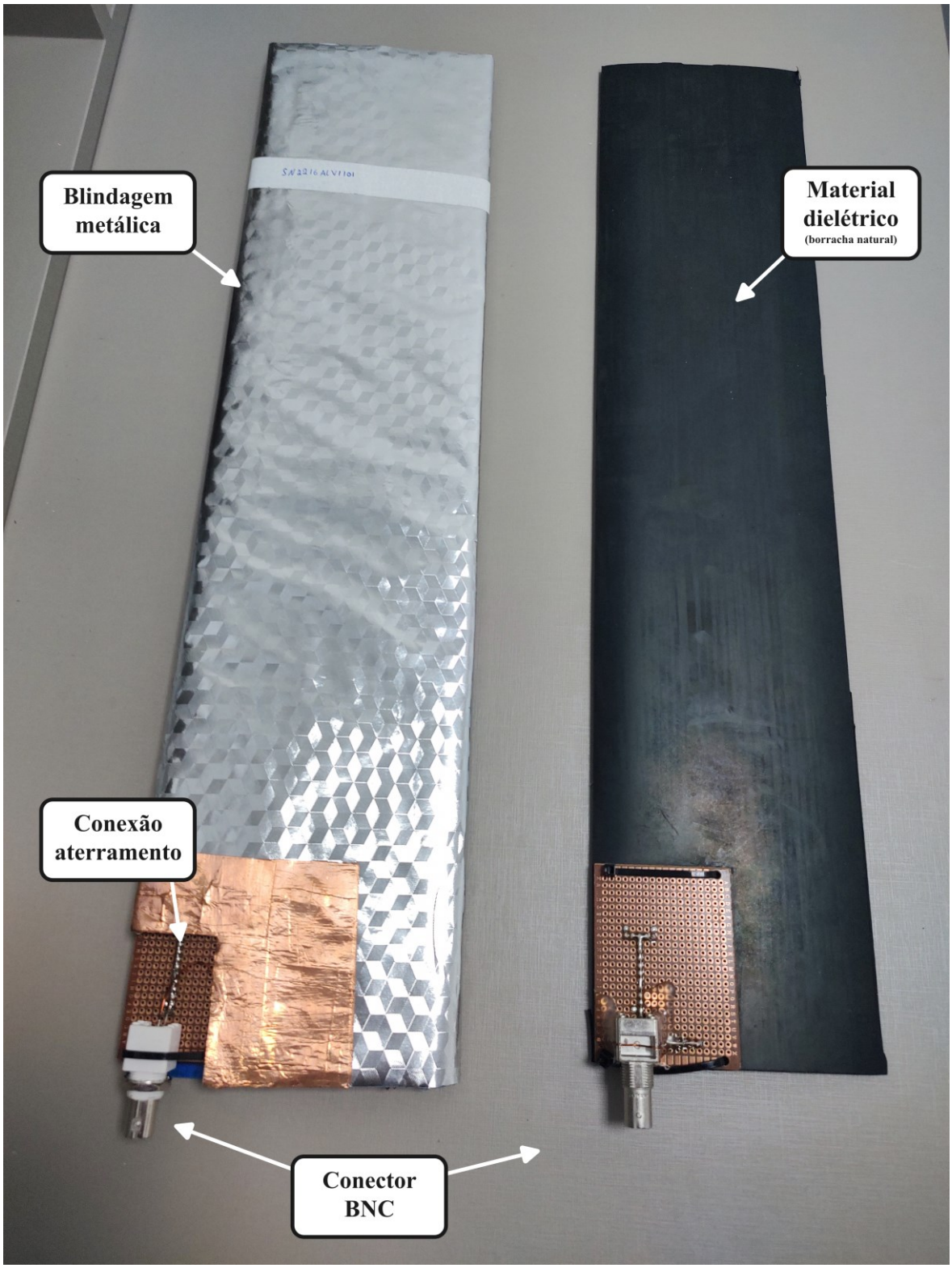
Fonte: O autor.

Figura A- 2 — Acabamento externo do sensor HAS.



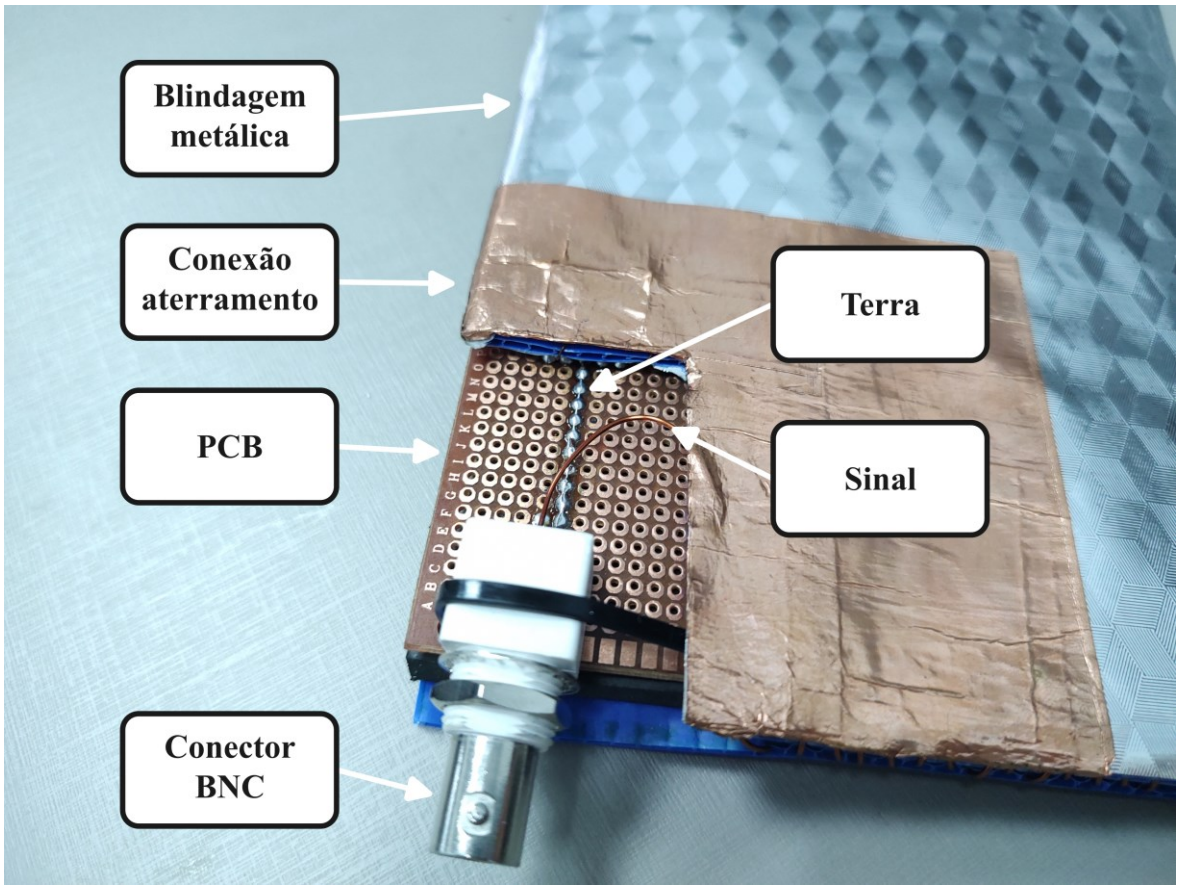
Fonte: O autor.

Figura A- 3 — Núcleo de borrada natural do sensor HAS.



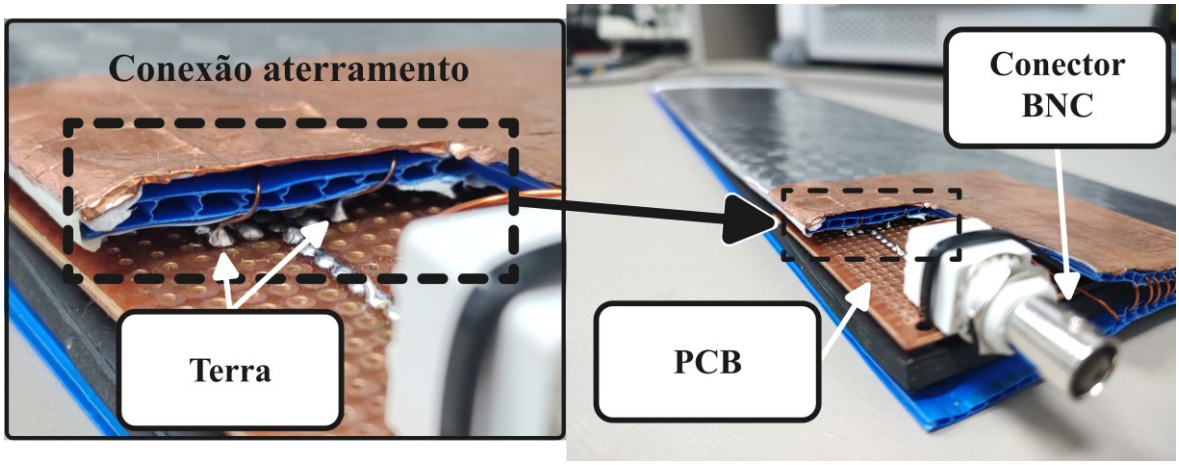
Fonte: O autor.

Figura A- 4 — Conexões elétricas do sensor HAS.



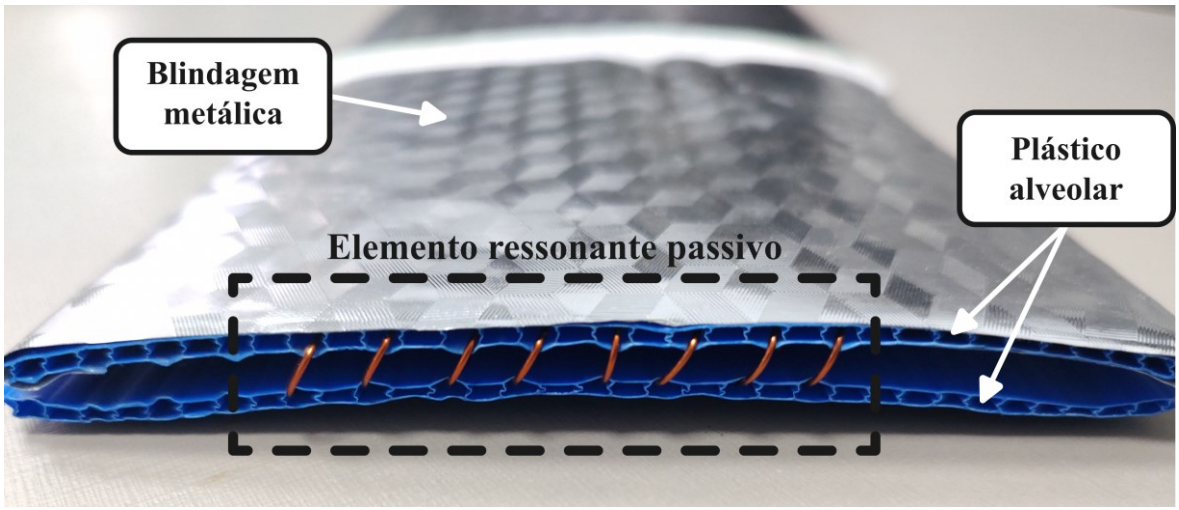
Fonte: O autor.

Figura A- 5 — Detalhamento da conexão do aterramento a blindagem metálica.



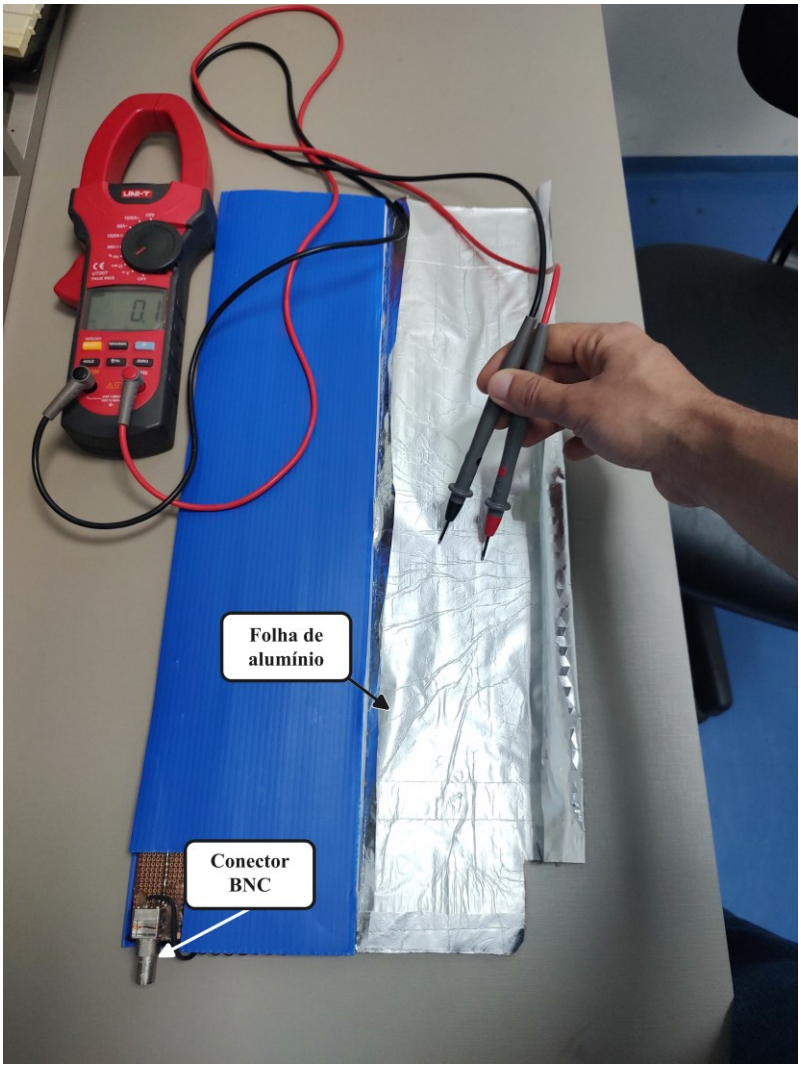
Fonte: O autor.

Figura A- 6 — Disposição do elemento ressonante passivo instalado no sensor HAS.



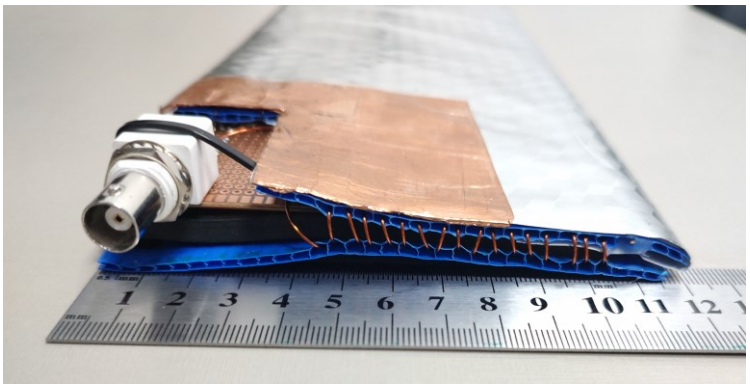
Fonte: O autor.

Figura A- 7 — Detalhamento da blindagem metálica do sensor HAS.



Fonte: O autor.

Figura A- 8 — Largura do sensor HAS.



Fonte: O autor.

Figura A- 9 — Comprimento do sensor HAS.



Fonte: O autor.

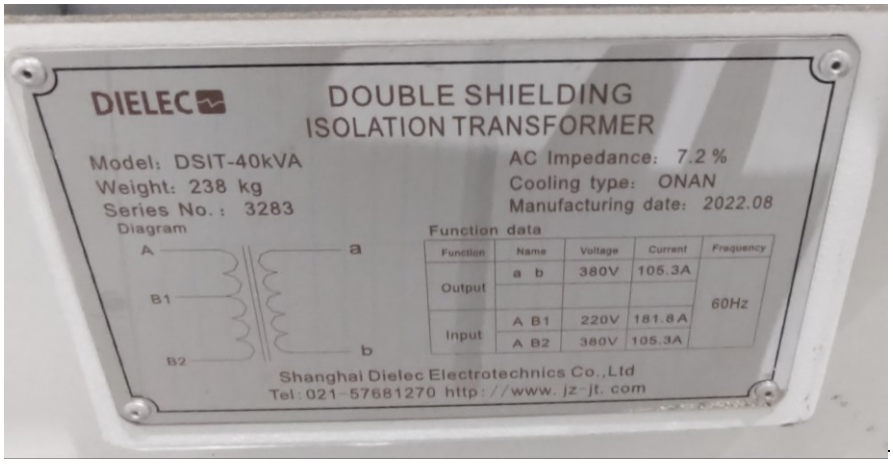
APÊNDICE B – ELEMENTOS QUE COMPOEM POWER FREQUENCY TEST SYSTEM E RESPECTIVAS ESPECIFICAÇÕES

Figura B- 1 — Dispositivo *double shielding isolation transformer*.



Fonte: O autor.

Figura B- 2 — Placa de identificação dispositivo *double shielding isolation transformer*.



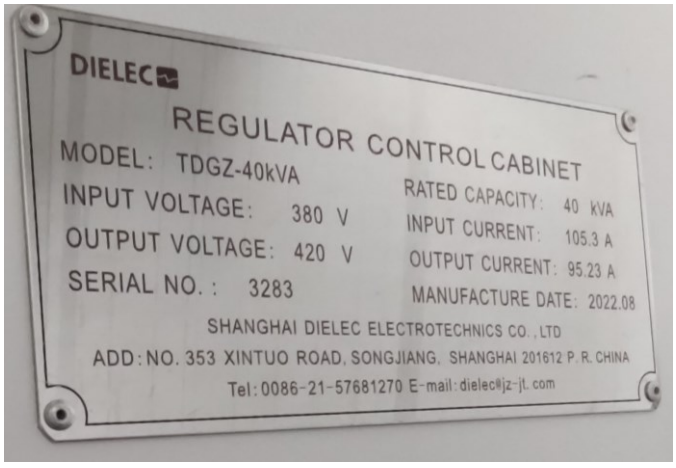
Fonte: O autor.

Figura B- 3 — Dispositivo *Regulator control cabinet*



Fonte: O autor.

Figura B- 4 — Placa de identificação dispositivo *Regulator control cabinet*



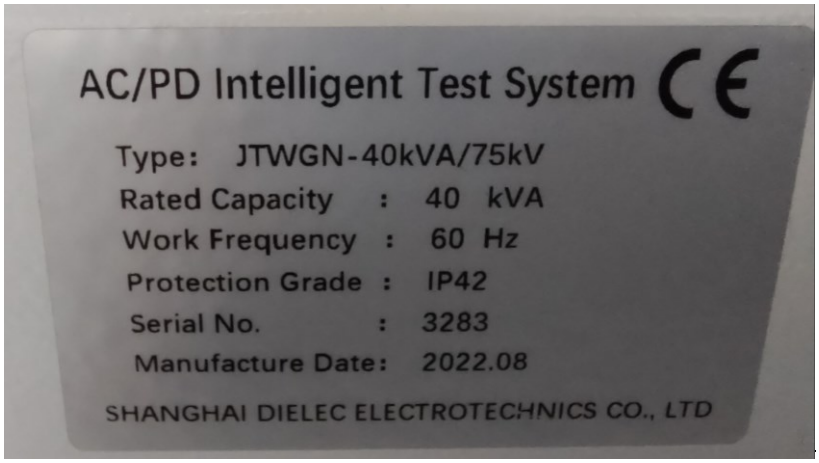
Fonte: O autor.

Figura B- 5 — Dispositivo AC/PD *inteligente test system.*



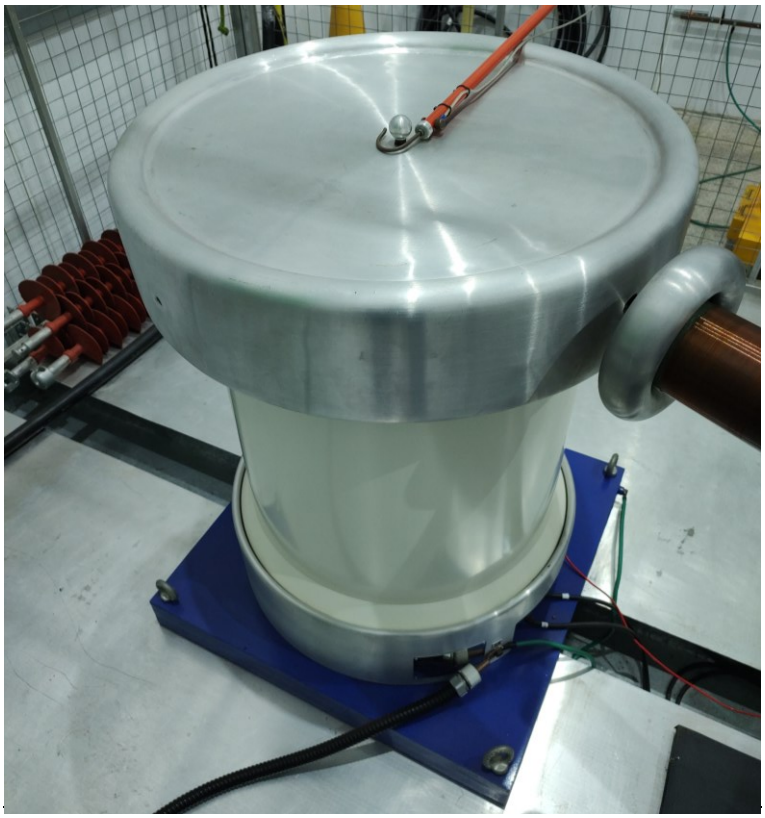
Fonte: O autor.

Figura B- 6 — Placa de identificação dispositivo AC/PD *inteligente test system.*



Fonte: O autor.

Figura B- 7 — Dispositivo *test transformer.*



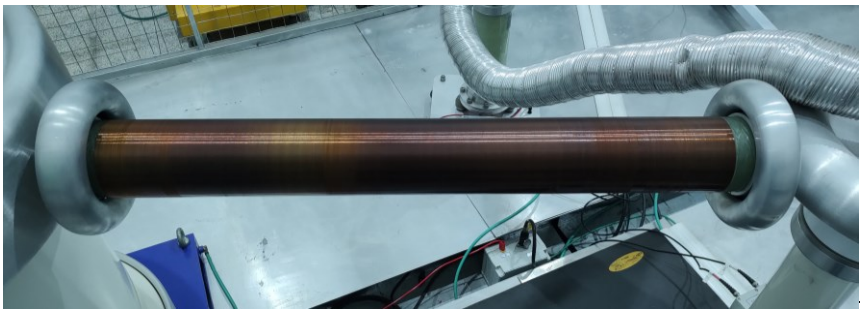
Fonte: O autor.

Figura B- 8 — Placa de identificação dispositivo t*est transformer.*



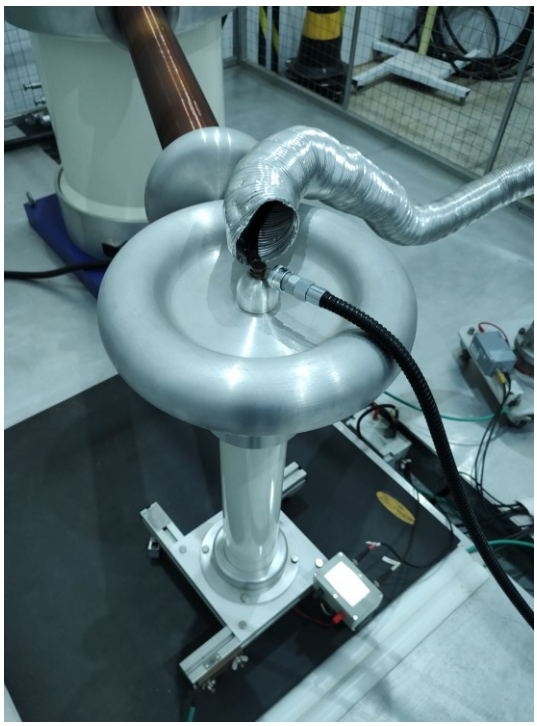
Fonte: O autor.

Figura B- 9 — Dispositivo *current limiting reactor*.



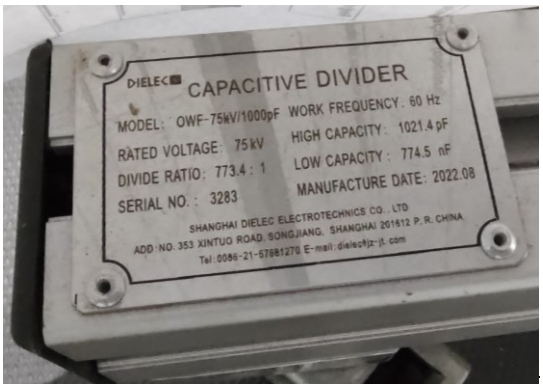
Fonte: O autor.

Figura B- 10 — Dispositivo *capacitive divider*.



Fonte: O autor.

Figura B- 11 — Placa de identificação dispositivo *capacitive divider*.



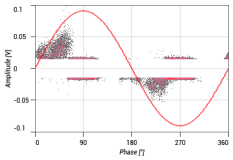
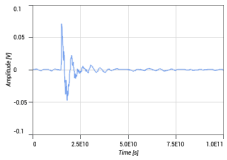
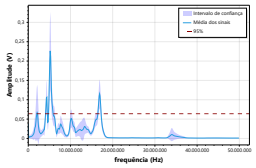
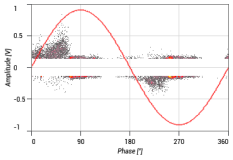
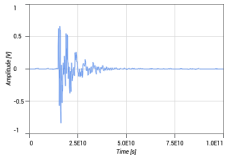
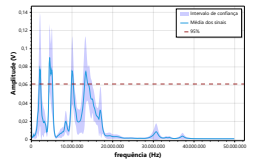
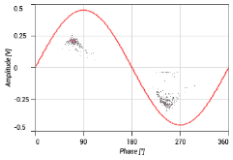
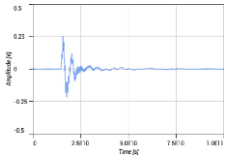
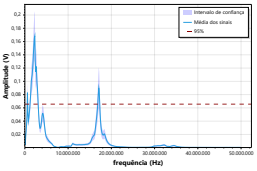
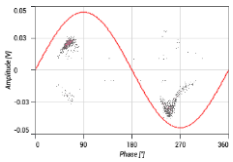
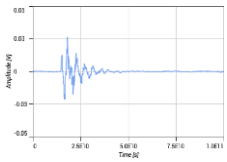
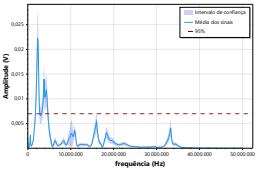
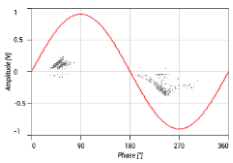
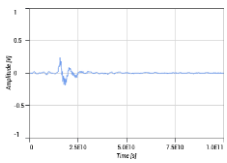
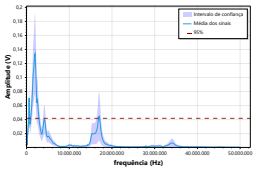
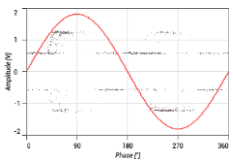
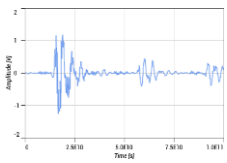
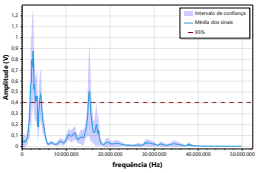
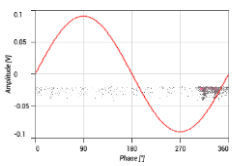
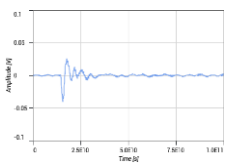
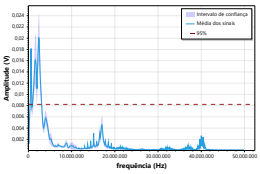
Fonte: O autor.

APÊNDICE C – APRESENTAÇÃO INTEGRAL DOS DADOS COLETADOS SENSOR HAS

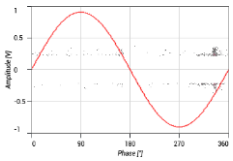
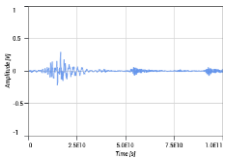
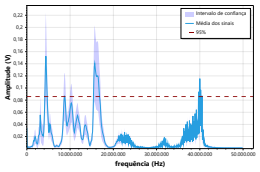
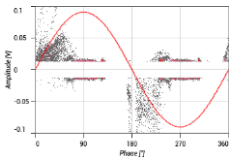
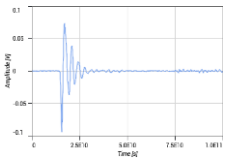
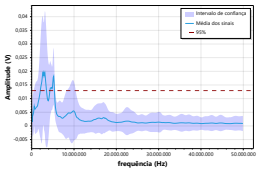
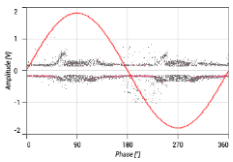
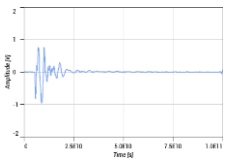
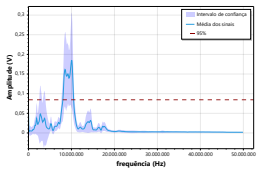
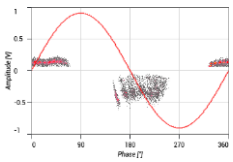
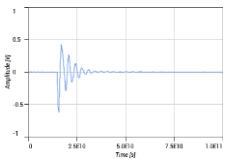
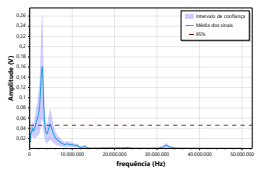
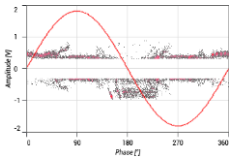
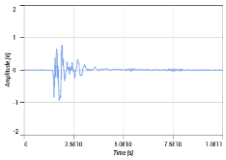
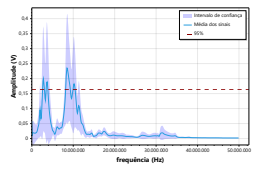
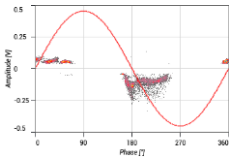
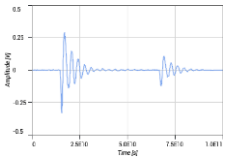
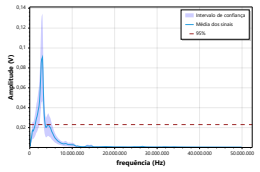
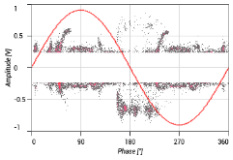
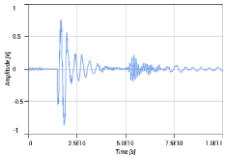
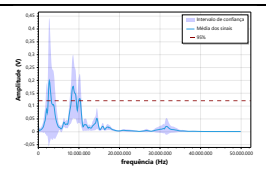
C.1 Avaliação de funcionamento do sensor HAS

Tabela C- 1 — Resultados do experimento 1, avaliação de funcionamento do sensor HAS.

(continua)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HAS			
Nº3	HFCT			
Nº4	HAS			
Nº5	HFCT			
Nº6	HAS			
Nº7	HFCT			

(conclusão)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº8	HAS			
Nº9	HFCT			
Nº10	HAS			
Nº11	HFCT			
Nº12	HAS			
Nº13	HFCT			
Nº14	HAS			

Fonte: O autor.

Tabela C- 2 — Dados adicionais do experimento 1, avaliação de funcionamento do sensor HAS.

(continua)

Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,0417	1063,3	0,0263	2,8246
Nº2	HAS	0,3266	1059,6	0,2179	3,0710
Nº3	HFCT	0,303	66	0,2352	7,7341
Nº4	HAS	0,0339	117,3	0,0254	7,3095

(conclusão)

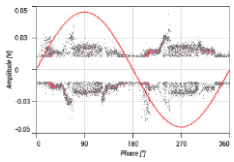
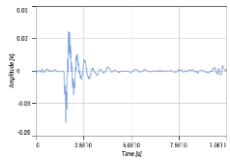
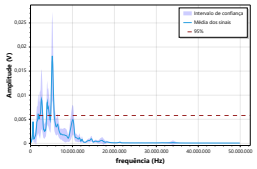
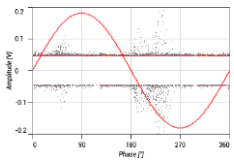
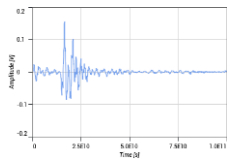
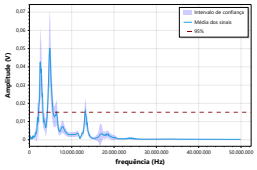
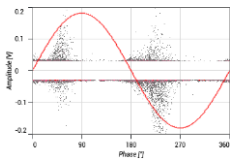
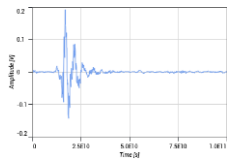
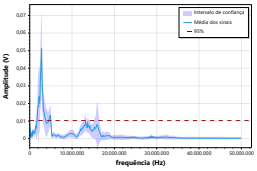
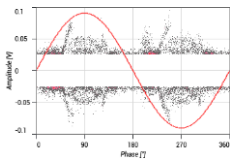
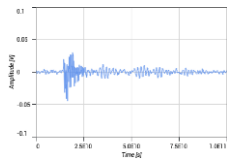
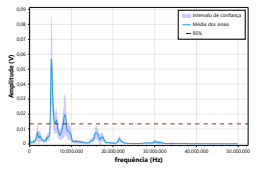
Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº5	HFCT	0,3378	87,3	0,1900	2,8450
Nº6	HAS	1,2503	108,8	1,1059	6,2202
Nº7	HFCT	0,0362	160,6	0,0136	2,5108
Nº8	HAS	0,3267	43,2	0,2625	6,8426
Nº9	HFCT	0,1358	1322,1	0,0318	1,7145
Nº10	HAS	0,3476	759,1	0,2425	2,3359
Nº11	HFCT	0,4245	890,9	0,2406	4,2671
Nº12	HAS	0,8350	1202,9	0,5202	4,0782
Nº13	HFCT	0,1597	1157,3	0,0922	4,5966
Nº14	HAS	0,6838	1212,8	0,4123	2,9829

Fonte: O autor.

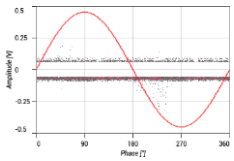
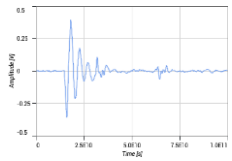
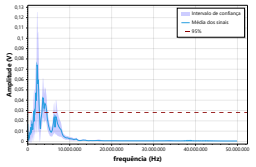
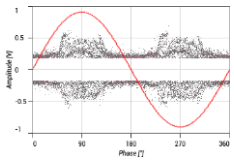
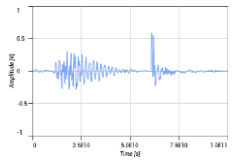
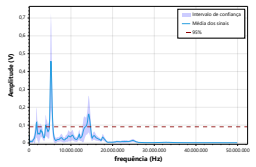
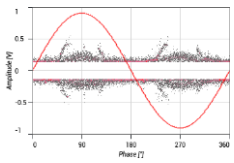
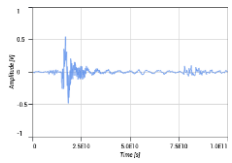
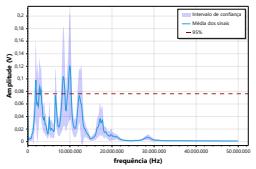
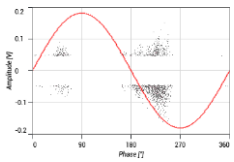
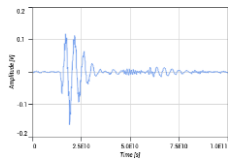
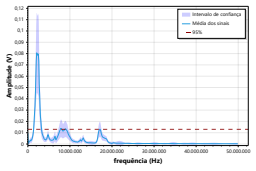
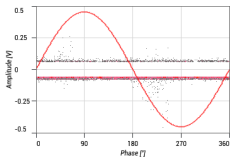
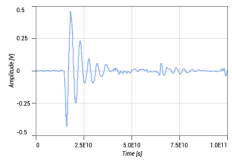
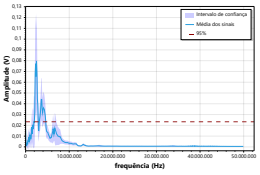
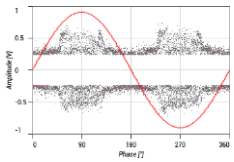
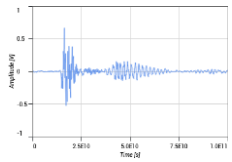
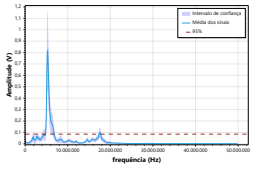
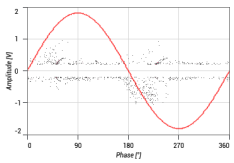
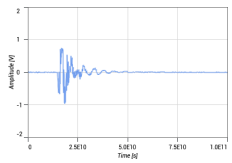
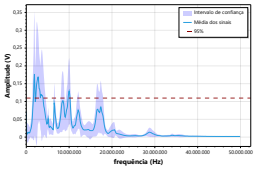
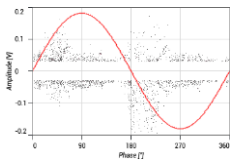
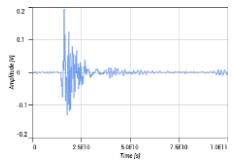
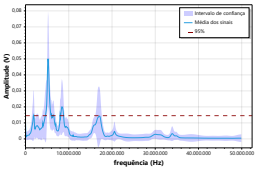
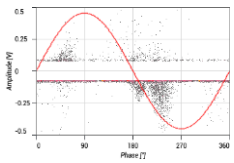
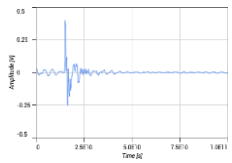
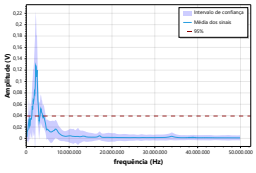
C.2 Otimização da geometria do sensor HAS

Tabela C- 3 — Resultados do experimento 2, otimização da geometria do sensor HAS.

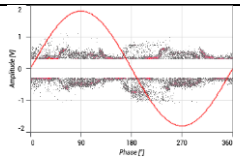
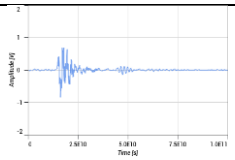
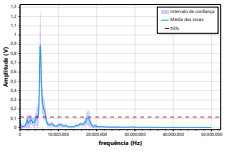
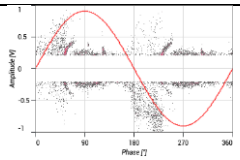
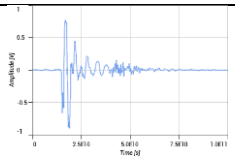
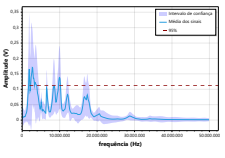
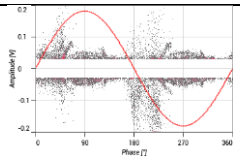
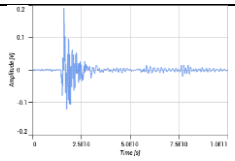
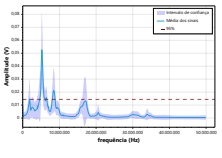
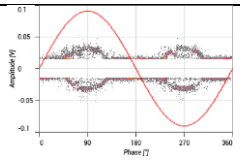
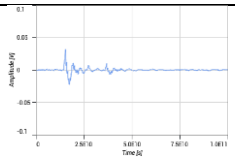
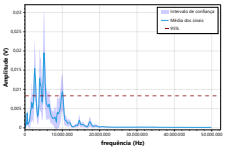
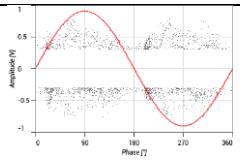
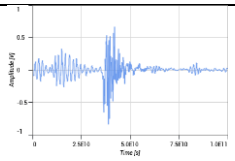
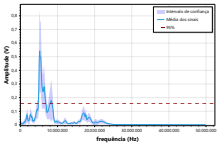
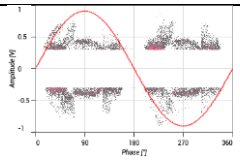
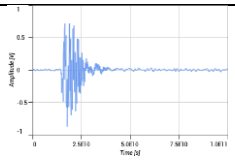
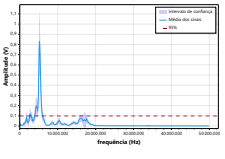
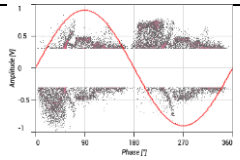
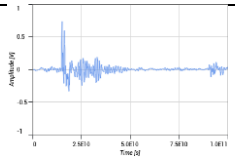
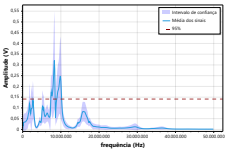
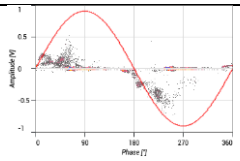
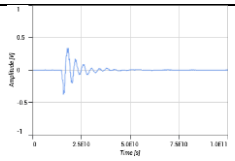
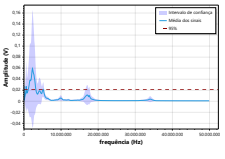
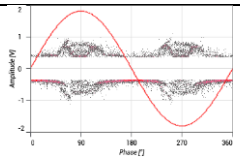
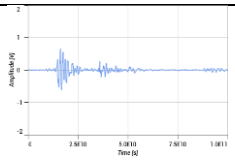
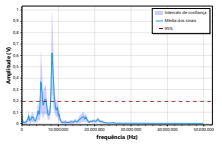
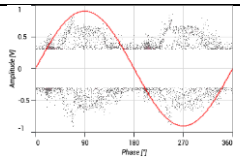
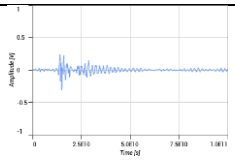
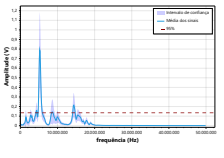
(continua)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HAS 8 m 20AWG			
Nº3	HAS 12 m 20AWG			
Nº4	HAS 16 m 20AWG			

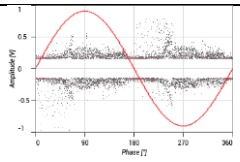
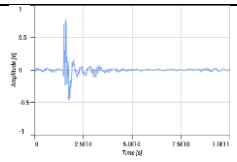
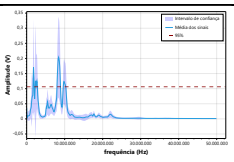
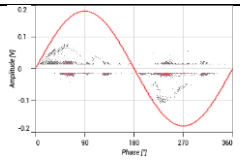
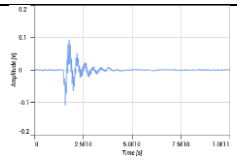
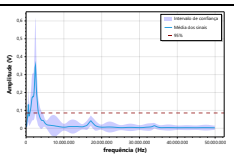
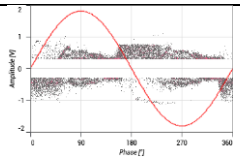
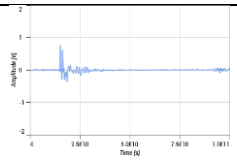
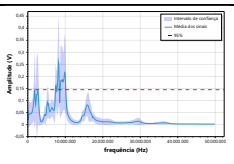
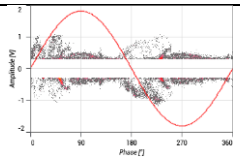
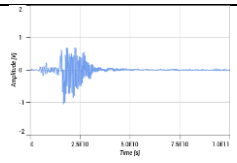
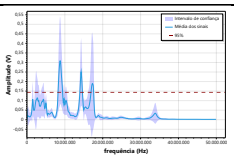
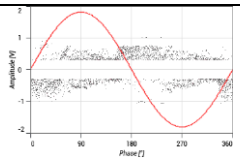
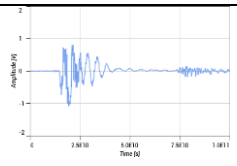
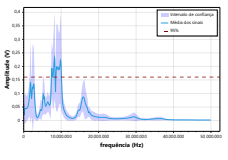
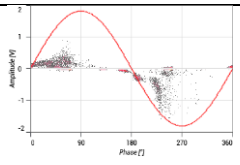
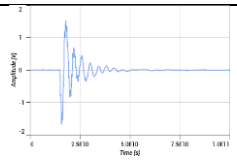
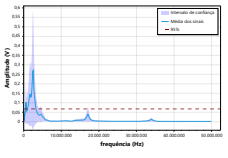
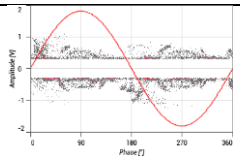
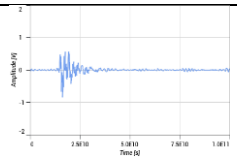
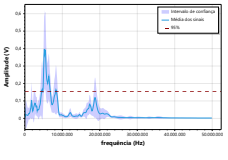
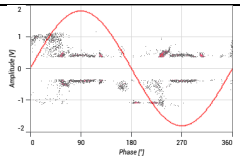
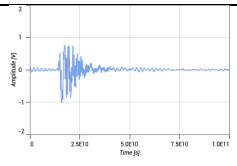
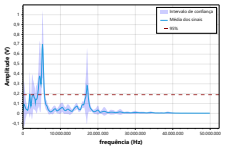
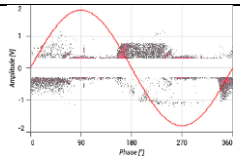
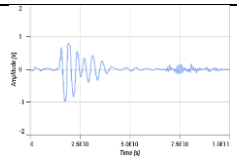
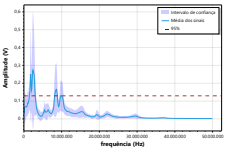
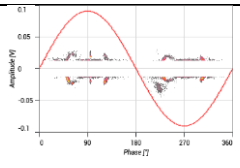
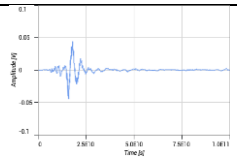
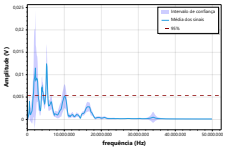
(continua)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº5	HFCT			
Nº6	HAS 8 m 20AWG			
Nº7	HAS 12 m 20AWG			
Nº8	HAS 16 m 20AWG			
Nº8	HFCT			
Nº10	HAS 8 m 20AWG			
Nº11	HAS 12 m 20AWG			
Nº12	HAS 16 m 20AWG			
Nº13	HFCT			

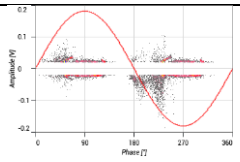
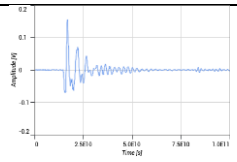
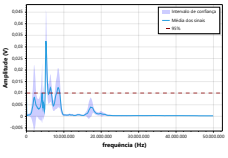
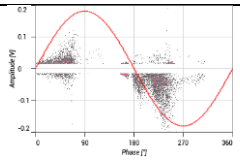
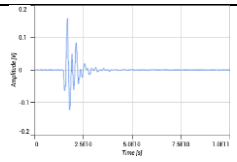
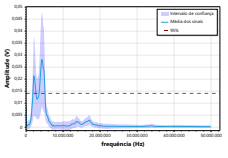
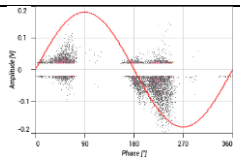
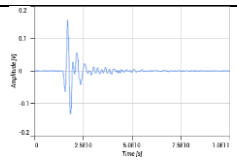
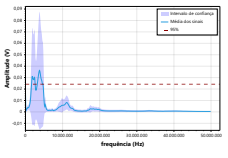
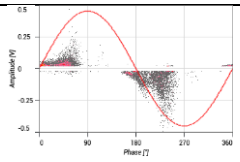
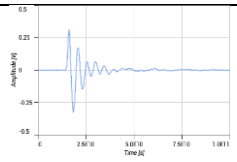
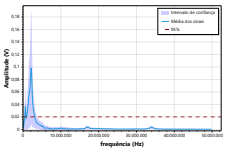
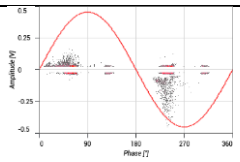
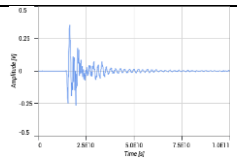
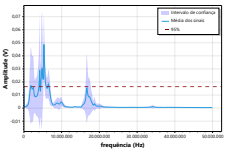
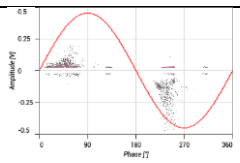
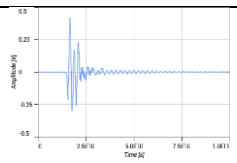
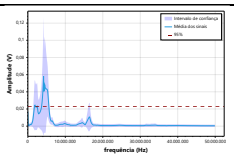
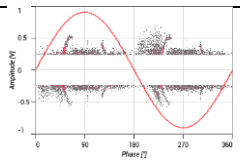
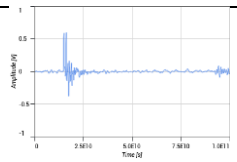
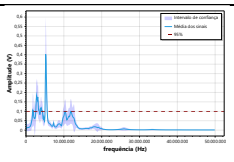
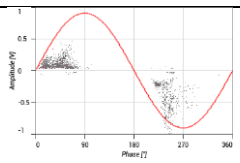
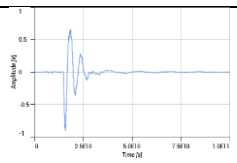
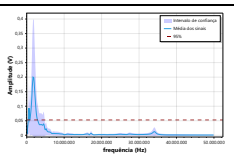
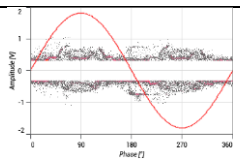
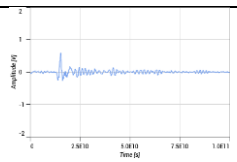
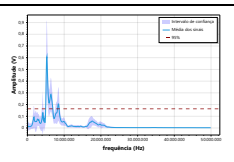
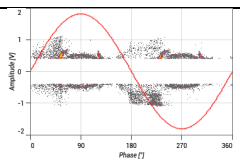
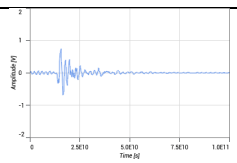
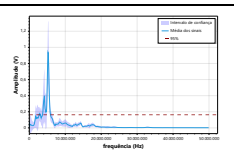
(continua)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº14	HAS 8 m 20AWG			
Nº15	HAS 12 m 20AWG			
Nº16	HAS 16 m 20AWG			
Nº17	HFCT			
Nº18	HAS 8 m 22AWG			
Nº19	HAS 12 m 22AWG			
Nº20	HAS 16 m 22AWG			
Nº21	HFCT			
Nº22	HAS 8 m 22AWG			
Nº23	HAS 12 m 22AWG			

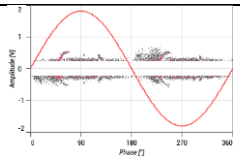
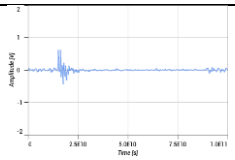
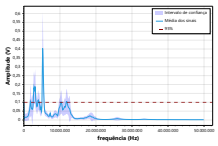
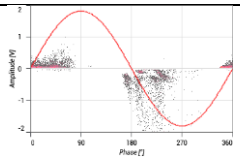
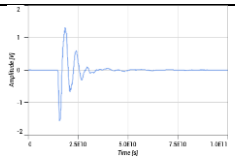
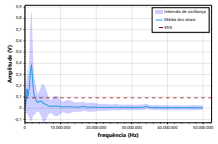
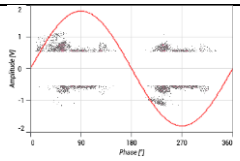
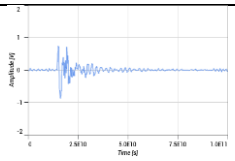
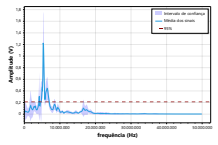
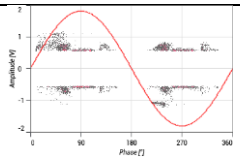
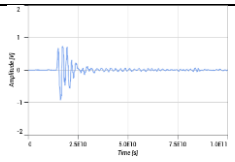
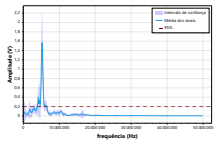
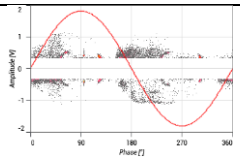
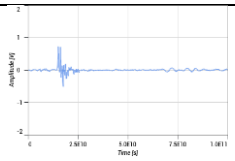
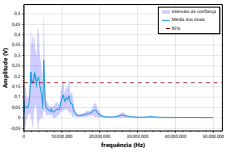
(continua)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº24	HAS 16 m 22AWG			
Nº25	HFCT			
Nº26	HAS 8 m 22AWG			
Nº27	HAS 12 m 22AWG			
Nº28	HAS 16 m 22AWG			
Nº29	HFCT			
Nº30	HAS 8 m 22AWG			
Nº31	HAS 12 m 22AWG			
Nº32	HAS 16 m 22AWG			
Nº33	HFCT			

(continua)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº34	HAS 8 m 26AWG			
Nº35	HAS 12 m 26AWG			
Nº36	HAS 16 m 26AWG			
Nº37	HFCT			
Nº38	HAS 8 m 26AWG			
Nº39	HAS 12 m 26AWG			
Nº40	HAS 16 m 26AWG			
Nº41	HFCT			
Nº42	HAS 8 m 26AWG			
Nº43	HAS 12 m 26AWG			

(conclusão)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº44	HAS 16 m 26AWG			
Nº45	HFCT			
Nº46	HAS 8 m 26AWG			
Nº47	HAS 12 m 26AWG			
Nº48	HAS 16 m 26AWG			

Fonte: O autor.

Tabela C- 4 — Dados adicionais do experimento 2, otimização da geometria do sensor HAS.

(continua)

Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,0234	1106,9	0,01615	3,56955
Nº2	HAS 8 m / 20 AWG	0,0594	881,4	0,05785	4,77815
Nº3	HAS 12 m / 20 AWG	0,0863	823,1	0,0466	1,8388
Nº4	HAS 12 m / 20 AWG	0,0526	898,2	0,0368	3,49955
Nº5	HFCT	0,0853	1143,4	0,0692	0,23915
Nº6	HAS 8 m / 20 AWG	0,4468	1142,7	0,29	3,1584
Nº7	HAS 12 m / 20 AWG	0,2845	1459,7	0,1987	3,3327
Nº8	HAS 12 m / 20 AWG	0,1009	139	0,06665	4,6246
Nº9	HFCT	0,0788	1135	0,06805	0,84005
Nº10	HAS 8 m / 20 AWG	0,5623	1029,2	0,3726	3,4415
Nº11	HAS 12 m / 20 AWG	0,7899	82,4	0,4575	2,191
Nº12	HAS 12 m / 20 AWG	0,135	194,1	0,06325	1,99755
Nº13	HFCT	0,2663	636,1	0,12025	2,1949

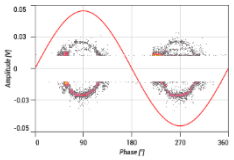
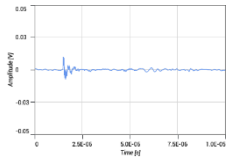
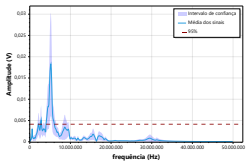
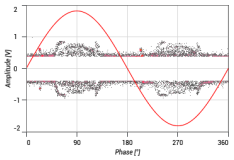
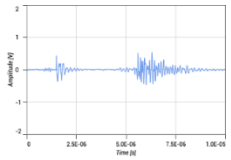
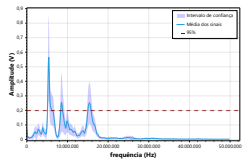
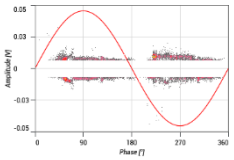
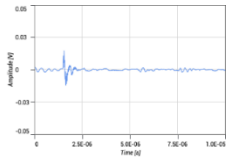
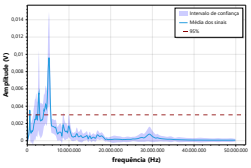
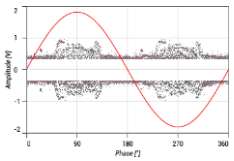
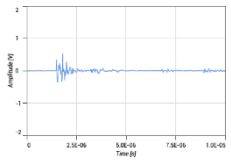
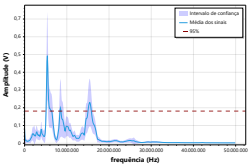
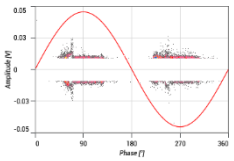
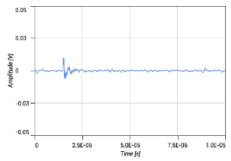
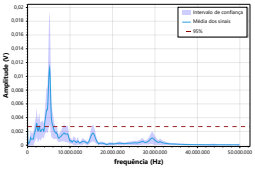
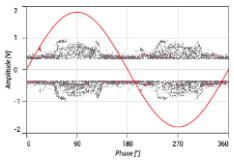
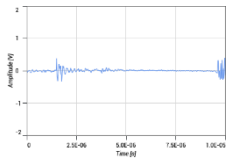
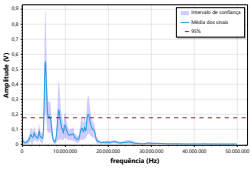
(conclusão)

Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº14	HAS 8 m / 20 AWG	0,7267	1308,3	0,4681	3,2795
Nº15	HAS 12 m / 20 AWG	0,769	517,3	0,39055	2,26885
Nº16	HAS 12 m / 20 AWG	0,1365	1076,7	0,05675	1,9542
Nº17	HFCT	0,033	1466,1	0,0229	3,37535
Nº18	HAS 8 m / 22 AWG	0,6401	216,5	0,4546	3,78635
Nº19	HAS 12 m / 22 AWG	0,5912	1147	0,4282	3,78685
Nº20	HAS 12 m / 22 AWG	0,7001	1544,2	0,42265	4,37495
Nº21	HFCT	0,3556	918,6	0,08185	0,90795
Nº22	HAS 8 m / 22 AWG	0,7673	1335,7	0,5373	3,91575
Nº23	HAS 12 m / 22 AWG	0,649	394,6	0,46505	3,7989
Nº24	HAS 12 m / 22 AWG	0,3578	881,8	0,27145	1,9403
Nº25	HFCT	0,0583	364,6	0,0265	1,553
Nº26	HAS 8 m / 22 AWG	0,7267	1163,6	0,4891	3,14925
Nº27	HAS 12 m / 22 AWG	0,8576	1246,5	0,51095	2,61395
Nº28	HAS 12 m / 22 AWG	0,7312	406,7	0,55335	1,94415
Nº29	HFCT	0,8079	443	0,25665	1,2984
Nº30	HAS 8 m / 22 AWG	0,7267	883,3	0,5444	2,70455
Nº31	HAS 12 m / 22 AWG	1,0878	432,5	0,7588	2,57425
Nº32	HAS 12 m / 22 AWG	0,7538	1072,3	0,59865	2,64885
Nº33	HFCT	0,0253	842,1	0,019	3,9867
Nº34	HAS 8 m / 26 AWG	0,0594	1070,8	0,0337	2,58625
Nº35	HAS 12 m / 26 AWG	0,102	657	0,0438	1,8155
Nº36	HAS 12 m / 26 AWG	0,2254	289,4	0,119	1,8249
Nº37	HFCT	0,198	864,5	0,0746	1,4926
Nº38	HAS 8 m / 26 AWG	0,1827	436,2	0,07095	1,5958
Nº39	HAS 12 m / 26 AWG	0,256	205	0,1117	1,7452
Nº40	HAS 12 m / 26 AWG	0,4716	959,2	0,3201	4,2741
Nº41	HFCT	0,6644	201,6	0,28245	1,7121
Nº42	HAS 8 m / 26 AWG	0,7041	1168,7	0,4784	3,66445
Nº43	HAS 12 m / 26 AWG	0,9885	1214	0,66845	3,6504
Nº44	HAS 12 m / 26 AWG	0,4739	694,9	0,3237	4,3189
Nº45	HFCT	1,5076	504,9	0,30115	1,27755
Nº46	HAS 8 m / 26 AWG	1,0201	360,8	0,73365	4,2061
Nº47	HAS 12 m / 26 AWG	1,0697	440,2	0,7709	4,0854
Nº48	HAS 12 m / 26 AWG	0,8982	796,8	0,6507	3,0129

Fonte: O autor.

C.3 Avaliação da sensibilidade do sensor HAS em diferenciar tipos de DPs

Tabela C- 5 — Resultados do experimento 3, com o sensor HAS exposto ao efeito Corona.

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HAS			
Nº3	HFCT			
Nº4	HAS			
Nº5	HFCT			
Nº6	HAS			

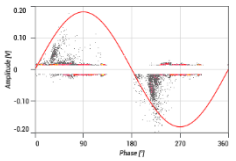
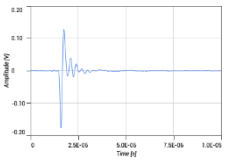
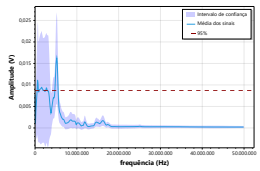
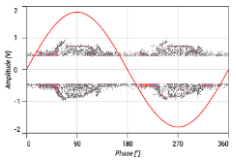
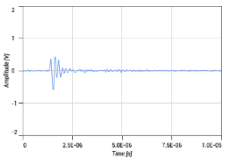
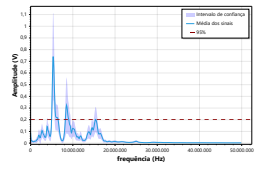
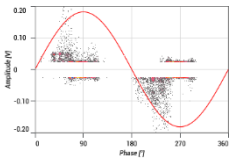
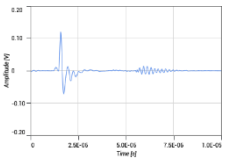
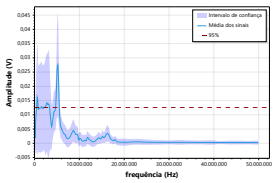
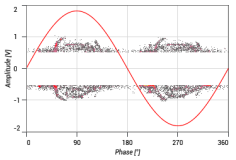
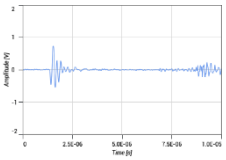
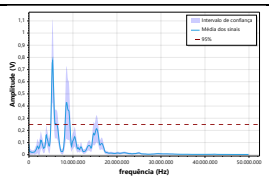
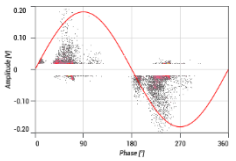
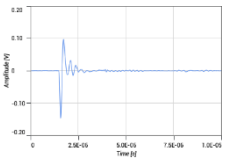
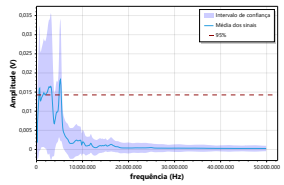
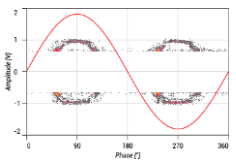
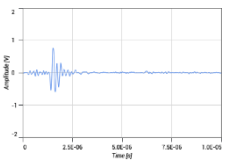
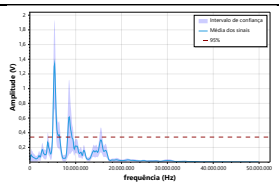
Fonte: O autor.

Tabela C- 6 — Dados adicionais do experimento 3, com o sensor HAS exposto ao efeito Corona.

Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,0216	1202,2	0,0166	4,33005
Nº2	HAS	0,7538	1428,8	0,5304	4,154
Nº3	HFCT	0,0109	1502,3	0,00845	3,22055
Nº4	HAS	0,7628	1605,3	0,50005	3,4683
Nº5	HFCT	0,0128	1225	0,01095	3,9677
Nº6	HAS	0,7764	1816,2	0,51545	3,4987

Fonte: O autor.

Tabela C- 7 — Resultados do experimento 3, com o sensor HAS exposto a descargas Interna.

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HAS			
Nº3	HFCT			
Nº4	HAS			
Nº5	HFCT			
Nº6	HAS			

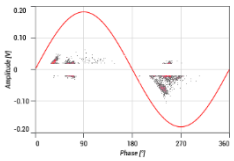
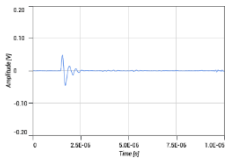
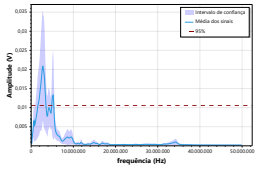
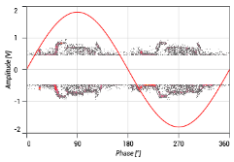
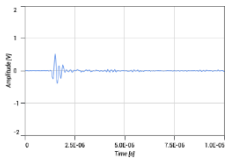
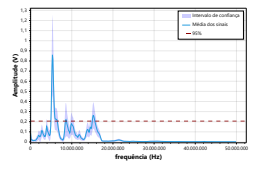
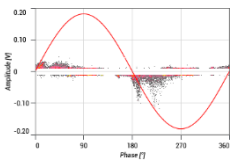
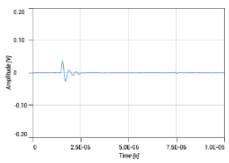
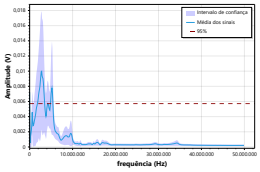
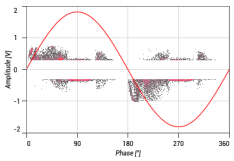
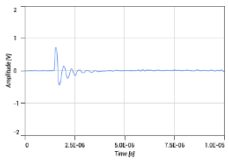
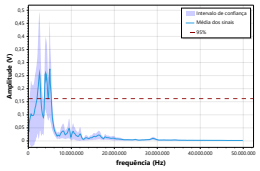
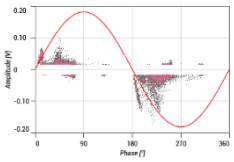
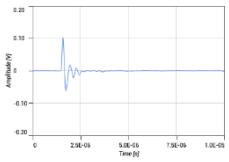
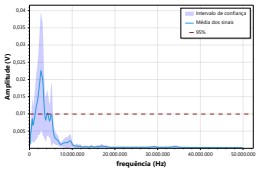
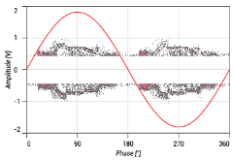
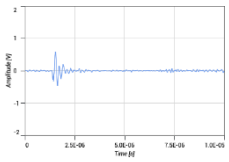
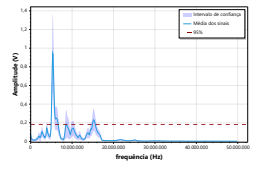
Fonte: O autor.

Tabela C- 8 — Dados adicionais do experimento 3, com o sensor HAS exposto a descargas Interna.

Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,0718	1281,4	0,0399	1,60315
Nº2	HAS	0,817	1547,6	0,59595	4,89715
Nº3	HFCT	0,0958	659,6	0,04885	1,7534
Nº4	HAS	0,8892	1361,5	0,70875	5,6207
Nº5	HFCT	0,1037	766,4	0,04385	1,5583
Nº6	HAS	0,9885	1112,9	0,8719	7,57585

Fonte: O autor.

Tabela C- 9 — Resultados do experimente 3, com sensor HAS exposto a descargas de Superfície.

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HAS			
Nº3	HFCT			
Nº4	HAS			
Nº5	HFCT			
Nº6	HAS			

Fonte: O autor.

Tabela C- 10 — Dados adicionais do experimento 3, com sensor HAS exposto a descargas superfície.

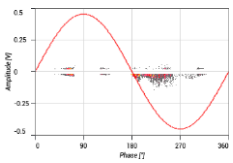
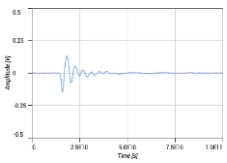
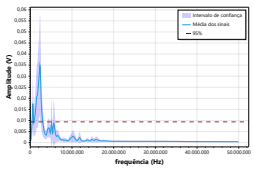
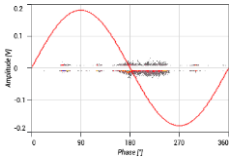
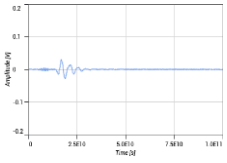
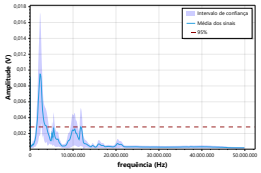
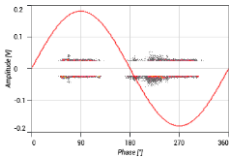
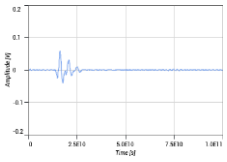
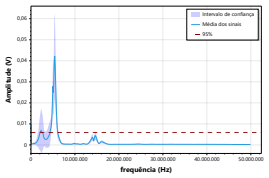
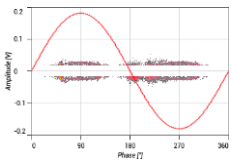
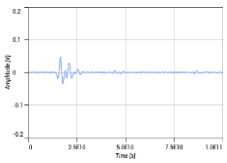
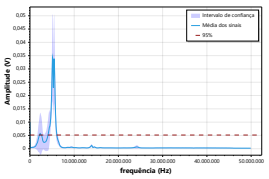
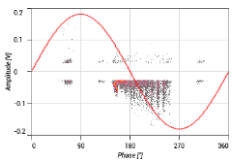
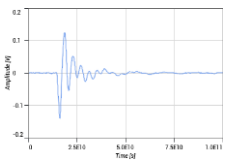
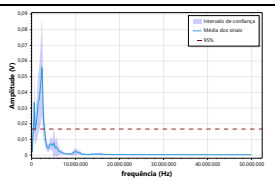
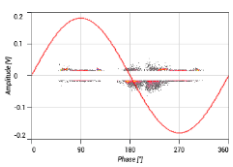
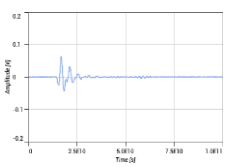
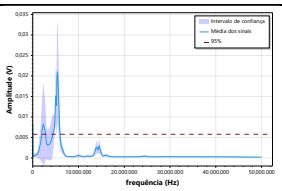
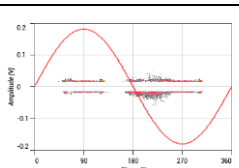
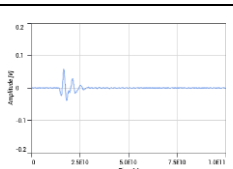
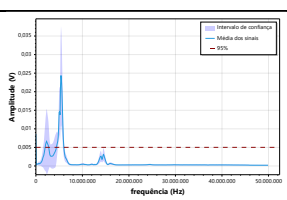
Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,0642	284,1	0,03435	3,09135
Nº2	HAS	0,826	1305,8	0,6345	5,2742
Nº3	HFCT	0,0324	1304,7	0,0201	2,4983
Nº4	HAS	0,7809	1411,7	0,53055	3,36525
Nº5	HFCT	0,0863	888,2	0,037	1,96545
Nº6	HAS	0,7764	1581,2	0,60415	5,03735

Fonte: O autor.

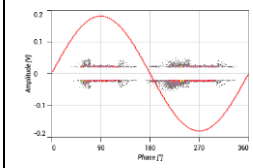
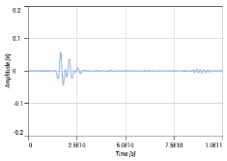
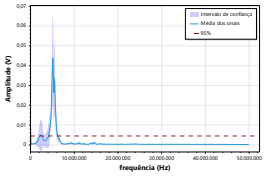
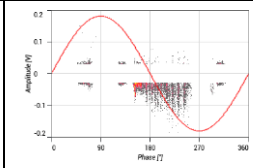
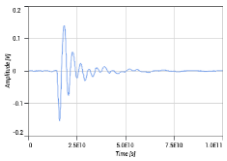
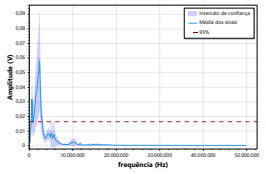
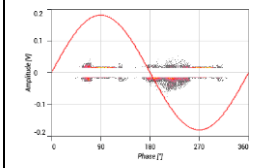
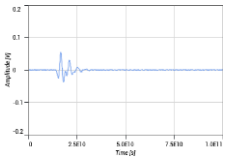
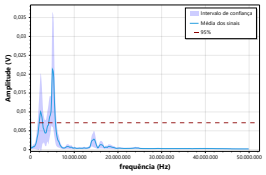
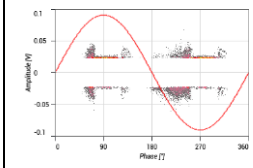
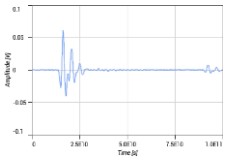
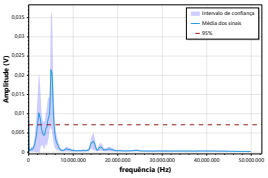
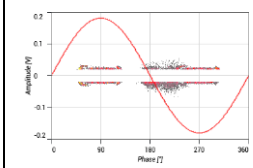
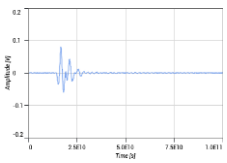
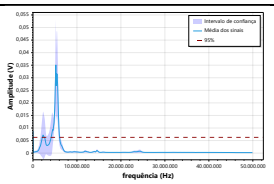
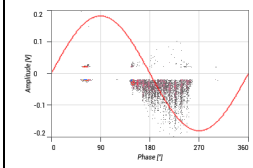
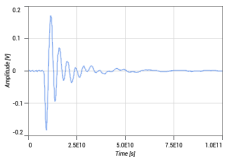
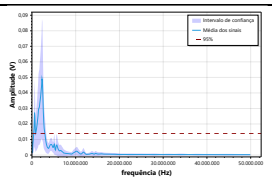
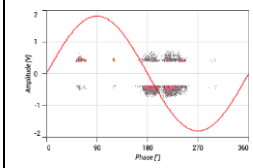
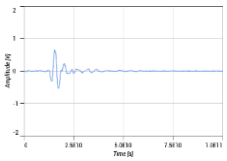
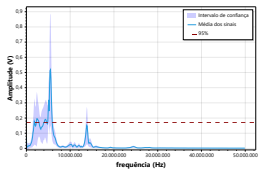
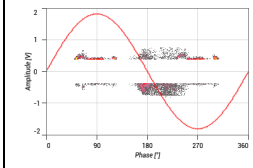
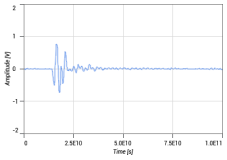
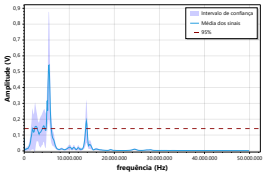
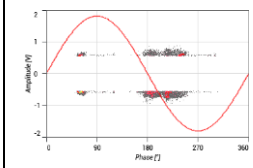
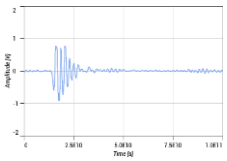
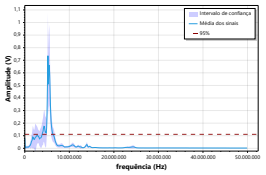
C.4 Verificação o desempenho do sensor HAS em cabo de média tensão com blindagem metálica de chumbo

Tabela C- 11 — Resultados do experimento 4, verificação o desempenho do sensor HAS em cabo de média tensão com blindagem metálica de chumbo.

(continua)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HAS 12 m 20AWG			
Nº3	HAS 12 m 22AWG			
Nº4	HAS 12 m 26AWG			
Nº5	HFCT			
Nº6	HAS 12 m 20AWG			
Nº7	HAS 12 m 22AWG			

(conclusão)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº8	HAS 12 m 26AWG			
Nº8	HFCT			
Nº10	HAS 12 m 20AWG			
Nº11	HAS 12 m 22AWG			
Nº12	HAS 12 m 26AWG			
Nº13	HFCT			
Nº14	HAS 12 m 20AWG			
Nº15	HAS 12 m 22AWG			
Nº16	HAS 12 m 26AWG			

Fonte: O autor.

Tabela C- 12 — Dados adicionais do experimento 4, verificação o desempenho do sensor HAS em cabo de média tensão com blindagem metálica de chumbo.

Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,058	757,6	0,0334	2,1042
Nº2	HAS 12 m / 20 AWG	0,0162	926,5	0,0108	2,9536
Nº3	HAS 12 m / 22 AWG	0,0324	1242,2	0,0298	4,6845
Nº4	HAS 12 m / 26 AWG	0,0308	1266,6	0,0228	4,6686
Nº5	HFCT	0,082	825	0,05	2,438
Nº6	HAS 12 m / 20 AWG	0,0302	1237	0,0233	3,101
Nº7	HAS 12 m / 22 AWG	0,0254	1423,2	0,0212	3,4256
Nº8	HAS 12 m / 26 AWG	0,0345	1265,3	0,0287	3,7657
Nº9	HFCT	0,0847	863,6	0,0537	2,5801
Nº10	HAS 12 m / 20 AWG	0,0345	931,6	0,141	0,024
Nº11	HAS 12 m / 22 AWG	0,0369	893	0,0305	4,977
Nº12	HAS 12 m / 26 AWG	0,0329	1377,5	0,0279	3,6556
Nº13	HFCT	0,089	938,9	0,0464	1,8231
Nº14	HAS 12 m / 20 AWG	0,6093	839,4	0,4993	5,8212
Nº15	HAS 12 m / 22 AWG	0,668	1243,4	0,5502	5,0993
Nº16	HAS 12 m / 26 AWG	0,7402	865	0,665	9,892

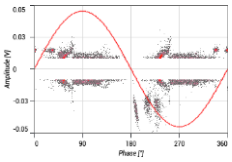
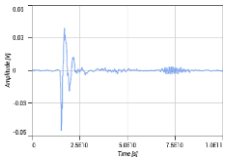
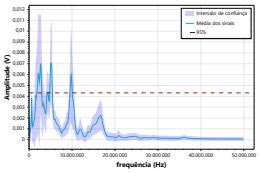
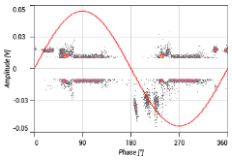
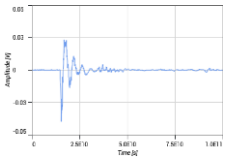
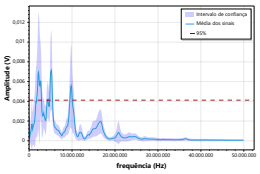
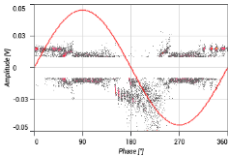
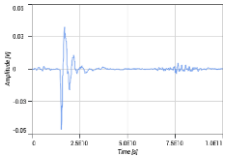
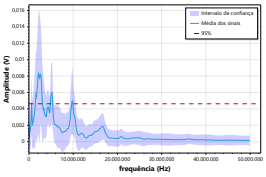
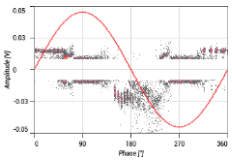
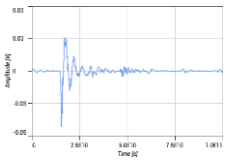
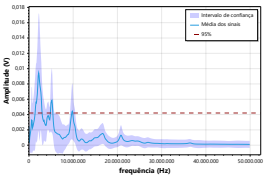
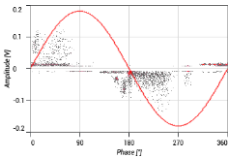
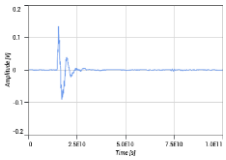
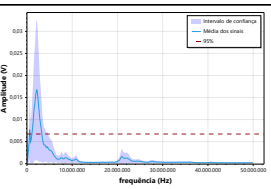
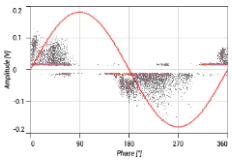
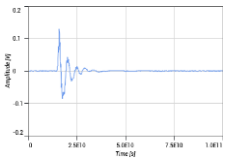
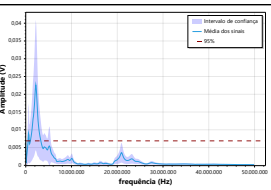
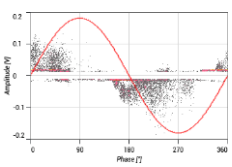
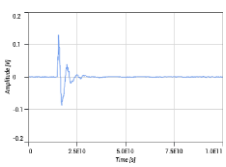
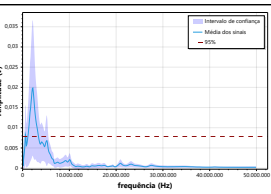
Fonte: O autor.

APÊNDICE D – APRESENTAÇÃO INTEGRAL DOS DADOS COLETADOS SENSOR HRSS

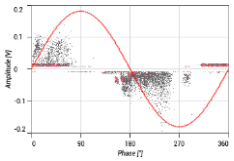
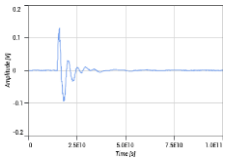
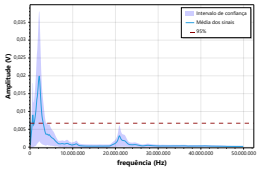
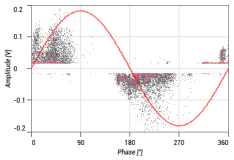
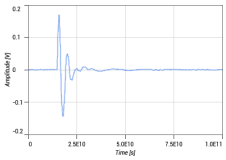
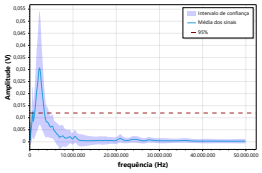
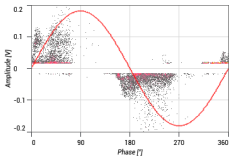
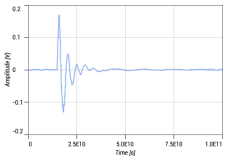
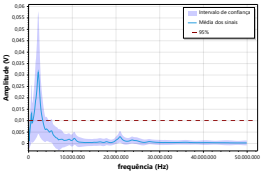
D.1 Avaliação de funcionamento do sensor HRSS

Tabela D- 1— Resultados do experimento 5, avaliação de funcionamento do sensor HRSS.

(continua)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HRSS			
Nº3	HFCT			
Nº4	HRSS			
Nº5	HFCT			
Nº6	HRSS			
Nº7	HFCT			

(conclusão)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº8	HRSS			
Nº8	HFCT			
Nº10	HRSS			

Fonte: O autor.

Tabela D- 2 — Dados adicionais do experimento 5, avaliação de funcionamento do sensor HRSS.

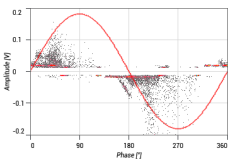
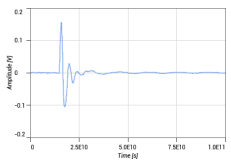
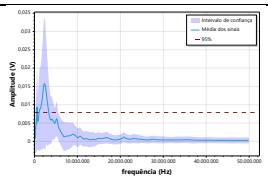
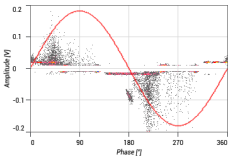
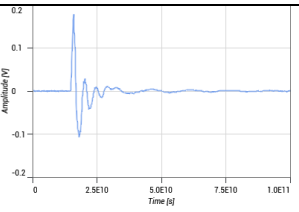
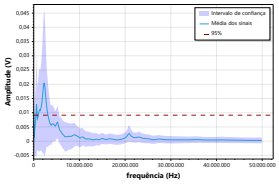
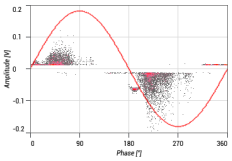
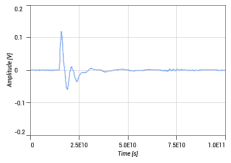
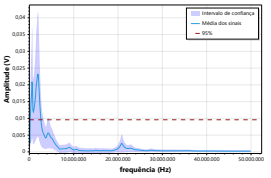
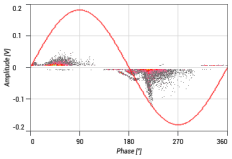
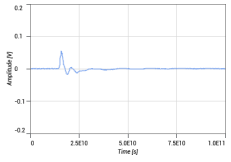
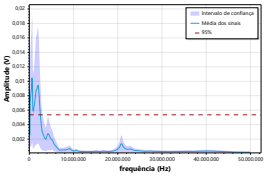
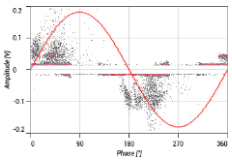
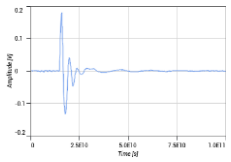
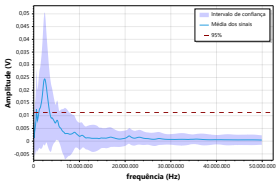
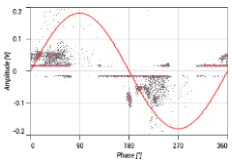
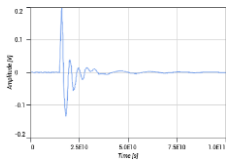
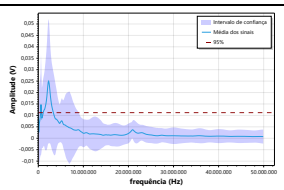
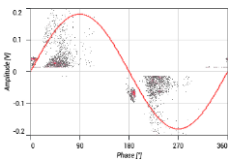
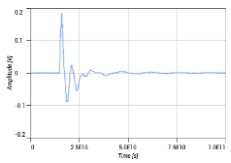
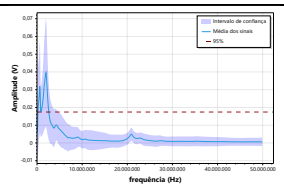
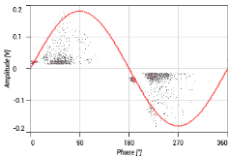
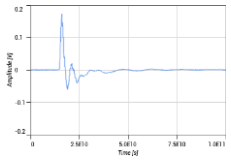
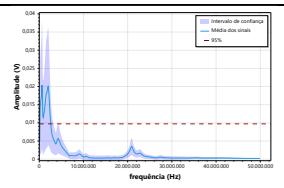
Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,0297	1507	0,0157	3,2383
Nº2	HRSS	0,0283	1454,5	0,01525	3,31285
Nº3	HFCT	0,0455	1331,7	0,0159	3,7659
Nº4	HRSS	0,0296	1411,6	0,01615	3,7375
Nº5	HFCT	0,0702	464,5	0,02615	1,35925
Nº6	HRSS	0,0739	1469	0,0322	1,5088
Nº7	HFCT	0,0743	1370,7	0,03275	1,49095
Nº8	HRSS	0,0691	1219,3	0,0263	1,39065
Nº9	HFCT	0,102	1065,2	0,0446	1,54965
Nº10	HRSS	0,0988	1018	0,03965	1,45325

Fonte: O autor.

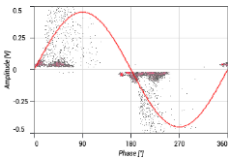
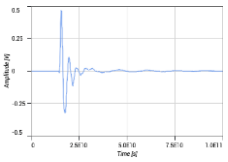
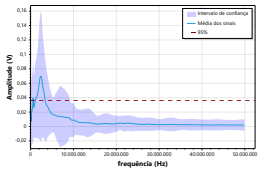
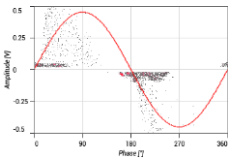
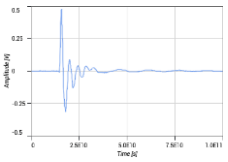
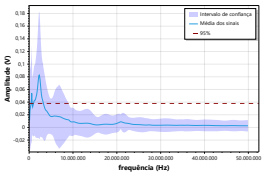
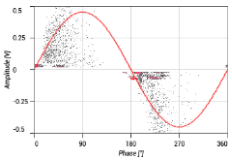
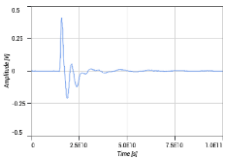
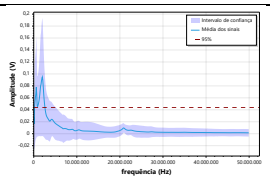
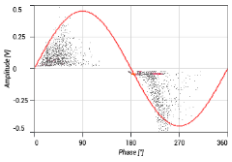
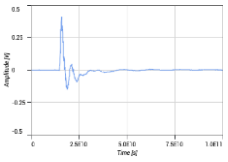
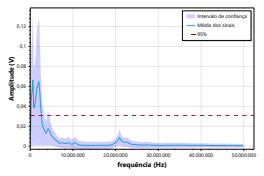
D.2 Otimização da relação de espiras do sensor HRSS

Tabela D- 3 — Resultados do experimento 6, otimização da relação de espiras do sensor HRSS.

(continua)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HRSS N = 2			
Nº3	HRSS N = 4			
Nº4	HRSS N = 8			
Nº5	HFCT			
Nº6	HRSS N = 2			
Nº7	HRSS N = 4			
Nº8	HRSS N = 8			

(conclusão)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº8	HFCT			
Nº10	HRSS N = 2			
Nº11	HRSS N = 4			
Nº12	HRSS N = 8			

Fonte: O autor.

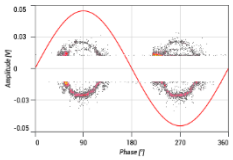
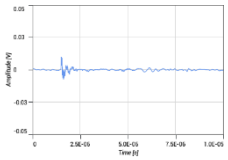
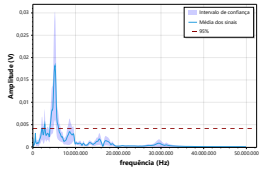
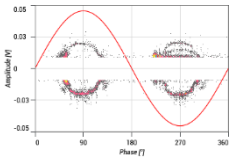
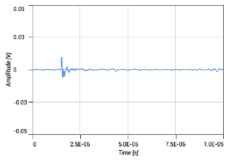
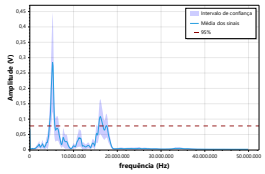
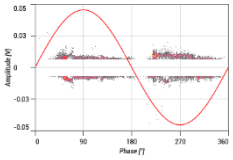
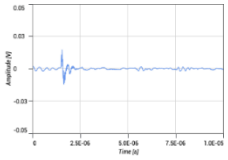
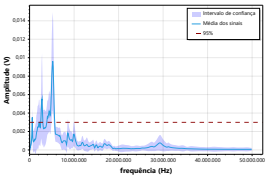
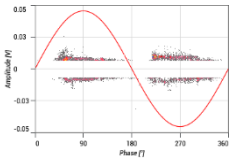
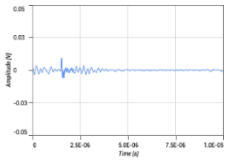
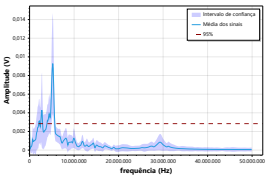
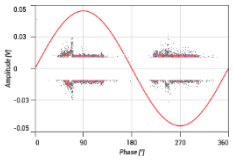
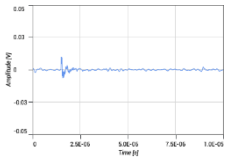
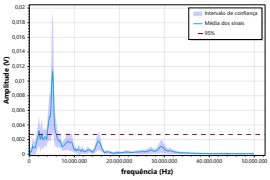
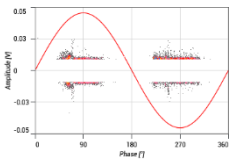
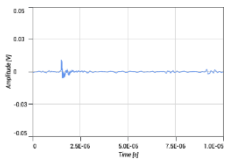
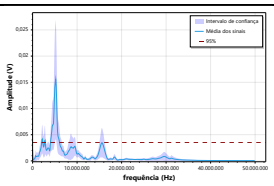
Tabela D- 4 — Dados adicionais do experimento 6, otimização da relação de espiras do sensor HRSS.

Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,0729	1548	0,0297	1,50275
Nº2	HRSS N = 2	0,1009	1622,9	0,0341	1,3781
Nº3	HRSS N = 4	0,0804	876,1	0,0351	1,7344
Nº4	HRSS N = 8	0,0426	916,4	0,0164	1,72845
Nº5	HFCT	0,1176	1428,3	0,0383	1,2318
Nº6	HRSS N = 2	0,2137	1399,1	0,03275	1,3465
Nº7	HRSS N = 4	0,1938	400,9	0,06355	1,40275
Nº8	HRSS N = 8	0,0994	284,6	0,03745	1,48755
Nº9	HFCT	0,5579	504,4	0,08185	1,0107
Nº10	HRSS N = 2	0,5559	300,9	0,0918	1,03335
Nº11	HRSS N = 4	0,5328	407,8	0,11815	1,0613
Nº12	HRSS N = 8	0,3484	285,6	0,10805	1,26115

Fonte: O autor.

D.3 Avaliação da sensibilidade do sensor HRSS em diferenciar tipos de DPs

Tabela D- 5 — Resultados do experimento 7, com o sensor HRSS exposto ao efeito Corona.

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HRSS			
Nº3	HFCT			
Nº4	HRSS			
Nº5	HFCT			
Nº6	HRSS			

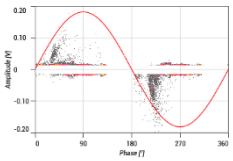
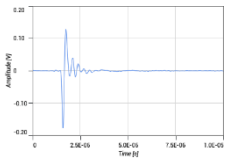
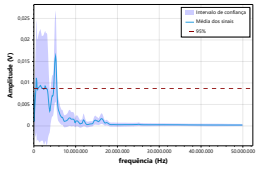
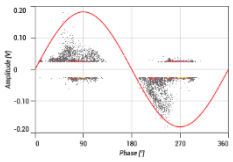
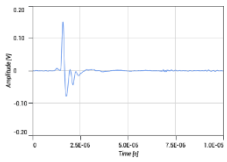
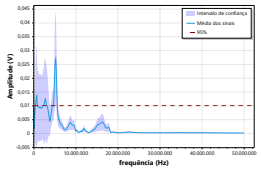
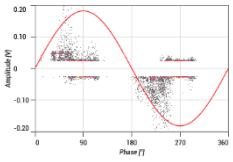
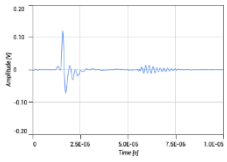
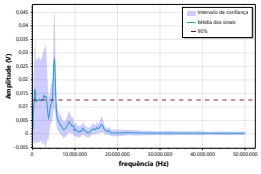
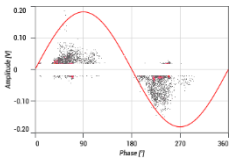
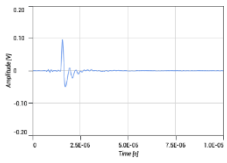
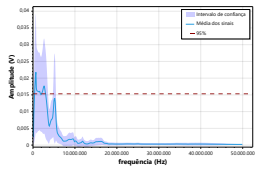
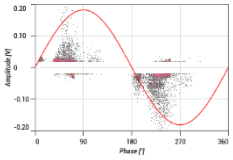
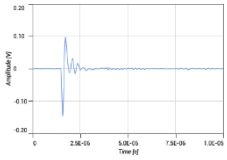
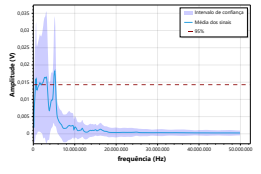
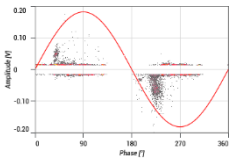
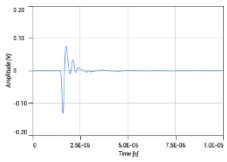
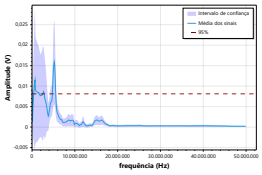
Fonte: O autor.

Tabela D- 6 — Dados adicionais do experimento 7, com o sensor HRSS exposto ao efeito Corona.

Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,0216	1202,2	0,0166	4,33005
Nº2	HRSS	0,012	1122,4	0,01065	4,695
Nº3	HFCT	0,0109	1502,3	0,00845	3,22055
Nº4	HRSS	0,0106	1423,9	0,0084	4,75655
Nº5	HFCT	0,0128	1225	0,01095	3,9677
Nº6	HRSS	0,0206	1146	0,01565	3,7929

Fonte: O autor.

Tabela D- 7 — Resultados do experimento 7, com o sensor HRSS exposto a descargas Interna.

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HRSS			
Nº3	HFCT			
Nº4	HRSS			
Nº5	HFCT			
Nº6	HRSS			

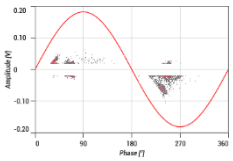
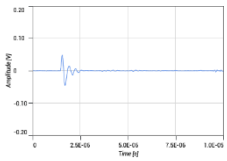
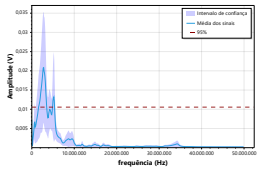
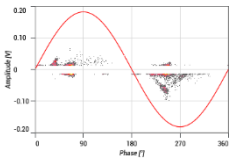
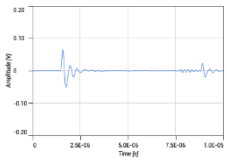
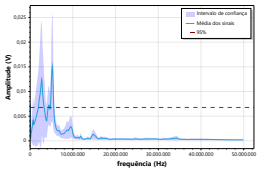
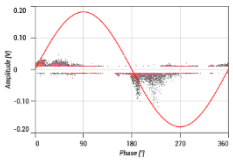
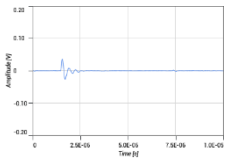
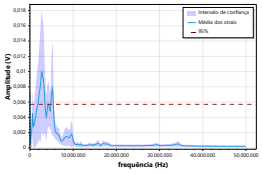
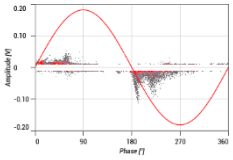
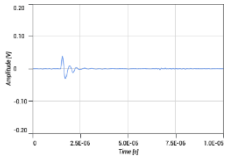
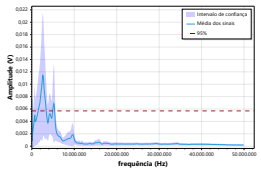
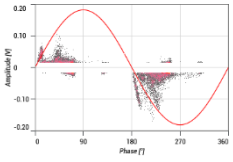
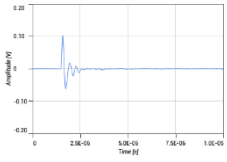
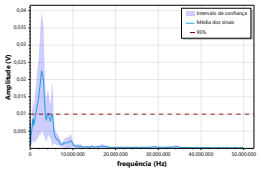
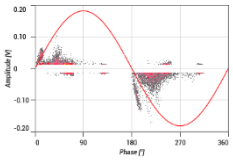
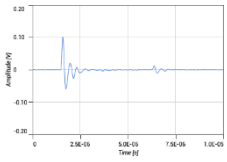
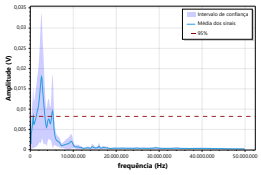
Fonte: O autor.

Tabela D- 8 — Dados adicionais do experimento 7, com o sensor HRSS exposto a descargas Interna.

Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,0718	1281,4	0,0399	1,60315
Nº2	HRSS	0,0836	891,6	0,0421	1,93555
Nº3	HFCT	0,0958	659,6	0,04885	1,7534
Nº4	HRSS	0,0899	398,7	0,04295	1,9455
Nº5	HFCT	0,1037	766,4	0,04385	1,5583
Nº6	HRSS	0,0642	1163	0,0376	1,7837

Fonte: O autor.

Tabela D- 9 — Resultados do experimento 7, com sensor HRSS exposto a descargas de Superfície.

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HRSS			
Nº3	HFCT			
Nº4	HRSS			
Nº5	HFCT			
Nº6	HRSS			

Fonte: O autor.

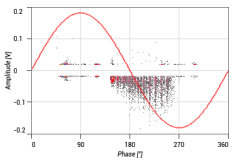
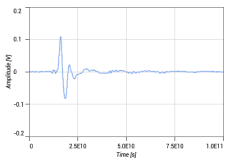
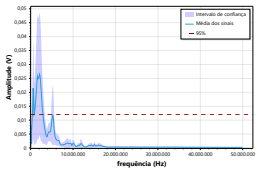
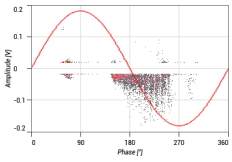
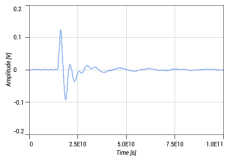
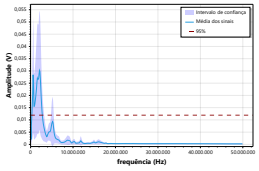
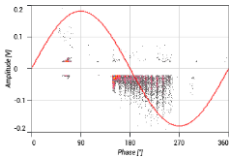
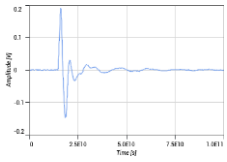
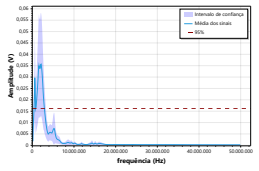
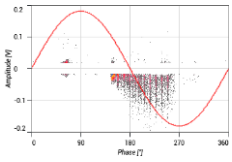
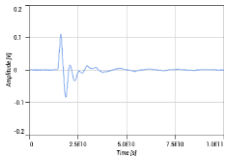
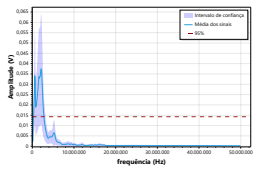
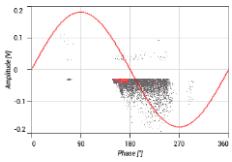
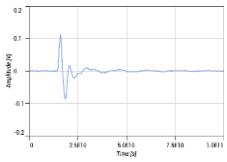
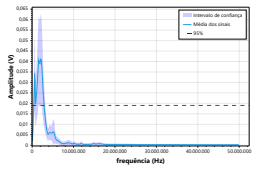
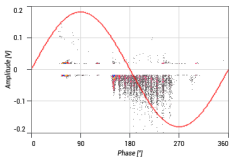
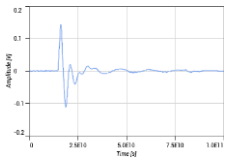
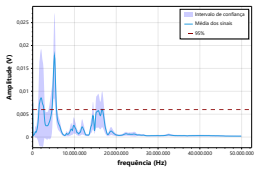
Tabela D- 10 — Dados adicionais do experimento 7, com sensor HRSS exposto a descargas superfície.

Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,0642	284,1	0,03435	3,09135
Nº2	HRSS	0,0567	665,4	0,0228	2,2163
Nº3	HFCT	0,0324	1304,7	0,0201	2,4983
Nº4	HRSS	0,0432	1056,9	0,02055	2,70515
Nº5	HFCT	0,0863	888,2	0,037	1,96545
Nº6	HRSS	0,0685	1077,6	0,031	1,776

Fonte: O autor.

D.4 Verificação o desempenho do sensor HRSS em cabo de média tensão com blindagem metálica de chumbo

Tabela D- 11 — Resultados do experimento 8, verificação o desempenho do sensor HRSS em cabo de média tensão com blindagem metálica de chumbo.

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HRSS			
Nº3	HFCT			
Nº4	HRSS			
Nº5	HFCT			
Nº6	HRSS			

Fonte: O autor.

Tabela D- 12 — Dados adicionais do experimento 8, verificação o desempenho do sensor HRSS em cabo de média tensão com blindagem metálica de chumbo.

Nº Amostra	**Sensor**	**QMax95% (V)**	**Taxa de repetição (N/s)**	**Alfa (V)**	**Beta**
Nº1	HFCT	0,0756	1066,3	0,03165	2,62695
Nº2	HRSS	0,0804	892,5	0,03205	1,89465
Nº3	HFCT	0,0847	824,4	0,0408	1,77745
Nº4	HRSS	0,0939	851,2	0,03485	1,9682
Nº5	HFCT	0,0922	747,5	0,0643	2,63175
Nº6	HRSS	0,0799	980,3	0,03385	1,9587

Fonte: O autor.

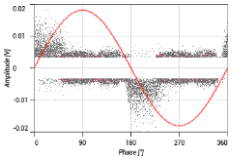
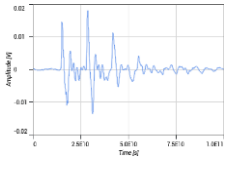
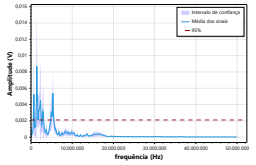
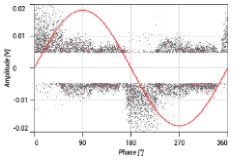
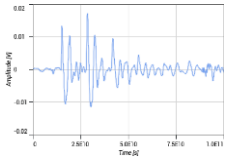
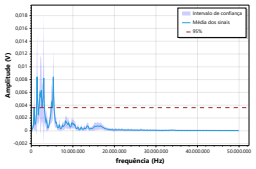
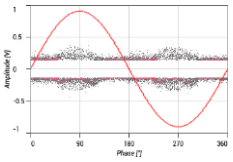
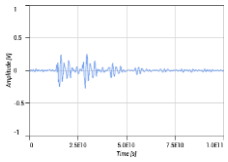
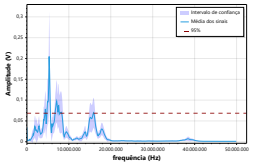
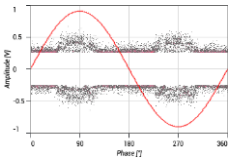
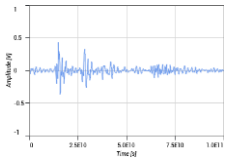
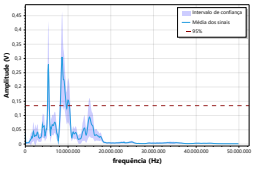
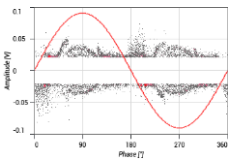
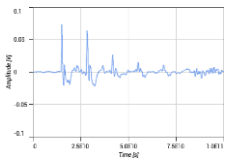
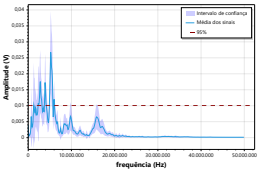
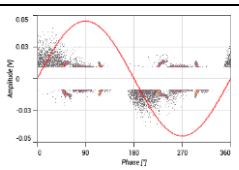
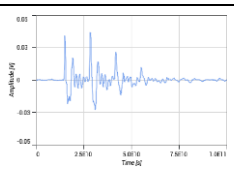
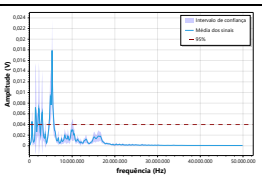
APÊNDICE E – APRESENTAÇÃO INTEGRAL DOS DADOS COLETADOS EXPERIMENTO COM CABO DE MAIOR EXTENÇÃO

E.1 Cabo de 180 metros com sistema de aterrado em ambos os lados

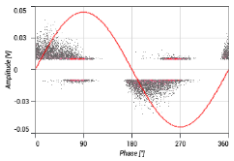
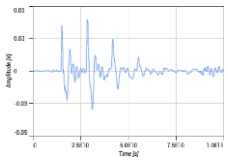
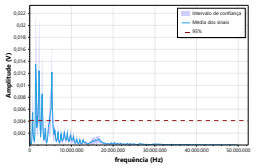
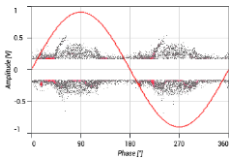
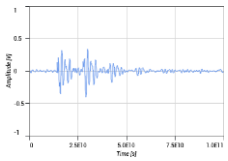
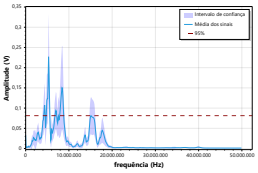
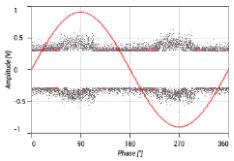
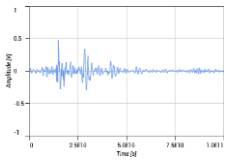
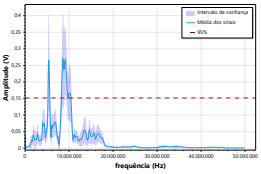
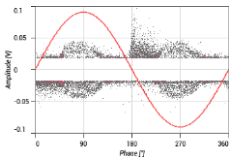
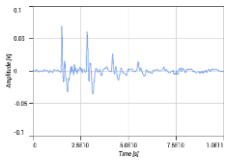
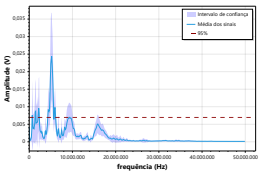
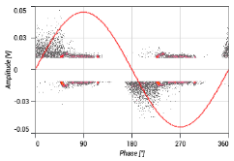
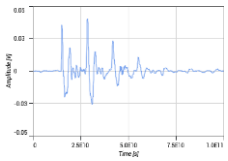
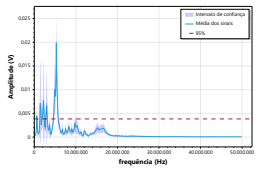
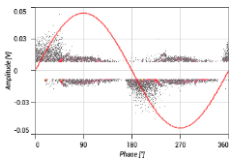
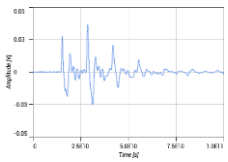
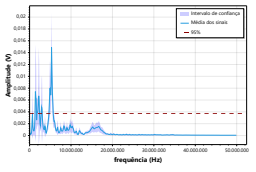
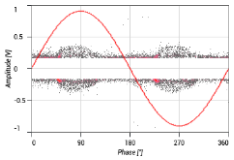
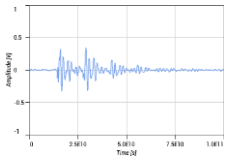
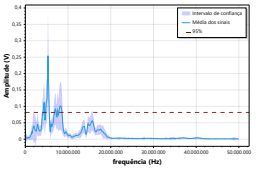
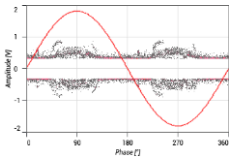
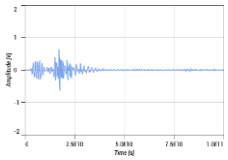
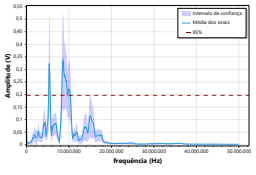
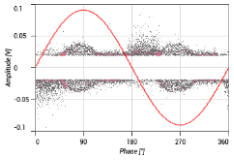
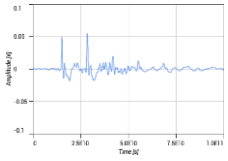
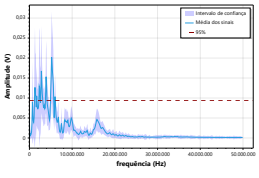
E.1.1 Sensores aferidos na ponta A

Tabela E- 1 — Resultados do experimento 9, cabo de 180 m aterrado em ambos os lados e com os sensores localizados na ponta A.

(continua)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HRSS			
Nº3	FMC			
Nº4	HAS			
Nº5	Cap			
Nº6	HFCT			

(conclusão)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº7	HRSS			
Nº8	FMC			
Nº8	HAS			
Nº10	Cap			
Nº11	HFCT			
Nº12	HRSS			
Nº13	FMC			
Nº14	HAS			
Nº15	Cap			

Fonte: O autor.

Tabela E- 2 — Dados adicionais do experimento 9, cabo de 180 m aterrado em ambos os lados e com os sensores localizados na ponta A.

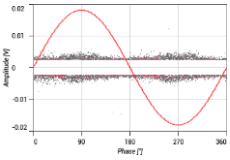
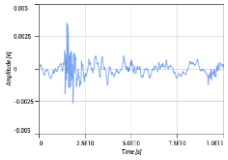
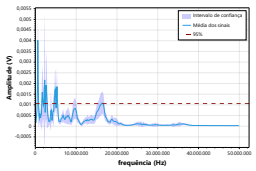
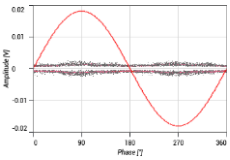
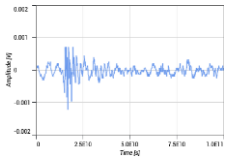
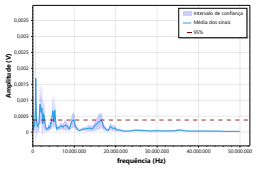
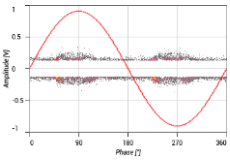
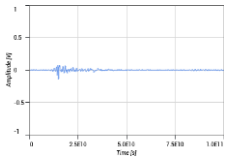
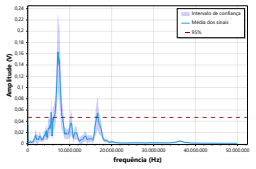
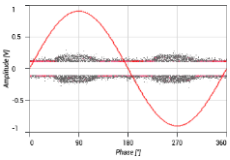
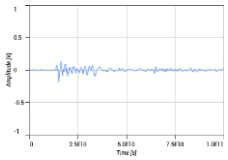
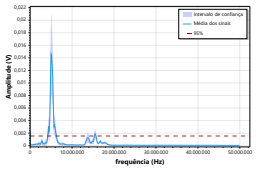
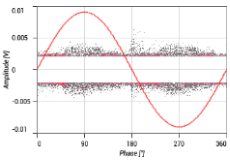
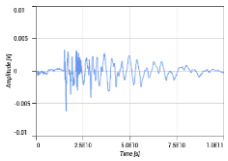
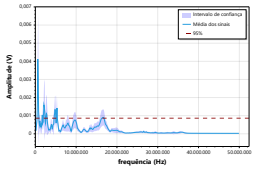
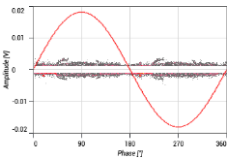
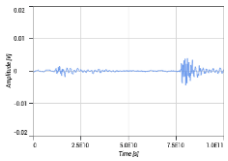
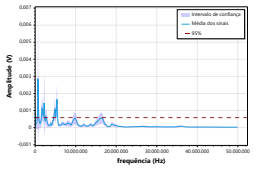
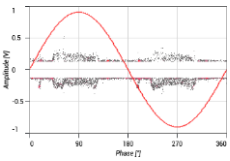
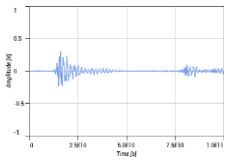
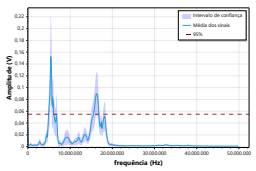
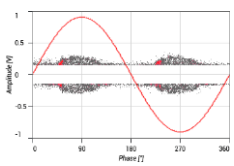
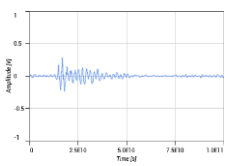
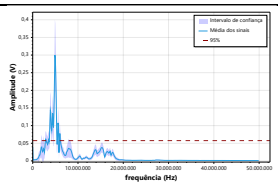
Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,0096	1595,6	0,0058	2,4042
Nº2	HRSS	0,0143	1620,3	0,0082	2,54405
Nº3	FMC	0,2578	1645	0,18625	4,1575
Nº4	HAS	0,4645	1586,4	1707,6719	4,58545
Nº5	Cap	0,0409	789,6	0,02865	4,2564
Nº6	HFCT	0,0192	1356,8	0,01385	2,9479
Nº7	HRSS	0,0198	885,2	0,01325	2,8601
Nº8	FMC	0,3423	1331,2	0,2393	3,67045
Nº9	HAS	0,4534	1199,4	0,36265	5,77475
Nº10	Cap	0,0409	1856,1	0,0279	3,16
Nº11	HFCT	0,0203	1119,3	0,0142	2,8547
Nº12	HRSS	0,0169	1231,2	0,01135	2,5832
Nº13	FMC	0,3045	906,8	0,2232	3,6934
Nº14	HAS	0,6184	1266,4	0,4592	3,24835
Nº15	Cap	0,0375	1182,8	0,0255	4,29285

Fonte: O autor.

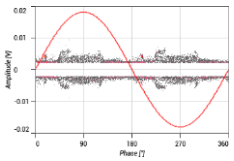
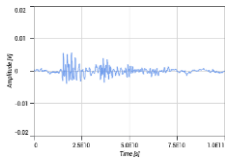
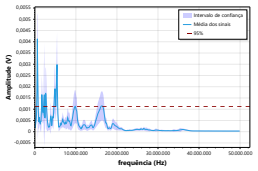
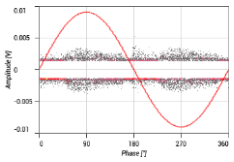
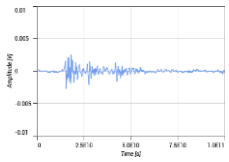
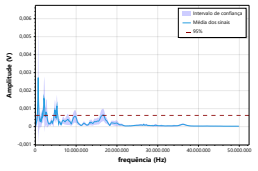
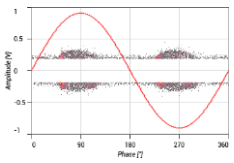
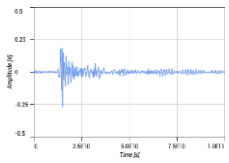
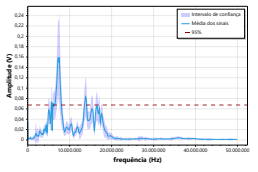
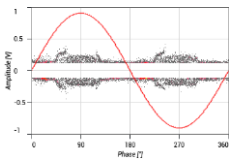
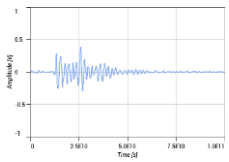
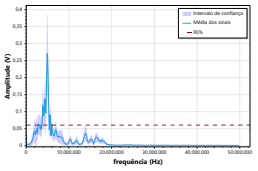
E.1.2 Sensores aferidos na ponta B

Tabela E- 3 — Resultados do experimento 9, cabo de 180 m aterrado em ambos os lados e com os sensores localizados na ponta B.

(continua)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HRSS			
Nº3	FMC			
Nº4	HAS			
Nº5	HFCT			
Nº6	HRSS			
Nº7	FMC			
Nº8	HAS			

(conclusão)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº8	HFCT			
Nº10	HRSS			
Nº11	FMC			
Nº12	HAS			

Fonte: O autor.

Tabela E- 4 — Resultados do experimento 9, cabo de 180 m aterrado em ambos os lados e com os sensores localizados na ponta B.

Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,004	1208,4	0,00305	4,17635
Nº2	HRSS	0,0018	879,9	0,0011	3,0639
Nº3	FMC	0,2134	1282,1	0,16765	5,27715
Nº4	HAS	0,2	1472,9	0,14305	4,55575
Nº5	HFCT	0,0033	1621,6	0,00255	5,35395
Nº6	HRSS	0,0023	1153,3	0,0017	3,7548
Nº7	FMC	0,2689	616,2	0,1823	3,54195
Nº8	HAS	0,2623	1344	0,20405	5,3769
Nº9	HFCT	0,0047	1220,9	0,00335	3,2319
Nº10	HRSS	0,0026	1615,1	0,0019	4,3925
Nº11	FMC	0,2956	1162,1	0,2366	5,04475
Nº12	HAS	0,2423	1150	0,1688	3,76455

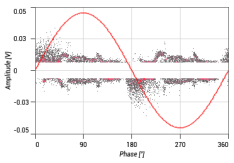
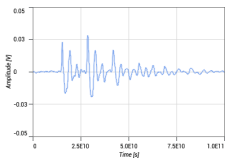
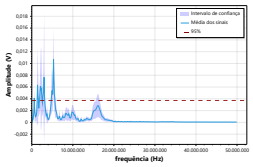
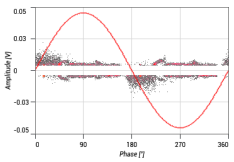
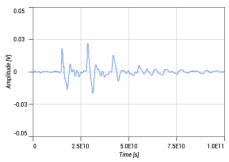
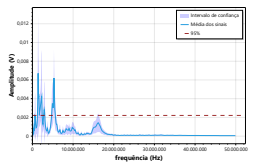
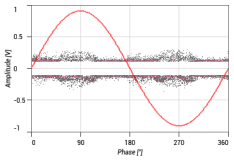
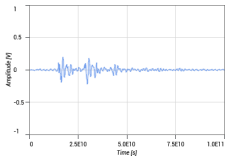
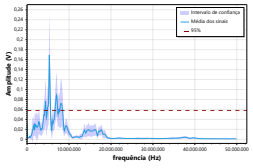
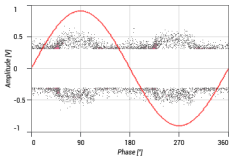
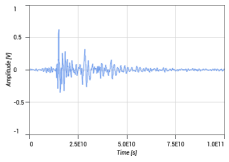
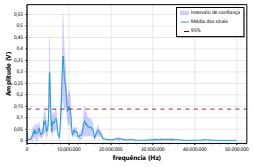
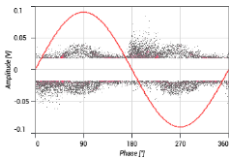
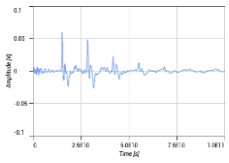
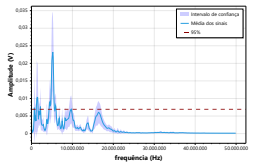
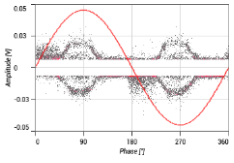
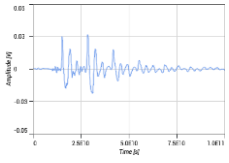
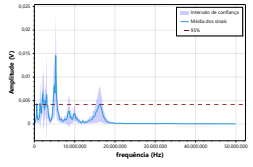
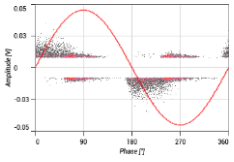
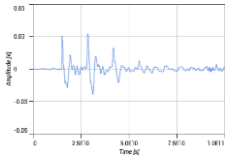
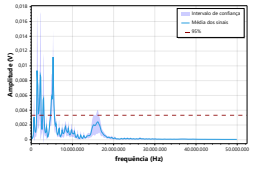
Fonte: O autor.

E.2 Cabo de 180 metros com sistema de aterrado em apenas um dos lados

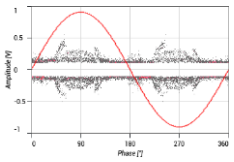
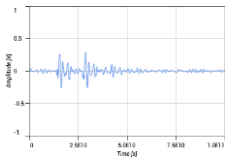
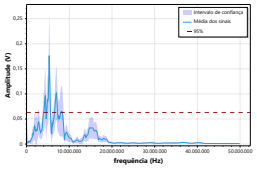
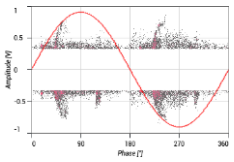
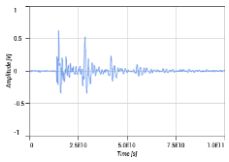
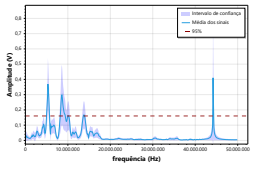
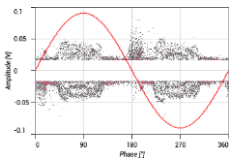
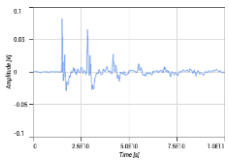
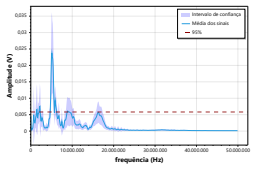
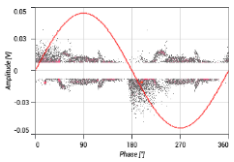
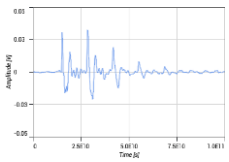
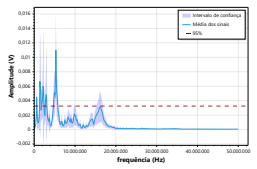
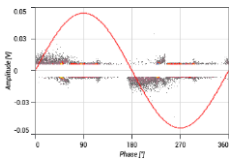
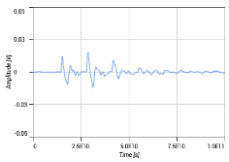
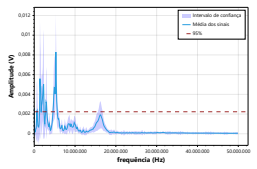
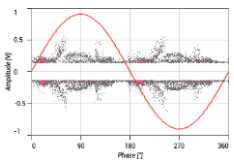
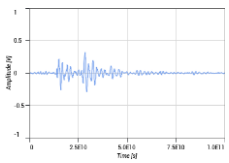
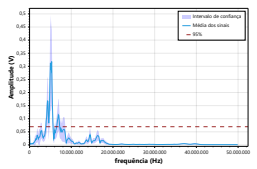
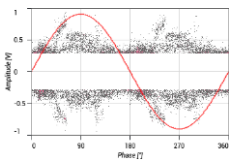
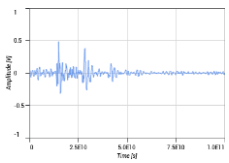
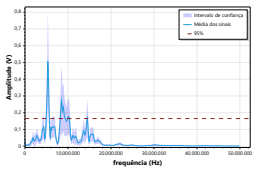
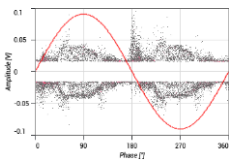
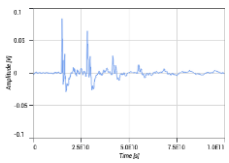
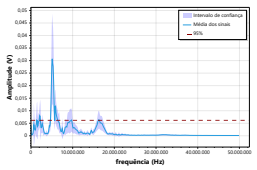
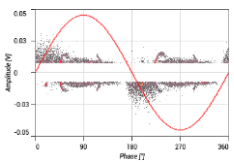
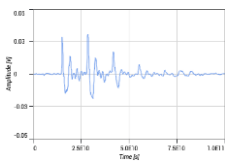
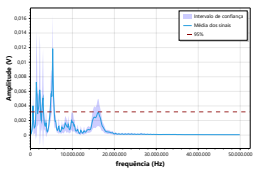
E.2.1 Sensores aferidos na ponta A

Tabela E- 5 — Resultados do experimento 9, cabo de 180 m aterrado em apenas um lado e com os sensores localizados na ponta A.

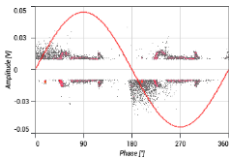
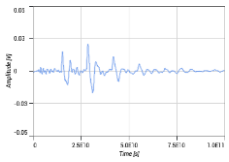
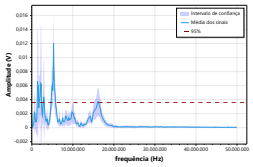
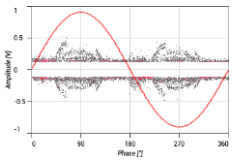
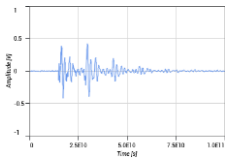
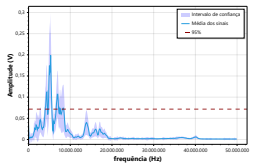
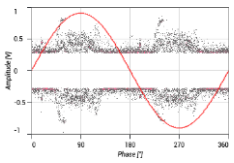
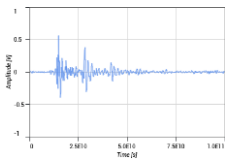
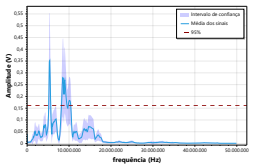
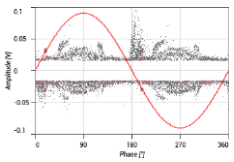
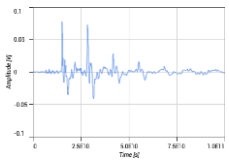
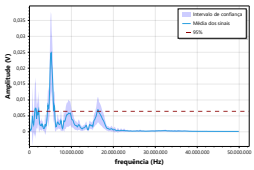
(continua)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HRSS			
Nº3	FMC			
Nº4	HAS			
Nº5	Cap			
Nº6	HFCT			
Nº7	HRSS			

(continua)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº8	FMC			
Nº8	HAS			
Nº10	Cap			
Nº11	HFCT			
Nº12	HRSS			
Nº13	FMC			
Nº14	HAS			
Nº15	Cap			
Nº16	HFCT			

(conclusão)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº17	HRSS			
Nº18	FMC			
Nº19	HAS			
Nº20	Cap			

Fonte: O autor.

Tabela E- 6 — Dados adicionais do experimento 9, cabo de 180 m aterrado em apenas um lado e com os sensores localizados na ponta A.

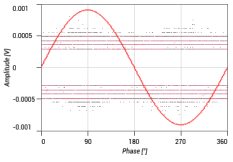
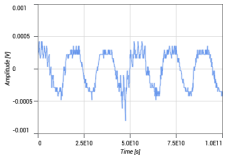
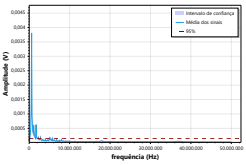
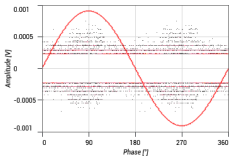
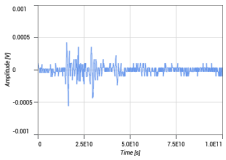
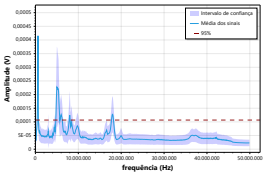
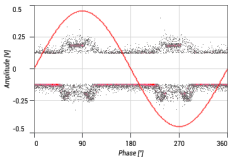
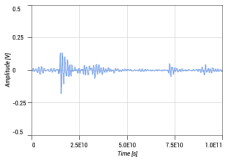
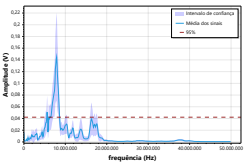
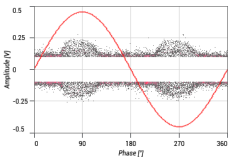
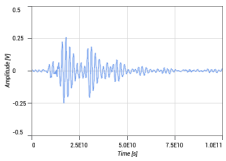
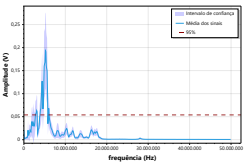
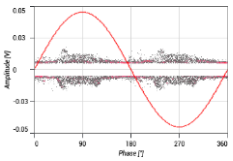
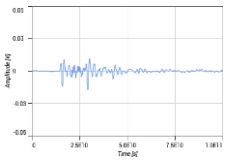
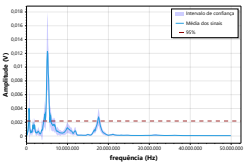
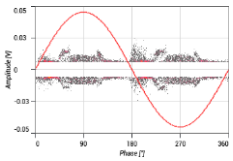
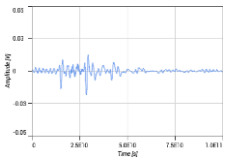
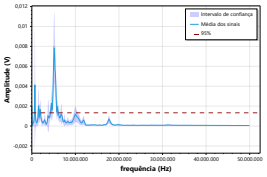
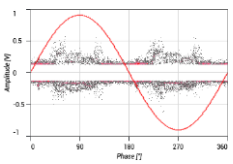
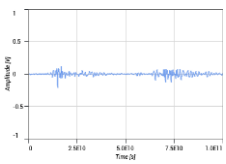
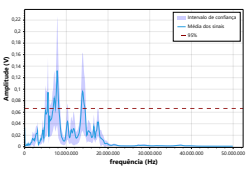
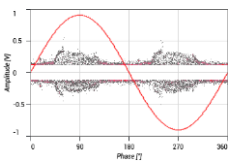
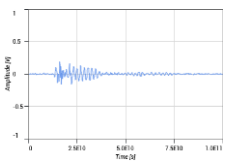
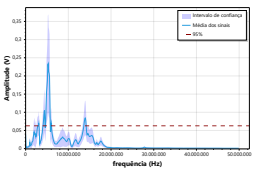
Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,0152	1759,7	0,0105	2,7446
Nº2	HRSS	0,0098	1510,3	0,00635	2,57105
Nº3	FMC	0,2067	1436,2	0,1473	3,9163
Nº4	HAS	0,4979	831,2	0,39655	5,8211
Nº5	Cap	0,0367	1581,5	0,0244	4,16075
Nº6	HFCT	0,02	1337,5	0,0116	2,4125
Nº7	HRSS	0,0165	1160,1	0,01175	3,2003
Nº8	FMC	0,2845	1656,7	0,1706	2,77545
Nº9	HAS	0,6068	1189,6	0,43485	4,40215
Nº10	Cap	0,042	1686,5	0,02795	3,01845
Nº11	HFCT	0,0169	1000,8	0,0111	2,6641
Nº12	HRSS	0,0106	1340,7	0,0074	3,08915
Nº13	FMC	0,3156	1161,5	0,20715	2,99845
Nº14	HAS	0,6423	1482,3	0,4193	3,4369
Nº15	Cap	0,0428	1409,6	0,02855	2,72985

Fonte: O autor.

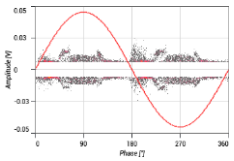
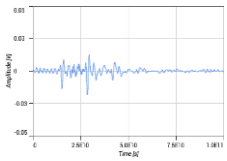
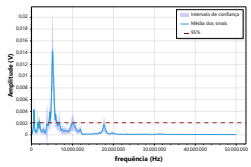
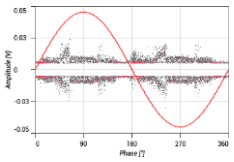
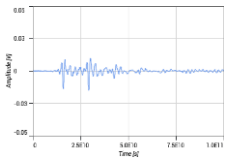
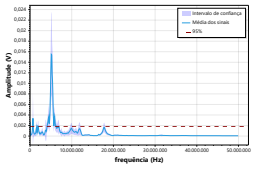
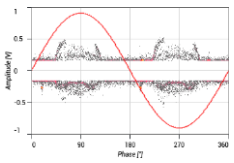
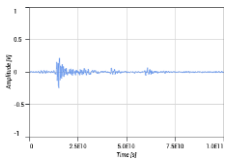
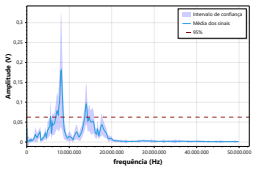
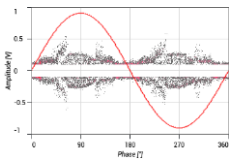
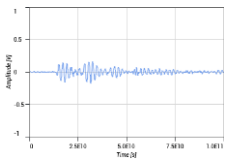
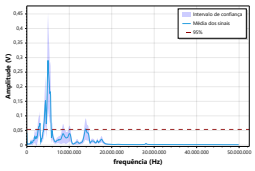
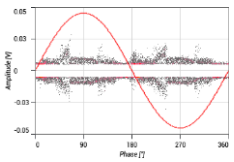
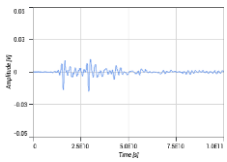
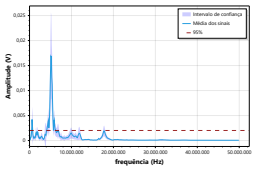
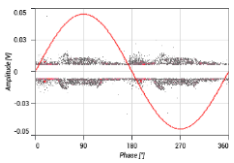
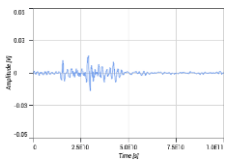
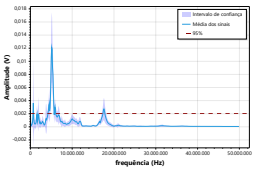
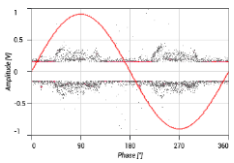
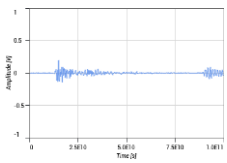
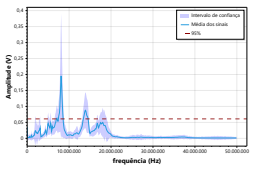
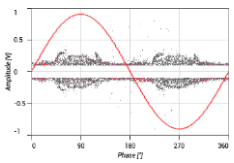
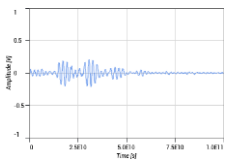
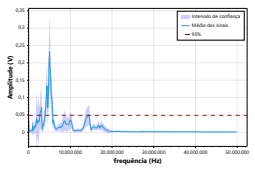
E.2.2 Sensores aferidos na ponta B

Tabela E- 7 — Resultados do experimento 9, cabo de 180 m aterrado em ambos os lados e com os sensores localizados na ponta B.

(continua)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº1	HFCT			
Nº2	HRSS			
Nº3	FMC			
Nº4	HAS			
Nº5	HFCT			
Nº6	HRSS			
Nº7	FMC			
Nº8	HAS			

(conclusão)

Nº Amostra	Sensor	PRPD	Exemplo de forma de onda	Média da FFT
Nº8	HFCT			
Nº10	HRSS			
Nº11	FMC			
Nº12	HAS			
Nº13	HFCT			
Nº14	HRSS			
Nº15	FMC			
Nº16	HAS			

Fonte: O autor.

Tabela E- 8 — Dados adicionais do experimento 9, cabo de 180 m aterrado em ambos os lados e com os sensores localizados na ponta B.

Nº Amostra	Sensor	QMax95% (V)	Taxa de repetição (N/s)	Alfa (V)	Beta
Nº1	HFCT	0,0005	1532,1	0,0004	5,28635
Nº2	HRSS	0,0004	1530,3	0,0003	3,53565
Nº3	FMC	0,2254	1683,2	0,16495	4,38705
Nº4	HAS	0,1936	1766,9	0,13675	4,14465
Nº5	HFCT	0,0114	1240,5	0,00755	3,41295
Nº6	HRSS	0,0077	1519,9	0,005	3,5968
Nº7	FMC	0,3023	1447,1	0,19295	3,0147
Nº8	HAS	0,2867	1132,1	0,17855	3,12445
Nº9	HFCT	0,0136	1620,8	0,00875	1,93295
Nº10	HRSS	0,0126	1551,3	0,00815	2,86655
Nº11	FMC	0,3423	1256	0,23025	3,3827
Nº12	HAS	0,2867	1285,1	0,1795	2,62075

Fonte: O autor.