



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

HENRIQUE NUNES DE SANTANA

ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE SENSORES DE ACOPLAMENTO
CAPACITIVO NO MONITORAMENTO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

Campina Grande, Paraíba.
Agosto de 2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Análise da Aplicabilidade de Sensores de Acoplamento Capacitivo no Monitoramento de Disjuntores de Alta Tensão

Henrique Nunes de Santana

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Prof. Edson Guedes da Costa
Orientador

Campina Grande, Paraíba
Agosto de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S232a Santana, Henrique Nunes de.
Análise da aplicabilidade de sensores de acoplamento capacitivo no monitoramento de disjuntores de alta tensão / Henrique Nunes de Santana. – Campina Grande, 2017.
75 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2017.
"Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa".
Referências.

1. Disjuntor. 2. Monitoramento. 3. Diagnóstico. 4. Sensor de Acoplamento Capacitivo. 5. Arco Elétrico. 6. Contato de Arco. I. Costa, Edson Guedes da. II. Título.

CDU 621.316(043)

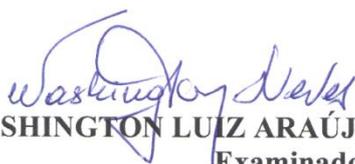
**"ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE SENSORES DE ACOPLAMENTO CAPACITIVO NO
MONITORAMENTO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO"**

HENRIQUE NUNES DE SANTANA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 18/08/2017



EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Examinador(a)



TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFS
Examinador(a)



BRUNO BARBOSA ALBERT, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Aos meus pais, irmãs e a minha noiva
Ana Cláudia Oliveira pelos incentivos e
apoio ao longo desta jornada, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela minha saúde e dos meus familiares, pelo apoio e presença contínua em minha vida.

Aos meus pais, José Henrique de Santana e Lenice Nunes Paulino de Santana, cujo empenho e atenção em me proporcionar as condições necessárias para a minha formação acadêmica e como ser humano foram e continuam sendo incomensuráveis.

À minha noiva Ana Cláudia Oliveira, pelo apoio e firmeza nos momentos de maiores dificuldades.

Ao professor Edson Guedes da Costa, pela ajuda em todos os momentos e pela orientação deste trabalho, sempre demonstrando satisfação e empenho admiráveis, mesmo em horários cujo descanso lhe era de direito.

Ao professor Tarso Vilela Ferreira, pela ajuda na idealização e desenvolvimento desta pesquisa.

Ao professor Jalberth Fernandes pela ajuda com as correções deste trabalho.

Aos colegas Adriano Oliveira e Antônio Neto, pela ajuda em momentos cruciais na elaboração deste trabalho.

Aos colegas Raphael Nóbrega, Herbet Sousa, Bruno Dias, Kal-El Brito, Marconni Freitas, João Marcelo Leal e Filipe Araújo pela ajuda.

A todos os colegas e professores integrantes da Pós-Graduação do LAT pelo apoio e pela oportunidade de me tornar parte desta família.

Ao servidores e funcionários do Laboratório de Alta Tensão pela disposição e ajuda nos ensaios.

À CAPES e COPELE pelo apoio financeiro sob a forma de bolsa de estudos.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente deixaram suas contribuições na minha formação acadêmica e profissional.

*“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais volta ao seu tamanho original.”*

Albert Einstein

RESUMO

Neste trabalho, é avaliada aplicabilidade de sensores de acoplamento capacitivo na detecção dos sinais emitidos por arcos elétricos em contatos de disjuntores. Adicionalmente, é investigada a possibilidade de correlacionar estes sinais com nível de degradação dos contatos de arco. A aplicabilidade dos sensores é avaliada por meio da comparação dos sinais detectados pelos mesmos, com os sinais detectados por uma antena direcional em banda larga, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Para a análise da correlação entre o nível de degradação dos contatos de arco e os sinais detectados, atributos de estatística descritiva da duração e da energia dos sinais foram avaliados. A análise dos resultados evidenciou que os sensores de acoplamento capacitivo são capazes de detectar os sinais emitidos pelos arcos elétricos. Também foi evidenciado que a sensibilidade de detecção dos sensores depende da posição na qual foram instalados ao longo do polo analisado. No caso dos disjuntores utilizados neste trabalho, a melhor posição para a instalação dos sensores foi a posição mais próxima do terminal inferior do polo. A flexibilidade e o valor da constante dielétrica devem ser avaliados no momento da escolha do material empregado na confecção dos sensores, uma vez que sensores pouco flexíveis podem sofrer danos ao serem instalados no polo do disjuntor e, constantes dielétricas elevadas podem prejudicar os ganhos dos respectivos sensores. A correlação entre os sinais dos arcos elétricos detectados pelos sensores e o nível de degradação dos contatos de arco é possível, quando os atributos estatísticos da média, desvio padrão, curtose e mediana obtidos da energia dos referidos sinais são avaliados.

Palavras-chave: disjuntor, monitoramento, diagnóstico, sensor de acoplamento capacitivo, arco elétrico, contato de arco.

ABSTRACT

In this work, is evaluated the applicability of capacitive coupling sensors in the detection of signals emitted by electric arcs in circuit breaker contacts. In addition, the possibility of correlating these signals with the arcing contacts degradation level is investigated. The sensors applicability is investigated by comparing the signals detected by them with the signals detected by a broadband directional antenna in both time and frequency domain. For the analysis of the correlation between the arcing contacts degradation level and the detected signals, descriptive statistical attributes of the duration and energy of the signals were evaluated. The analysis of the results showed that the capacitive coupling sensors are able to detect the signals emitted by the electric arcs. It was also evidenced that the sensor detection sensitivity depends on the position in which they are installed along the analyzed pole. In the case of the circuit breakers used in this work, the best position for the installation of the sensors was the one closest to the lower terminal of the pole. The flexibility and value of the dielectric constant must be evaluated when choosing the material used in the construction of the sensors, since weak sensors can be damaged when installed at the pole of the circuit breaker, and high dielectric constants can affect the gains of the respective sensors. The correlation between the electric arcs signals detected by the sensors and the arcing contacts degradation level is possible, when the statistical attributes of the mean, standard deviation, kurtosis and median obtained from the energy of these signals are evaluated.

Keywords: circuit breaker, monitoring, diagnosis, capacitive coupling sensor, electric arc, arcing contact.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Vista dos componentes internos uma câmara de extinção de arco. A – contato fixo, B – contato móvel.	20
Figura 2.2 – Detalhes construtivos de contatos fixos e móveis. A – contato fixo, B – contato móvel, C – contatos principais e D – contatos de arco.	21
Figura 2.3 – Ilustração evidenciando os três componentes principais de um disjuntor de alta tensão.	23
Figura 2.4 – Forma de onda típica de uma ignição de arco elétrico em SF ₆	24
Figura 2.5 – Espectro de frequências típico de uma descarga elétrica em óleo.	24
Figura 2.6 – Exemplo de curva de resistência dinâmica de contato medida experimentalmente. R_{cp} – Região de resistência de contato principal e R_{ca} – região de resistência de contato de arco.	26
Figura 2.7 – Medição de tensão por acoplamento capacitivo. a) exemplo de diagrama de montagem e b) circuito equivalente.	28
Figura 2.8 – Resposta em frequência do filtro passa-altas para o circuito exemplificado.	29
Figura 2.9 – Fotografia de sensores de acoplamento capacitivo em forma de fita.	29
Figura 4.1 – Disjuntores utilizados.	40
Figura 4.2 – Contatos fixos e móveis utilizados nos ensaios.	41
Figura 4.3 – Placas de circuito impresso utilizadas para a confecção dos sensores. Fibra de vidro à esquerda e poliamida à direita.	41
Figura 4.4 – Arranjo de injeção de corrente utilizado. 1 – bateria, 2 – resistor ajustável e 3 – disjuntor.	42
Figura 4.5 – Diagrama do arranjo utilizado para a MRD.	43
Figura 4.6 – Posições de instalação dos sensores.	46
Figura 4.7 – Diagrama esquemático do arranjo utilizado.	46
Figura 4.8 – Diagrama do arranjo experimental utilizado nos ensaios.	47
Figura 4.9 – Arranjo experimental utilizado nos ensaios.	47
Figura 5.1 – Sensores de acoplamento capacitivo confeccionados.	51
Figura 5.2 – Detalhe das estruturas guia dos contatos móveis em um disjuntor típico.	53
Figura 5.3 – Aquisição simultânea de sinal feita com antena (a) e sensor de acoplamento capacitivo (b). A – ignição do arco; B, C e D – reignições e E – extinção do arco.	54
Figura 5.4 – Gráfico da Razão de Energia de Sub-banda do sensor S1.	56
Figura 5.5 – Gráfico da Razão de Energia de Sub-banda do sensor S2.	57
Figura 5.6 – Gráfico da Razão de Energia de Sub-banda do sensor S3.	58
Figura 5.7 – Gráfico da Razão de Energia de Sub-banda do sensor S4.	60
Figura 5.8 – Gráfico da Razão de Energia de Sub-banda do sensor S5.	61
Figura 5.9 – Gráfico da Razão de Energia de Sub-banda do sensor S6.	62
Figura 5.10 – Respostas em frequência para os dielétricos simulados.	63
Figura A.1 – Média da energia dos sinais detectados.	74
Figura A.2 – Desvio padrão da energia dos sinais detectados.	74
Figura A.3 – Curtose da energia dos sinais detectados. Tracejado em vermelho indica o valor de curtose mesocúrtica (0,263).	75
Figura A.4 – Mediana da energia dos sinais detectados.	75
Figura A.5 – Média da duração dos sinais detectados.	75
Figura A.6 – Desvio padrão da duração dos sinais detectados.	76

Figura A.7 – Curtose da duração dos sinais detectados. Tracejado em vermelho indica o valor de curtose mesocúrtica (0,263).....	76
Figura A.8 – Mediana da duração dos sinais detectados.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resumos das contribuições das pesquisas e dos elementos de detecção utilizados.	38
Tabela 4.1 – Características dos disjuntores de média tensão.	40
Tabela 4.2 – Características técnicas das placas de circuito impresso utilizadas.	42
Tabela 4.3 – Características dos sensores de acoplamento capacitivo projetados.	45
Tabela 4.4 – Constantes dielétricas dos materiais propostos.	48
Tabela 5.1 – Resistências médias dos contatos de arco.	50
Tabela 5.2 – Características dos sensores de acoplamento capacitivo produzidos.	51
Tabela 5.3 – Valores médios das potências relativas a $P0$ de cada posição.	52
Tabela 5.4 – Atributos estatísticos da energia dos sinais detectados.	64
Tabela 5.5 – Atributos estatísticos da duração dos sinais detectados.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	American National Standards Institute
Cr-Al-Fe	Cromo-Alumínio-Ferro
DEE	Departamento de Energia Elétrica
GA/s	Giga-amostras por segundo
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MRD	Medição de Resistência Dinâmica
MRE	Medição de Resistência Estática
PTFE	Politetrafluoretileno
PVO	Pequeno Volume de Óleo
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
VECSE	Vetores de Energia dos Centroides das Sub-bandas Espectrais

LISTA DE SÍMBOLOS

C_2	Capacitância própria do sensor de acoplamento capacitivo
C_1	Capacitância de acoplamento entre o sensor e o polo do disjuntor
$H(j\omega)$	Função de transferência em termos de $j\omega$
j	Número complexo unitário
R	Resistência do instrumento de medição
R_{cp}	Resistência de contato principal
R_{ca}	Resistência de contato de arco
v_1	Sinal de tensão produzido pelo arco elétrico
v_2	Sinal de tensão detectado pelo sensor de acoplamento capacitivo
ω	Frequência angular

SUMÁRIO

1	Introdução	16
1.1	Objetivos	18
1.2	Organização do Texto	18
2	Fundamentação Teórica	20
2.1	Disjuntores de Alta Tensão	20
2.2	Arco Elétrico em Disjuntores	23
2.3	Manutenção em Disjuntores	25
2.4	Sensores de Acoplamento Capacitivo.....	27
2.5	Estatística Descritiva.....	30
3	Revisão Bibliográfica	32
4	Material e Métodos	40
4.1	Material	40
4.2	Métodos	42
4.2.1	Degradação dos Contatos	43
4.2.2	Sensores de Acoplamento Capacitivo	44
4.2.3	Posicionamento dos Sensores	45
4.2.4	Capacidades de Detecção dos Sensores.....	46
4.2.5	Dielétricos Aplicados aos Sensores de Acoplamento Capacitivo	48
4.2.6	Correlação Entre a Degradação dos Contatos de Arco e os Sinais Detectados..	49
5	Resultados.....	50
5.1	Degradação dos Contatos de Arco	50
5.2	Sensores de Acoplamento Capacitivo Confeccionados	51
5.3	Posicionamento dos Sensores	52
5.4	Análise das Formas de Onda Detectadas	53
5.5	Análises no Domínio da Frequência	55
5.6	Análises dos Dielétricos Aplicados aos Sensores	63
5.7	Análises no Domínio do Tempo	64
6	Conclusões	67
	Trabalhos Futuros	69
	Publicações	70
	Referências	71
	Apêndice A – Gráficos referentes aos resultados das análises estatísticas.....	74

1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por energia, nas mais diferentes formas, é uma das principais características da sociedade contemporânea, sob o ponto de vista do conforto e dos avanços da tecnologia. Dentre as formas de energia demandadas, destaca-se a energia elétrica. Os conjuntos de equipamentos e processos envolvidos na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica são chamados de sistemas elétricos de potência (SEP). Os SEP estão susceptíveis à ocorrência de falhas e defeitos decorrentes do envelhecimento natural e acelerado de materiais e equipamentos, de falhas humanas e de agentes externos ao sistema.

Os principais efeitos provocados pelas falhas e defeitos são os curtos-circuitos. Caso a parcela do sistema afetada por eles não sejam rapidamente isolada, o restante do sistema sofre interrupções no fornecimento de energia. Além disso, equipamentos e pessoas podem sofrer danos.

As interrupções do sistema prejudicam os consumidores, sejam eles residenciais, comerciais ou industriais. Visando amenizar os efeitos das interrupções e firmar um maior comprometimento da disponibilidade do sistema, a legislação vigente impõe, às empresas do setor elétrico, penalidades e multas pelo tempo de indisponibilidade do sistema ou partes dele (ANEEL, 2016). Sendo assim, as empresas, cada vez mais, são motivadas a empregar técnicas de monitoramento dos equipamentos dos SEP auxiliando tomadas de decisões e, por conseguinte, diminuindo as ocorrências das interrupções da energia fornecida pelos SEP.

Os SEP são constituídos por equipamentos essenciais ao seu funcionamento, dentre os quais figuram os disjuntores de alta tensão. Estes foram concebidos com a função principal de isolar, de maneira rápida e eficaz, trechos dos sistemas elétricos (circuitos). Os disjuntores atuam, em condições normais, na execução de reconfigurações dos sistemas, tais como: conexões e desconexões de linhas, chaveamento de bancos de capacitores ou de reatores. Em condições anormais, os disjuntores devem atuar, de forma rápida e seletiva, na segregação das linhas envolvidas no curto-circuito. Segundo Garzon (2012), os disjuntores também devem ser capazes de operar (abrindo ou fechando seus contatos) independentemente do tempo em que permanecem ociosos, desde que respeitados os limites dos esforços elétricos e mecânicos de seu funcionamento.

Os esforços elétricos e mecânicos, ao longo da vida útil do disjuntor ocasionam degradação de componentes elétricos e mecânicos dos disjuntores. Devido a sua função e

importância, os disjuntores sempre devem estar aptos para executar as suas funções, mesmo nas mais adversas condições. Para garantir a sua plena operacionalidade, os disjuntores devem ser submetidos a programas de manutenção bem definidos, e assim, aumentar a confiabilidade e a seletividade do sistema.

Na conjuntura do modelo elétrico atual, a manutenção voltada para as condições operacionais dos itens, que sejam peças, equipamentos ou sistema, tem ganhado relevância. Seguindo as tendências contemporâneas, a manutenção preventiva dos disjuntores, quando possível, vem sendo gradativamente substituída pela preditiva, com a aplicação de técnicas de monitoramento.

Idealmente, as técnicas de monitoramento devem fornecer informações sobre o estado operacional dos equipamentos sem que haja a necessidade de retirada do serviço. Contudo, a maioria das técnicas utilizadas para diagnosticar as condições operativas dos disjuntores são realizados com os mesmos fora de operação. Assim, são provocados redução da disponibilidade e aumento de custos com manobras e mão-de-obra especializada. Objetivando diminuir custos com paradas programadas e minimizar a aplicação de penalidades e multas devido à indisponibilidade, as empresas do setor de energia elétrica buscam por métodos de monitoramento em serviço (*online*).

O monitoramento em serviço pode ser implementado por meio de métodos que utilizam técnicas de detecção de sinais eletromagnéticos, provenientes da formação e extinção do arco elétrico. Nesses métodos, geralmente, a detecção dos sinais de arco é realizada mediante o uso de antenas ou sensores de acoplamento (CHAPMAN, 2011). Dentre os sensores empregados, existem os que se baseiam em acoplamento capacitivo. A aplicabilidade dos sensores já foi avaliada por membros do grupo do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), na detecção de sinais de descargas parciais nos enrolamentos estáticos de hidrogeradores, que são sinais com características físicas semelhantes às do arco elétrico provenientes dos disjuntores em operação de abertura e fechamentos dos seus contatos.

Neste trabalho, foi analisada a aplicabilidade de sensores de acoplamento capacitivo no monitoramento da degradação dos contatos de arco em disjuntores de alta tensão. Além disso, foi avaliada a possibilidade de aplicação da informação coletada por meio dos sensores para o diagnóstico dos contatos de arco. As investigações foram realizadas a partir dos sinais emitidos pelo arco elétrico.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa consiste na análise da aplicabilidade de sensores de acoplamento capacitivo no monitoramento do estado de degradação dos contatos de disjuntores de alta tensão.

Para alcançar o objetivo principal foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a sensibilidade de detecção dos sensores quando instalados em diferentes posições ao longo do polo do disjuntor;
- Avaliar a capacidade dos sensores de detectar os sinais dos arcos elétricos produzidos nas câmaras de extinção dos disjuntores;
- Analisar sensores de acoplamento capacitivo confeccionados com diferentes materiais e dimensões;
- Investigar, por meio da aplicação de estatística descritiva, a existência de correlação entre os sinais detectados e o nível de degradação dos respectivos contatos.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos sobre disjuntores de alta tensão, o fenômeno do arco elétrico em câmaras de disjuntores, manutenção em disjuntores, o princípio de funcionamento dos sensores estudados e, por fim, as definições dos atributos estatísticos utilizados no trabalho. No Capítulo 3 é exposta uma revisão bibliográfica sobre pesquisas relacionadas à obtenção de informações acerca do estado operacional de disjuntores de alta tensão. As técnicas empregadas foram a detecção dos sinais emitidos pelo arco elétrico e a medição de resistência dinâmica. No Capítulo 4 é descrita a metodologia proposta, desde a avaliação do nível de desgaste dos contatos até a investigação da correlação entre os sinais detectados e a degradação dos contatos dos disjuntores. No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões, seguidas das publicações, sugestões para trabalhos futuros e referências. No Apêndice A, são ilustrados os gráficos referentes aos atributos estatísticos obtidos a partir dos sinais detectados, durante a

avaliação da correlação entre o nível de degradação dos contatos e os sinais emitidos pelos arcos elétricos.

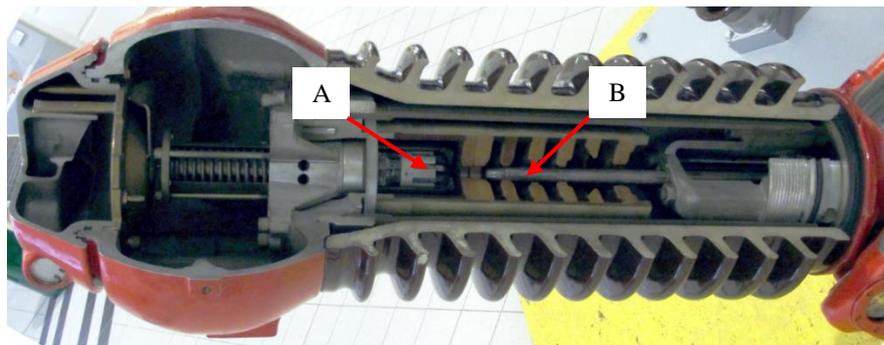
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

Os disjuntores de alta tensão são dispositivos eletromecânicos de proteção e manobra cuja função primordial é interromper correntes de defeito, principalmente as originadas por curtos-circuitos (ANSI/IEEE, 1999). Os disjuntores devem ser capazes de manter, interromper e reestabelecer a corrente nominal ou inferior, e de isolar trechos da rede elétrica quando na posição aberta (MILASCH, 1993). Devem ser mecanicamente capazes de realizar a abertura em tempos relativamente curtos, geralmente de 50 ms a 83 ms (de 3 a 5 ciclos), independentemente do tempo em que permaneceram inativos (posição fechada), desde que a corrente a ser interrompida esteja dentro dos limites da sua capacidade de interrupção (GARZON, 2002).

Os disjuntores se diferenciam entre si principalmente pelas suas capacidades de interrupção de corrente e pelo princípio de extinção de arco elétrico utilizado nas câmaras de extinção de arco. As câmaras de extinção abrigam em seu interior os contatos fixo e móvel, que por sua vez, são formados por contatos principais e de arco (NASRALLAH, BRIKCI e PERRON, 2007). Os contatos de arco são responsáveis pela condução da corrente de arco elétrico até o momento da extinção. Os contatos principais são responsáveis pela condução da corrente de carga, quando o disjuntor se encontra na posição fechada. Na Figura 2.1 é mostrada uma fotografia de um disjuntor típico, evidenciando o corte em uma câmara de extinção de arco expondo os contatos fixos e móveis. É possível visualizar na Figura 2.1 que os contatos fixos e móveis possuem geometria cilíndrica.

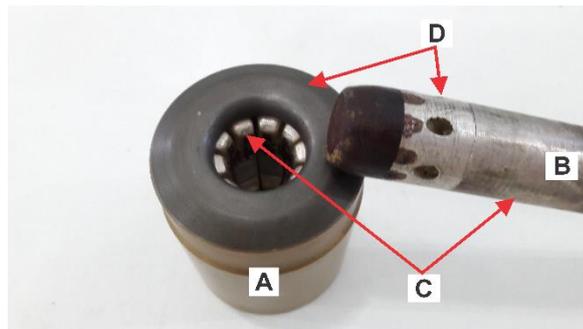
Figura 2.1 – Vista dos componentes internos uma câmara de extinção de arco. A – contato fixo, B – contato móvel.



Fonte: adaptado de (FOUNDATION, 2017).

No que se refere à geometria, o contato móvel geralmente é construído em forma de haste cilíndrica, podendo ser oca ou não, a qual se desloca durante a abertura e fechamento do disjuntor. O contato de arco é construído de forma contígua à haste móvel, sendo a primeira parte da haste a encontrar o contato fixo durante o fechamento e a última a se separar do mesmo durante a abertura do disjuntor. O contato fixo é formado por uma carcaça cilíndrica equipada em seu interior com estruturas de contato semelhantes a dedos. Essas estruturas exercem pressão sobre a haste móvel, com o objetivo de proporcionar o contato galvânico entre os contatos fixo e móvel. Para evitar desgaste excessivo dos dedos de contato durante o arco elétrico, o contato fixo é formado por um anel externo que desempenha a função de contato de arco. Na Figura 2.2 encontram-se ilustrados os contatos fixos e móveis de um disjuntor à óleo.

Figura 2.2 – Detalhes construtivos de contatos fixos e móveis. A – contato fixo, B – contato móvel, C – contatos principais e D – contatos de arco.



Fonte: Autoria própria.

Os contatos do disjuntor quando na posição fechada devem possuir uma impedância idealmente nula, porém, na prática a impedância é da ordem de microohms. Por outro lado, na posição aberta, eles devem possuir uma impedância idealmente infinita; todavia, na prática a impedância é da ordem de gigaohms.

Quando solicitado a operar, o disjuntor deve ser capaz de comutar a posição dos seus contatos (aberto ou fechado) a partir de quaisquer condições do circuito, com taxa de variação da impedância compatível com os parâmetros do circuito. Se a taxa de variação da impedância entre os contatos do disjuntor ocorre em um tempo relativamente longo, a comutação envolverá uma maior quantidade de energia térmica. Dessa forma, o disjuntor deverá ser projetado para absorver e dissipar a energia térmica, tornando o dispositivo maior e mais oneroso para operar de forma confiável (FLURSCHEIM, 2008).

Os disjuntores em operação devem satisfazer as seguintes condições:

- Abrir e fechar o circuito no menor tempo possível;

- Conduzir e suportar termicamente a corrente de carga do sistema;
- Suportar térmica e mecanicamente a corrente de curto-circuito do sistema por um determinado período de tempo, de acordo com as especificações do fabricante;
- Isolar a tensão do sistema em relação ao potencial da terra e entre seus polos, independentemente das condições ambientais;
- Possuir resistência mecânica suficiente para suportar as vibrações ocasionadas pelas operações de fechamento e abertura;
- Requerer, preferencialmente, baixa frequência de manutenção.

A necessidade de operar de forma confiável, impedindo danos aos demais equipamentos, inclui os disjuntores entre os equipamentos de maior complexidade instalados nas subestações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (FRONTIM, 2013). Segundo Nasrallah, Brikci e Perron (2007) os disjuntores de alta tensão podem ser divididos em três componentes principais: o circuito de comando; o mecanismo de operação; a câmara de extinção de arco.

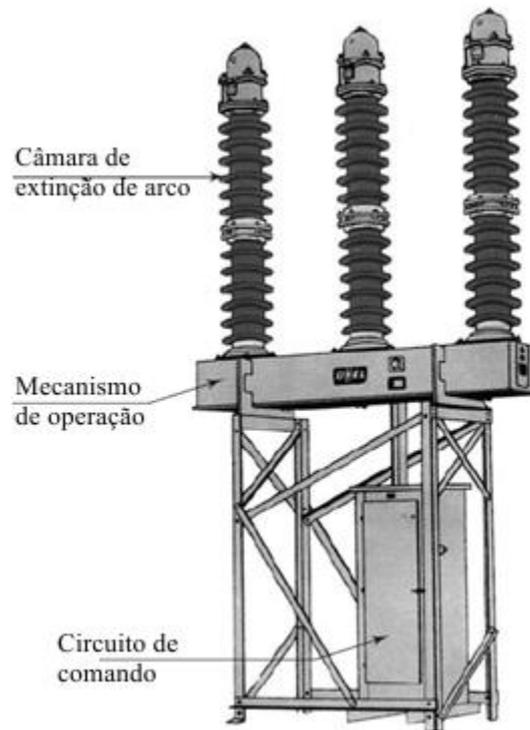
O circuito de comando é composto por um sistema eletromecânico geralmente acionado por meio de relés de proteção, o acionamento pode ser feito local e/ou remotamente. Ele é responsável pelas ações de comando para as operações de fechamento e abertura do disjuntor realizadas pelo mecanismo de operação.

O mecanismo de operação é um sistema mecânico composto por molas e um mecanismo pneumático ou hidráulico. Normalmente opera por meio de atuadores elétricos, podendo também ser operado de forma manual. O mecanismo de operação é responsável por fornecer a energia mecânica necessária para fechar e abrir os contatos do disjuntor na câmara de extinção de arco.

A câmara de extinção de arco é um compartimento vedado do disjuntor onde estão instalados os contatos elétricos, responsáveis pela condução e interrupção da corrente elétrica no circuito de potência. A câmara de extinção de arco é preenchida com um meio gasoso ou líquido, ou constituída por vácuo. Ela possui duas funções principais: prover isolamento elétrico entre os contatos do disjuntor quando na posição aberta; participar no processo de extinção do arco elétrico que se forma no seu interior durante a comutação dos estados dos contatos.

Na Figura 2.3 se encontra ilustrado um disjuntor a óleo típico do tipo pequeno volume de óleo (PVO) no qual os três componentes descritos anteriormente são evidenciados.

Figura 2.3 – Ilustração evidenciando os três componentes principais de um disjuntor de alta tensão.

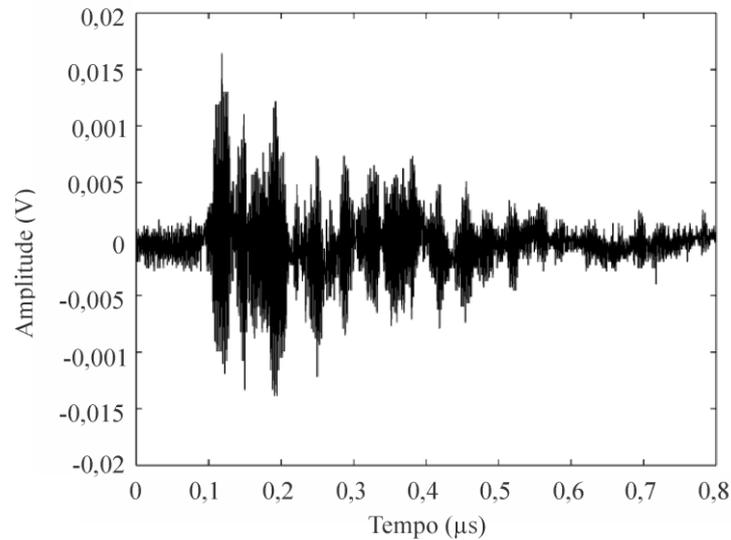


Fonte: Adaptado de (BHEL, 2006).

2.2 ARCO ELÉTRICO EM DISJUNTORES

O arco elétrico é uma descarga elétrica autossustentada que se forma entre pelo menos dois eletrodos separados por um material normalmente não condutor. O instante em que a corrente elétrica que origina o arco se estabelece, é denominado momento de ignição do arco elétrico. Durante a ignição do arco, ocorrem variações rápidas na tensão que produzem ondas eletromagnéticas (MOORE, 2004). Na Figura 2.4 se encontra ilustrada uma forma de onda típica de uma ignição de arco elétrico em hexafluoreto de enxofre (SF_6). As ondas eletromagnéticas produzidas na ignição do arco são compostas por componentes de frequência cujo espectro se estende até a faixa de radiofrequência (MOORE, 2004).

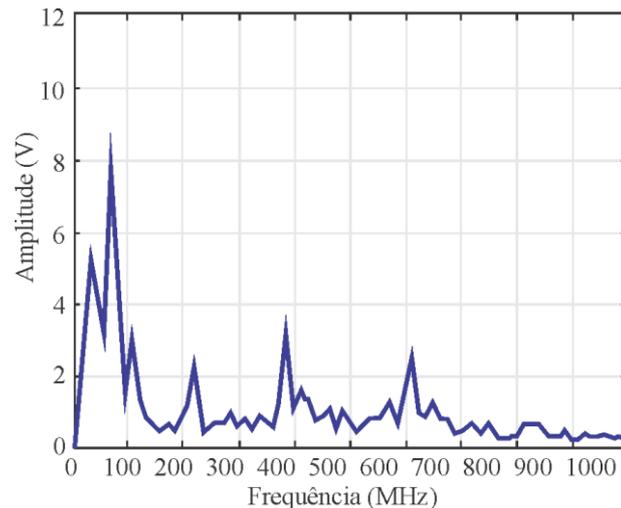
Figura 2.4 – Forma de onda típica de uma ignição de arco elétrico em SF₆.



Fonte: Adaptado de (MOORE, 2004).

A extensão das componentes espectrais depende do meio no qual ocorre a ruptura dielétrica. A maior parte das componentes espectrais emitidas por arcos no ar, localizam-se em faixas de frequências inferiores a 150 MHz. Já os arcos produzidos em óleo e SF₆ possuem representação espectral até 800 MHz (PORTUGUES, MOORE e GLOVER, 2003). Na Figura 2.5, é possível visualizar a estimativa do espectro de frequências típico de uma onda eletromagnética emitida desde a ignição até a extinção de um arco elétrico em óleo.

Figura 2.5 – Espectro de frequências típico de uma descarga elétrica em óleo.



Fonte: Adaptado de (PORTUGUES, MOORE e GLOVER, 2003).

A duração do arco elétrico depende da tecnologia e do meio empregados na sua extinção. Disjuntores que utilizam sopro de ar para extinguir o arco elétricos apresentam valores típicos de duração de arco entre 3ms e 22ms (FLURSCHEIM, 2008).

Durante toda a duração do arco elétrico, incluindo possíveis reignições, ondas eletromagnéticas são emitidas. No entanto, em momentos de maior instabilidade do arco, mais comumente nos estágios de ignição e extinção, ondas eletromagnéticas de maior intensidade são emitidas. A causa está associada ao rápido movimento dos portadores de carga nos momentos da ignição e da extinção (MEIER, MOORE e COVENTRY, 2011).

A forma mais eficiente de realizar a extinção do arco elétrico consiste em desionizar a zona afetada injetando um fluxo constante de fluido que tenha característica isolante, como o ar, óleo ou SF₆. Adicionalmente à desionização, o fluido reduz a temperatura do meio ionizado, resfriando-o e contribuindo para a extinção do arco (PINNEKAMP, 2007). A extinção do arco elétrico ocorrerá quando a tensão de ruptura do meio isolante superar a tensão necessária para mantê-lo em condução. Adicionalmente, em circuitos de corrente alternada, a passagem da corrente por zero pode provocar a extinção do arco elétrico.

Até o momento da sua extinção, o arco elétrico provoca degradação dos contatos, do meio isolante dentre outros componentes. Por esse motivo, os componentes afetados pelo arco elétrico devem ser avaliados durante a manutenções do disjuntor.

2.3 MANUTENÇÃO EM DISJUNTORES

A função da manutenção é assegurar um elevado grau de disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos e seus acessórios, durante o desempenho de suas funções. Entende-se por manutenção o conjunto de ações realizadas de forma direta ou indireta em um sistema ou equipamento e que possui a finalidade de verificar, manter ou restabelecer as condições de cumprir com segurança e eficiência suas funções (CARVALHO *et al.*, 1995).

Os disjuntores, como qualquer equipamento do sistema elétrico, podem ter suas funções prejudicadas devido aos efeitos da degradação dos seus componentes. A degradação progressiva pode ocasionar falhas elétricas e avarias no próprio disjuntor. Desse modo, é necessário que o disjuntor seja submetido a processos de manutenções periódicas.

As técnicas usuais de manutenção consistem na realização de inspeções de rotina, testes elétricos e mecânicos no disjuntor. Elas devem produzir dados precisos para o correto diagnóstico do estado operacional do mesmo. Dentre os testes e inspeções listados por Gill (2008) figuram os testes destinados a avaliar a degradação dos contatos fixos e móveis.

Ao sofrerem degradação, provocadas principalmente pela ação do arco elétrico e das correntes de carga e defeito, os contatos fixos e móveis tem sua resistência elétrica aumentada. Portanto, as principais técnicas utilizadas para diagnosticar o estado dos contatos se baseiam na

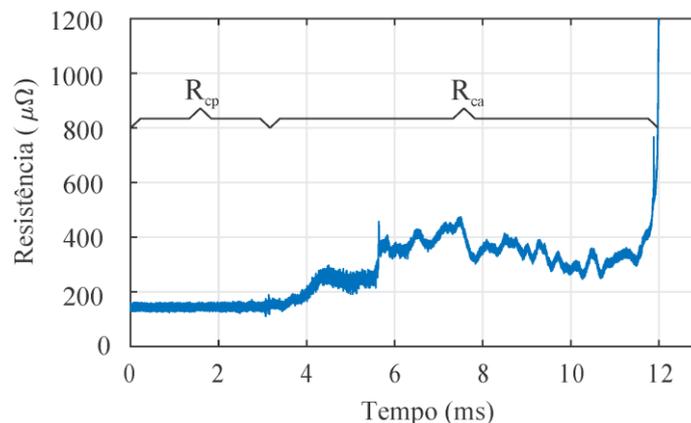
medição de resistência. Valores anormais de resistência podem ser um indicativo da existência de subprodutos da degradação do meio isolante na superfície dos contatos, ou do desgaste severo dos contatos, o qual podem ocasionar falha no disjuntor. De acordo com IEEE (2007), a técnica padronizada para a determinação da resistência dos contatos é a medição da resistência estática (MRE).

A MRE é uma técnica utilizada para determinar a resistência elétrica entre dois contatos. Ela é realizada por meio da aplicação de uma corrente contínua de teste através dos contatos, com o disjuntor fora de operação. O valor da queda de tensão entre os contatos é medido simultaneamente e o valor da resistência dos contatos principais é obtida pela aplicação direta da lei de Ohm. Normalmente, os valores de resistência são obtidos por meio do uso de equipamentos chamados analisadores de disjuntores. Porém, essa técnica não fornece informações sobre o estado dos contatos de arco, que tendem a atingir o final da vida útil antes dos contatos principais.

Com o objetivo de conhecer o estado de degradação dos contatos de arco, foram desenvolvidos métodos de monitoramento baseados em técnicas de medição de resistência dinâmica (MRD). Na técnica de MRD, uma corrente contínua de teste é aplicada através dos contatos, com o disjuntor fora de operação. Diferentemente da MRE, o valor da queda de tensão entre os contatos é medido simultaneamente durante uma operação de abertura ou fechamento do disjuntor. Então, a resistência é calculada pela aplicação direta da lei de Ohm, resultando em uma curva de resistência dinâmica (LANDRY et al, 2006).

As curvas de resistência dinâmica podem ser divididas em duas regiões distintas: região de resistência de contato principal (R_{cp}) e região de resistência de contato de arco (R_{ca}). As regiões podem ser visualizadas na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Exemplo de curva de resistência dinâmica de contato medida experimentalmente. R_{cp} – Região de resistência de contato principal e R_{ca} – região de resistência de contato de arco.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise das curvas de resistência dinâmica dos contatos, é possível estimar individualmente o estado de degradação tanto dos contatos principais quanto dos contatos de arco. As técnicas empregadas para a estimação da degradação dos contatos por meio da MRD baseiam-se no cálculo do valor médio da resistência medida em cada região da curva.

Embora seja comprovadamente mais eficiente que as técnicas de MRE, a MRD ainda não foi adotada nos programas de manutenção. Essa relutância na adoção é devido à maior complexidade na execução das medições e na interpretação não trivial dos resultados provenientes das curvas de resistência dinâmica. Outra característica que dificulta a adoção da MRD é o fato de que a técnica deve ser executada com o disjuntor fora de operação, gerando custos muitas vezes desnecessários. Esta característica é comum tanto à MRE quanto às técnicas de monitoramento de outros componentes dos disjuntores, como por exemplo a avaliação da sincronia dos contatos, a medição dos tempos de abertura e fechamento dos contatos, etc.

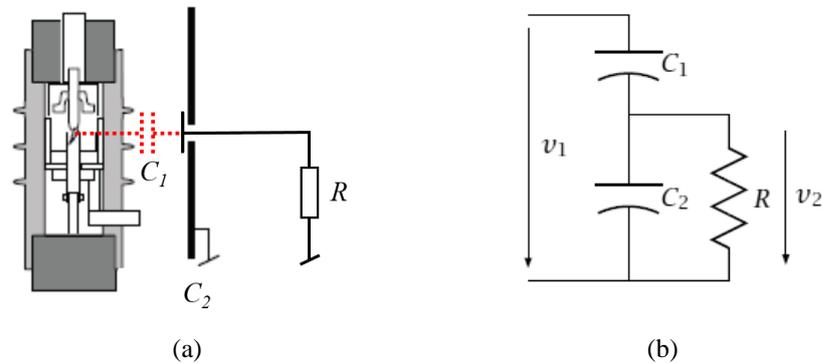
Segundo Chapman (2011), técnicas de monitoramento por meio dos sinais emitidos pelos arcos elétricos dos disjuntores vêm sendo estudadas como alternativa às técnicas atualmente empregadas. Um dos motivos é a possibilidade da sua aplicação com o disjuntor em serviço. Para a detecção dos sinais emitidos pelos arcos elétricos, são utilizados antenas e sensores de acoplamento, dentre eles, os sensores de acoplamento capacitivo.

2.4 SENSORES DE ACOPLAMENTO CAPACITIVO

Antenas, ou qualquer outro dispositivo que seja projetado para detecção a grande distância, além de possuírem um custo de aquisição elevado são de difícil integração em ambiente de subestação, principalmente em subestações compactas. Isto se deve ao fato de que os dispositivos e as antenas são susceptíveis a detectar sinais provenientes de outras fontes de rádio interferência nas proximidades. Portanto, sensores de acoplamento capacitivo apresentam-se como uma alternativa para a detecção de sinais emitidos por um único polo de um disjuntor (CHAPMAN, 2011).

O princípio de funcionamento de um sensor de acoplamento capacitivo se baseia na medição da tensão utilizando um divisor capacitivo, conforme mostrado na Figura 2.7. O circuito é formado pela capacitância C_2 do próprio sensor e a capacitância de acoplamento C_1 , estabelecida entre um de seus eletrodos e o condutor submetido ao potencial que se deseja medir, nesse caso, o contato do disjuntor sob análise.

Figura 2.7 – Medição de tensão por acoplamento capacitivo. a) exemplo de diagrama de montagem e b) circuito equivalente.



Fonte: Adaptado de (CHAPMAN, 2005).

Quando conectado a um instrumento de medição, representado pelo resistor R , o sensor se comporta como um filtro passa-altas (CHAPMAN, 2005). Para essa configuração, a função de transferência do circuito é mostrada na Equação (1).

$$H(j\omega) = \frac{\left(\frac{C_1}{C_1 + C_2}\right) j\omega}{j\omega + \frac{1}{R(C_1 + C_2)}}, \quad (1)$$

em que ω é a frequência [rad/s] do sinal de entrada. O termo no numerador dado por:

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2}, \quad (2)$$

é o ganho da função de transferência, enquanto que o termo no denominador:

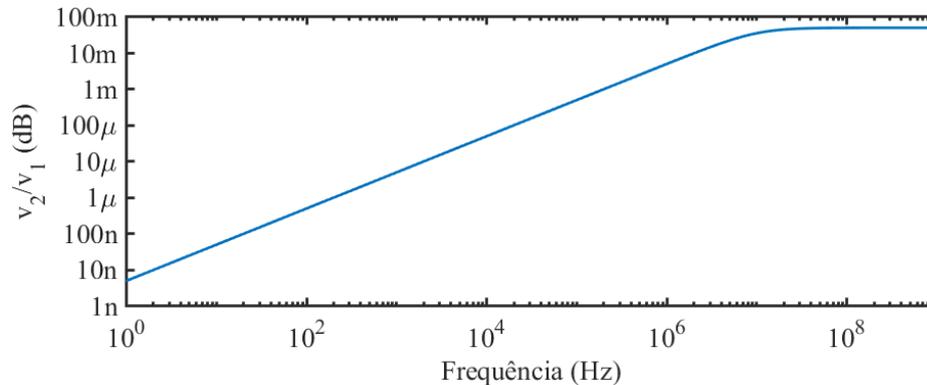
$$\frac{1}{R(C_1 + C_2)}, \quad (3)$$

corresponde à frequência de corte do filtro passa-altas, denotada como ω_c [rad/s].

Os valores típicos de C_1 para um disjuntor Siemens modelo 3AC do tipo PVO, equivalem a cerca de 15 pF. O uso de um sensor de acoplamento capacitivo de 300 pF, por exemplo, resultaria em uma resposta em frequência para o circuito da Figura 2.7, semelhante à que se encontra ilustrada na Figura 2.8. É importante ressaltar que o valor da capacitância de acoplamento depende da geometria, do posicionamento do sensor e da distância ao condutor submetido ao potencial o qual se deseja medir, o que afeta a frequência de corte e o ganho do

circuito equivalente (CHAPMAN, 2011), definidos pelas Equações (2) e (3), respectivamente.

Figura 2.8 – Resposta em frequência do filtro passa-altas para o circuito exemplificado.



Fonte: Autoria própria.

Dependendo da geometria empregada, sensores de acoplamento capacitivo possuem elevada diretividade. Esta característica confere boa imunidade ao ruído ambiente, uma vez que são medidos apenas sinais que se propagam em direções específicas (CHAPMAN, 2005). Sensores de placas paralelas em forma de fita flexível, possuem diretividade radial quando moldados em torno dos polos dos disjuntores. Além disso, são de fácil construção e têm baixo custo de fabricação, o que permite serem confeccionados a partir de placas de circuito impresso (PCI) comumente utilizadas na indústria eletrônica.

Um exemplo de sensores de acoplamento capacitivo se encontra ilustrado na Figura 2.9. Nela, é possível visualizar uma fotografia de dois sensores de acoplamento capacitivo construídos em forma de fita por Oliveira et al. (2016), eles foram utilizados pelos referidos autores para captar sinais de arco elétrico em disjuntores. O sensor A foi construído em placa de circuito impresso de dupla face com dielétrico em fibra de vidro. O sensor B foi construído a partir de duas lâminas de cobre separadas por fita isolante comum.

Figura 2.9 – Fotografia de sensores de acoplamento capacitivo em forma de fita.



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

2.5 ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A estatística descritiva consiste na coleta, apresentação, análise e interpretação de dados numéricos por meio da criação de tabelas, gráficos e indicadores numéricos (REIS, 2008). Ela é utilizada para evidenciar os atributos básicos dos dados de um estudo, fornecendo informações sumarizadas, seja sobre os padrões ou sobre conjuntos de padrões, denominados de classes (TROCHIM e DONNELLY, 2015). Dentre os parâmetros estimados na estatística descritiva, destacam-se a média aritmética, o desvio padrão, a curtose e a mediana.

A **média** é o quociente da soma dos valores da variável pelo número total de valores observados. Ela é uma medida de estatística descritiva amplamente empregada (TROCHIM e DONNELLY, 2015).

O **desvio padrão** determina a dispersão dos valores em relação à média e é calculado por meio da raiz quadrada da variância (REIS, 2008).

A **curtose** é o atributo estatístico que mede o grau de achatamento da distribuição de frequência dos valores sob análise em relação à distribuição normal. Ela pode ser obtida por meio da Equação (4).

$$K = \frac{Q_3 - Q_1}{2(P_{90} - P_{10})}, \quad (4)$$

em que Q_3 corresponde ao valor do terceiro quartil, Q_1 corresponde ao valor do primeiro quartil, P_{90} corresponde ao valor do percentil 90 e P_{10} corresponde ao valor do percentil 10.

A curtose pode ser classificada em três graus, de acordo com o seu valor:

- Mesocúrtica, quando $K = 0,263$. Esse valor de curtose corresponde a uma curva com as mesmas características de achatamento da curva normal;
- Platicúrtica, quando $K > 0,263$. Esse valor de curtose corresponde a uma curva mais achatada (ou mais aberta) que a curva normal;
- Leptocúrtica, quando $K < 0,263$. Esse valor de curtose corresponde a uma curva mais afilada que a curva normal.

Segundo Reis (2008), a **mediana** é uma medida de posição que divide um conjunto de valores em duas partes iguais, com o mesmo número de elementos, quando organizados em ordem crescente ou decrescente. O valor da mediana se encontra no centro da série estatística

organizada, de tal forma que o número de elementos situados antes desse valor (mediana) é igual ao número de elementos que se encontram após esse mesmo valor (mediana).

Neste capítulo foi apresentada uma fundamentação teórica sobre disjuntores de alta tensão, arcos elétricos como fonte de sinais eletromagnéticos, sensores de acoplamento capacitivo e estatística descritiva.

No próximo capítulo será descrita uma revisão bibliográfica a respeito dos principais estudos relacionados ao tema do trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são descritas as principais pesquisas sobre o estudo do monitoramento do estado operacional dos contatos dos disjuntores de alta tensão. Também são descritas pesquisas sobre o uso de sensores de acoplamento eletromagnético em equipamentos de alta tensão.

O diagnóstico de disjuntores de potência, com base no monitoramento e avaliação dos contatos elétricos, vem sendo empregado por meio da MRE (TRAJANO, 2015), sendo o método recomendado nas normas técnicas (IEC, 2001; IEEE, 2007) para a avaliação de contatos em disjuntores. Uma vez que a MRE não fornece informações sobre os contatos de arco, novas técnicas, tais como a MRD, vem sendo desenvolvidas visando contornar essa deficiência, conforme são apresentadas nas pesquisas a seguir.

Ohlen *et al.* (1995), em sua pesquisa, estudaram a aplicação da MRD na análise da condição dos contatos de disjuntores. Os autores afirmam que, nos ensaios de MRD, a utilização de altas correntes de teste é mais viável para reprodução da condição dos contatos. Além disso, as curvas de resistência obtidas durante operações de abertura dos contatos do disjuntor representam mais precisamente o estado real dos contatos, quando comparadas com as curvas obtidas durante operações de fechamento, visto que os saltos mecânicos provenientes do atrito entre os contatos podem provocar erros de medição. No procedimento de diagnóstico desenvolvido pelos autores, o grau de degradação dos contatos de arco seria determinado por meio da estimação da redução do seu comprimento. Segundo os autores, a redução se deve aos efeitos cumulativos da erosão provocada pela vaporização do metal do contato no local onde o arco se origina. Dessa forma, o tempo de duração da região R_{ca} (vide Figura 2.6) seria afetado proporcionalmente. Porém, dependendo da geometria dos contatos, a erosão não necessariamente implica na redução do seu comprimento, o que limita o uso da metodologia de diagnóstico apresentada pelos autores.

Landry *et al.* (2006) desenvolveram uma metodologia alternativa para ensaios de MRD. Os autores sugeriram que os ensaios de MRD devem ser realizados com redução na velocidade de abertura dos contatos, o que fornece resultados mais precisos que os ensaios realizados em velocidade nominal. Foi observado que os ensaios realizados em velocidade nominal forneceram curvas de MRD com muitos picos, dificultando a identificação do instante de separação dos contatos principais. O método proposto pelos pesquisadores permitiu a

interpretação dos resultados do ensaio de MRD, utilizando a área sob a curva de MRD como parâmetro de avaliação e correlacioná-la com o estado de degradação dos contatos. A redução da velocidade de abertura contatos foi realizada experimentalmente, sendo necessário fazer adaptações no sistema mecânico dos disjuntores estudados. As adaptações podem provocar falhas no funcionamento do disjuntor, conforme alertado pelos próprios autores.

Embora Landry *et al.* (2006) tenham relatado a necessidade de redução da velocidade de abertura dos contatos de disjuntores, na literatura pesquisada para a realização deste trabalho de dissertação, não foram encontrados relatos da existência de disjuntores que permitam o controle da velocidade de abertura de forma nativa, ou seja, sem a necessidade de adaptações.

Oliveira (2015) conduziu um estudo criterioso sobre os procedimentos adotados para ensaios de MRD em disjuntores. Na pesquisa, análises a respeito da influência que os parâmetros de ensaio exercem sobre os resultados de MRD foram realizadas. Os parâmetros avaliados foram a intensidade da corrente de teste aplicada e a velocidade de abertura dos contatos, em disjuntores do tipo PVO. Uma análise sobre a reprodutibilidade dos resultados foi conduzida utilizando o coeficiente de determinação R^2 . O autor constatou que os ensaios de MRD realizados com velocidade nominal de abertura dos contatos e, utilizando os níveis mínimos de corrente de teste indicados pelas normas IEC e ANSI (50 e 100 A, respectivamente) não são adequados para ensaios de MRD. O autor associou a inadequação à baixa reprodutibilidade dos resultados e a alta interferência proveniente de películas de óleo na superfície dos contatos e vibrações mecânicas, alegando que elas comprometem a confiabilidade do diagnóstico. A partir dos resultados obtidos, o autor determinou um nível máximo de velocidade de abertura dos contatos e um nível mínimo de corrente de teste a serem utilizados nos ensaios de MRD. O objetivo era obter resultados/diagnósticos mais confiáveis.

Trajano (2015) apresentou uma metodologia para a avaliação do nível de degradação dos contatos de disjuntores por meio da MRD e lógica *fuzzy*. Os valores de resistência média do contato principal e do contato de arco foram utilizados como parâmetros de entrada para uma rotina computacional. A rotina implementava o sistema baseado em lógica *fuzzy* destinado a classificar o nível de degradação do contato, a partir dos limites de resistência estática tolerados para cada modelo de disjuntor. A validação do método foi realizada pela avaliação de contatos degradados naturalmente. O autor concluiu que a metodologia proposta é tecnicamente viável e pode ser aplicada em qualquer tipo de disjuntor de alta tensão. Ele também concluiu que o sistema de lógica *fuzzy* desenvolvido pode ser adaptado, com o objetivo de avaliar outros parâmetros de diagnóstico, como corrente de fuga, vibrações, tempos de fechamento, etc.

Os autores das pesquisas até então descritas estudaram o monitoramento de disjuntores por meio da aplicação da MRD. Paralelamente, outros autores se dedicaram a estudar o monitoramento de disjuntores por meio dos sinais emitidos pelos arcos elétricos, conforme pode ser visto nas pesquisas descritas a seguir.

Barlet e Moore (2001) estudaram, utilizando demodulação em amplitude (detecção de envoltória), as diferenças entre os sinais emitidos durante a abertura e o fechamento de equipamentos de manobra a ar, óleo, SF₆ e vácuo. A detecção dos sinais foi realizada por antenas do tipo monopolo com faixa de operação de 1 MHz a 1 GHz. A partir dos resultados, os autores verificaram que existe uma diferença de simetria nas formas de onda provenientes das operações de abertura e fechamento, após a demodulação dos sinais. Empregando a técnica do rebatimento de frequências, a equipe constatou que existem componentes de frequência oriundos de reignições de arco na região dos 300 Hz. As bandas de frequência com início em 51,5 MHz; 51,225 MHz e 51,15 MHz foram utilizadas para o rebatimento de frequências. Contudo, os pesquisadores não justificaram a escolha das referidas bandas de frequências. Eles concluíram que tanto a diferenciação entre equipamentos, como também a identificação de reignições de arco são possíveis, mediante a técnica utilizada.

Moore e Chong (2002) estudaram o espectro eletromagnético dos sinais emitidos por disjuntores a SF₆ chaveando bancos de capacitores. Os sinais foram detectados por uma antena monocônica capaz de detectar frequências na faixa 100 MHz a 1 GHz. A partir dos resultados, obtidos por meio de análises do tipo tempo-frequência dos sinais, foi constatada a existência de componentes espectrais na faixa de 100 MHz a 200 MHz durante toda a duração do sinal. A existência dessas componentes foi constatada tanto na abertura quanto no fechamento dos disjuntores. Também foi constatada a presença de componentes espectrais em torno das frequências 300, 500 e 840 MHz em momentos distintos, durante as operações de abertura dos contatos. Com o auxílio de simulações em um modelo computacional, os autores concluíram que as componentes espectrais, até 200 MHz, estão relacionadas com as dimensões físicas dos contatos dos disjuntores. Devido a limitações no modelo utilizado nas simulações para frequências acima de 200 MHz, os autores não apresentaram conclusões sobre as componentes espectrais de frequências superiores a 200 MHz detectadas pela antena monocônica.

Moore (2004) apresentou um método para a determinação da diferença dos tempos de fechamento dos contatos de um disjuntor, baseado na detecção dos sinais emitidos pelos arcos elétricos no interior dos polos de disjuntores. Para tanto, o autor propôs um arranjo de quatro antenas do tipo monocônica, posicionadas de forma que se pudesse determinar os instantes de fechamento dos contatos, bem como identificar cada contato por meio da diferença de tempo

entre a detecção do sinal de um determinado contato em cada antena. A identificação dos instantes de interesse (impulsos de ignição de arco) foi realizada pela análise visual das formas de onda detectadas. A faixa de detecção das antenas utilizadas foi de 100 MHz a 1 GHz. Os testes foram realizados em um disjuntor a SF₆ de um banco de capacitores. O autor concluiu que as diferenças entre os tempos de fechamento dos polos podem ser determinadas, de maneira consistente e confiável mediante a utilização do método proposto. Contudo, o autor relatou que sinais provenientes de disjuntores vizinhos também eram detectados pelas antenas, o que poderia dificultar a identificação dos instantes de ignição dos arcos elétricos do disjuntor sob análise.

Chapman (2005) apresentou um método baseado na detecção do sinal emitido pelo arco elétrico de um polo do disjuntor, em que o sinal era detectado por um sensor de acoplamento capacitivo do tipo disco-plano. O objetivo era medir o tempo de duração do arco elétrico durante a abertura do disjuntor. Os testes laboratoriais foram realizados em um disjuntor a SF₆ de 24 kV. Empregando demodulação em amplitude no sinal detectado, os instantes de início e fim do arco elétrico puderam ser identificados. Dificuldades quanto à medição de tempos de duração de arcos simultâneos detectados por um único sensor foram relatadas e o autor sugeriu a instalação de blindagens interpolares para possibilitar a detecção individual em cada polo. Chapman (2005) concluiu que o método apresentado é eficaz na medição da duração do arco elétrico proveniente de uma única fonte, como também fornece melhores resultados em disjuntores com encapsulamento metálico como aqueles em subestações isoladas a gás.

Ramli *et al.* (2008) propuseram uma técnica para o monitoramento de disjuntores que operam bancos de capacitores ou reatores *shunt* por meio da análise visual das perturbações nas formas de onda das tensões do sistema. A detecção das formas de onda de tensão do sistema foi realizada por um arranjo de antenas, quando na ocorrência de um arco elétrico proveniente da comutação dos contatos de um disjuntor. O arranjo era composto por três antenas de acoplamento capacitivo em forma de cilindro fechado, capazes de detectar frequências de até 100 MHz e uma antena do tipo dipolo (1,5 MHz a 1.500 MHz). De acordo com resultados obtidos em campo, em disjuntores a SF₆ de 275 kV, os autores concluíram que as diferenças de tempo de fechamento entre polos, as diferenças de tempo da interrupção das correntes entre polos e a sequência de fechamento/abertura são detectáveis.

Meier *et al.* (2011) apresentaram uma técnica (*Phase Discrimination Technique*) para a medição dos tempos de ignição e extinção do arco elétrico em disjuntores localizados no interior de subestações isoladas a gás. Segundo os autores, a técnica apresentada é capaz de identificar o polo do disjuntor que originou os sinais detectados, no caso da detecção simultânea de sinais

provenientes de dois ou mais polos. Os autores propuseram a utilização de antenas em forma de disco, sintonizadas em 975 MHz para realizar a detecção dos sinais. As antenas foram instaladas nas janelas dielétricas próximas a cada polo do disjuntor visando detectar o sinal emitido durante a abertura dos contatos. Por meio de testes realizados em um disjuntor a SF₆ de 400 kV em serviço, chaveando um reator de 200 MVar, os autores, além de demonstrarem a eficácia da técnica, também constataram que o sinal emitido é mais intenso durante os momentos de maior instabilidade do arco elétrico, ou seja, nos instantes de ignição e extinção.

Lopez-Roldan *et al.* (2012) estudaram a aplicação do método desenvolvido por Ramli *et al.* (2008) para a detecção de reignições de arco em disjuntores a SF₆ chaveando reatores *shunt*. A partir dos resultados, eles constataram que o sistema proposto possuía melhor desempenho que a solução incorporada ao controlador de chaveamento do disjuntor analisado. Segundo os autores, o princípio de funcionamento da solução incorporada se baseia na análise da forma de onda da corrente do sistema. A equipe de Lopez-Roldan concluiu que o controlador de chaveamento é incapaz de reconhecer reignições de curta duração. Ela recomendou que um sistema, capaz de detectar as reignições de curta duração, fosse levado em consideração nos projetos de controladores de chaveamento modernos, visto que, as reignições de curta duração podem causar degradação das estruturas responsáveis por concentrar o fluxo do meio extintor na região do arco elétrico.

Jia-min *et al.* (2012) apresentaram um dispositivo para o monitoramento em serviço dos contatos de disjuntores a vácuo. O dispositivo implementava o método BCWC (*Breaking Current Weighted Cumulative*). Ela, por sua vez, que utiliza os valores da corrente interrompida e da duração do arco elétrico para fornecer uma estimativa da degradação acumulada nos contatos. Para medir do tempo de duração do arco elétrico os autores desenvolveram um sensor de acoplamento indutivo capaz de detectar o momento da ignição do arco, quando posicionado próximo ao polo sob análise. No entanto, os autores não informaram sobre a faixa de frequência de operação do sensor. Por meio de experimentações em laboratório e simulações computacionais, os autores concluíram que o sensor de acoplamento indutivo possuía sensibilidade suficiente para detectar o momento de ignição dos arcos elétricos estudados.

Mustafa *et al.* (2014) investigaram a aplicabilidade da transformada *wavelet* na análise do desempenho de disjuntores a SF₆ chaveando bancos de capacitores. A transformada *wavelet* foi aplicada ao sinal eletromagnético detectado durante a abertura e fechamento dos contatos. O arranjo de antenas utilizado foi semelhante ao proposto por Ramli *et al.* (2008). De acordo com testes realizados em disjuntores de 245 kV, os autores constataram que o arranjo utilizado apresentou melhores resultados durante as operações de fechamento dos contatos. Em relação

à transformada *wavelet*, após a decomposição do sinal em 12 bandas (de 0 a 12,5 MHz) utilizando a *wavelet* de Meyer, os autores concluíram que a faixa de frequência 3,052 kHz a 6,103 kHz evidencia os instantes de fechamento de cada contato.

Oliveira *et al.* (2016) propuseram uma técnica para a medição da sincronia de fechamentos dos contatos, a velocidade de deslocamento dos contatos e a duração do arco elétrico. A medição foi realizada por meio da avaliação dos sinais emitidos pelo arco durante a interrupção de uma corrente contínua, em baixa tensão, pelo disjuntor. A detecção dos sinais foi realizada por dois sensores de acoplamento capacitivo, uma antena direcional com faixa de operação de 1 MHz a 2 GHz e outra antena direcional com faixa de operação de 270 MHz a 1 GHz. Os autores concluíram que sensores de acoplamento capacitivo na forma de fita, posicionados em torno do polo do disjuntor, possuem melhor desempenho na detecção dos sinais de interesse quando comparados com as antenas utilizadas.

Li *et al.* (2016) avaliaram, por meio de simulações computacionais, o impacto da instalação de um sensor de acoplamento capacitivo na bucha com isolamento de 110 kV de um transformador de potência. O sensor avaliado seria utilizado no desenvolvimento de uma técnica de monitoramento em serviço dos enrolamentos de transformadores. Foram realizadas simulações de intensidade de campo elétrico em situações de: operação normal; *flashover*; teste de tensão de suportabilidade em frequência industrial; teste de suportabilidade a impulso de tensão. A partir da análise dos resultados, os pesquisadores concluíram que o impacto dos sensores na intensidade dos campos elétricos simulados pode ser desprezado, nas situações avaliadas.

Na Tabela 3.1 pode ser visto um resumo das principais contribuições das pesquisas sobre o monitoramento de disjuntores por meio dos sinais emitidos pelos arcos elétricos. Nela, são evidenciados as técnicas e os elementos de detecção de sinais empregados em cada pesquisa. Também pode ser vista na referida tabela a contribuição do autor deste trabalho.

Tabela 3.1 – Resumos das contribuições das pesquisas e dos elementos de detecção utilizados.

Pesquisadores	Elemento(s) de Detecção	Contribuições	Técnica(s) empregada(s)
Barlet e Moore (2001)	Antenas do tipo monopolo polarizadas verticalmente (100 MHz a 1 GHz)	Estudaram as diferenças entre os sinais eletromagnéticos detectados durante a abertura e fechamento de equipamentos de manobra.	1
Moore e Chong (2002)	Antena monocônica (100 MHz a 1 GHz)	Estudaram a distribuição temporal das componentes espectrais presentes no sinal eletromagnético irradiado por disjuntores à SF ₆ em bancos de capacitores.	2
Moore (2004)	Antenas monocônicas (100 MHz a 1 GHz)	Propôs um método para a determinação da diferença dos tempos de fechamento dos contatos de um disjuntor.	3
Chapman (2005)	Sensor de acoplamento capacitivo do tipo disco-plano	Apresentou um método para a medição do tempo de duração do arco elétrico.	1
Ramliet <i>et al.</i> (2008)	Antena do tipo dipolo (1,5 MHz a 1,5 GHz) e antenas em forma de cilindro (até 100 MHz)	Técnica de monitoramento de disjuntores por meio da análise da perturbação na forma de onda de tensão do sistema detectada por arranjo de antenas.	3
Meier <i>et al.</i> (2011)	Antenas do tipo disco-plano (975 MHz)	Técnica de medição dos tempos de ignição e extinção dos arcos elétricos de disjuntores instalados em subestações isoladas a gás.	4
Lopez-Roldan <i>et al.</i> (2012)	Antena do tipo dipolo (1,5 MHz a 1,5 GHz) e antenas em forma de cilindro fechado (até 100 MHz)	Detecção de reignições de arco em disjuntores.	3
Jia-min <i>et al.</i> (2012)	Sensor de acoplamento indutivo (bobina de Rogoski)	Detecção do momento de ignição do arco elétrico em disjuntores a vácuo.	5
Mustafa <i>et al.</i> (2014)	Antena do tipo dipolo (1,5 MHz a 1,5 GHz) e três antenas em forma de cilindro (até 100 MHz)	Investigaram aplicabilidade da transformada <i>wavelet</i> na análise dos sinais detectados durante o fechamento dos contatos.	3 e 6
Oliveira <i>et al.</i> (2016)	Sensores de acoplamento capacitivo e antenas direcionais (1 MHz a 2 GHz e 270 MHz a 1 GHz)	Técnica de medição da sincronia entre contatos, velocidade de deslocamento dos contatos e a duração do arco elétrico.	3
Li <i>et al.</i> (2016)	Sensor de acoplamento capacitivo	Avaliaram por meio de simulações computacionais, o impacto da instalação de um sensor de acoplamento capacitivo na bucha de alta tensão de um transformador de potência.	7
Este trabalho	Sensores de acoplamento capacitivo	Avaliou experimentalmente a aplicabilidade de sensores de acoplamento capacitivo para o monitoramento de disjuntores de alta tensão a partir do sinal emitido pelo arco elétrico no interior da câmara de extinção.	7, 8, 9 e 10

- 1 – Demodulação em amplitude;
- 2 – Análise tempo-frequência;
- 3 – Avaliação visual;
- 4 – *Phase Discrimination Technique*;
- 5 – *Breaking Current Weighted Cumulative*;
- 6 – *Wavelet*;
- 7 – Simulação computacional;
- 8 – Medição de Resistência Dinâmica;
- 9 – Estatística descritiva;
- 10 – Razão de Energia de Sub-banda.

Fonte: Autoria própria.

Neste capítulo foi apresentada inicialmente uma revisão bibliográfica sobre os principais estudos relacionados ao monitoramento da degradação dos contatos de disjuntores de alta tensão, por meio de técnicas de medição de resistência de contato. Em seguida, foi apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais trabalhos que utilizaram técnicas de detecção de sinais de arcos elétricos, visando o monitoramento de disjuntores em serviço.

No próximo capítulo será descrita a metodologia adotada nas análises e ensaios, bem como o material utilizado na pesquisa.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados e a metodologia proposta para a concretização dos objetivos estabelecidos nessa pesquisa.

4.1 MATERIAL

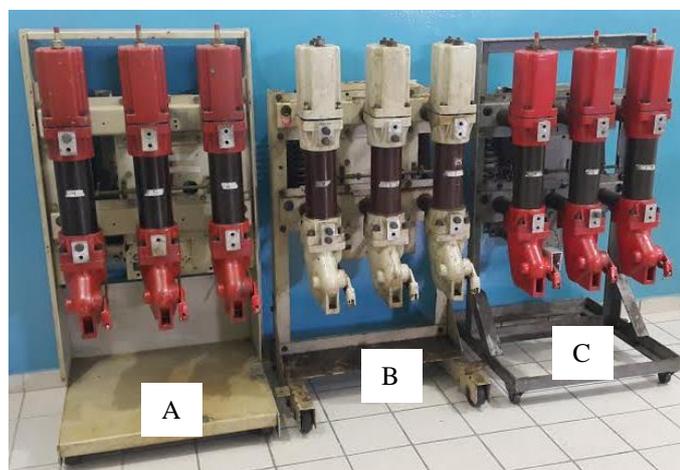
No desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados três disjuntores de média tensão do tipo PVO, fabricados pela Siemens. Não existem registros do número de operações de interrupção de correntes de curto-circuito para os disjuntores. Na Tabela 4.1 é possível visualizar as principais características dos disjuntores utilizados. Na Figura 4.1 é mostrada uma fotografia dos disjuntores utilizados neste trabalho.

Tabela 4.1 – Características dos disjuntores de média tensão.

Nome	Disjuntor A	Disjuntor B	Disjuntor C
Tipo	3AC	3AC	3AC
Número	03709	0350	03442
Ano de fabricação	1978	1987	1978
Corrente nominal	800 A	800 A	800 A
Tensão nominal	15 kV	15 kV	15 kV
Corrente de interrupção simétrica nominal	12,5 kA	12,5 kA	12,5 kA
Frequência	60 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz
Meio isolante	Óleo	Óleo	Óleo
Fabricação	Siemens	Siemens	Siemens

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.1 – Disjuntores utilizados.



Fonte: Autoria própria.

Os conjuntos de contatos, compostos por contatos fixo e móvel, utilizados nesta pesquisa são provenientes dos disjuntores descritos anteriormente, não havendo registros sobre o estado de degradação dos contatos de arco. O nível de degradação dos contatos foi estimado de acordo com a metodologia descrita no item 4.2.1. Os contatos foram nomeados como *C1*, *C2* e assim sucessivamente até *C9*. Os contatos *C1*, *C2* e *C3* se encontravam instalados no disjuntor A; *C3*, *C4* e *C5* se encontravam instalados no disjuntor B e *C3*, *C4* e *C5* se encontravam instalados no disjuntor C. Na Figura 4.2 é mostrada uma fotografia dos contatos utilizados.

Figura 4.2 – Contatos fixos e móveis utilizados nos ensaios.



Fonte: Autoria própria.

Com o objetivo de confeccionar sensores de acoplamento capacitivos com diferentes características, placas de circuito impresso dupla face com dois tipos de substrato (dielétrico) foram utilizadas: duas em fibra de vidro com espessuras diferentes; uma em poliamida. Na Figura 4.3 é mostrada uma fotografia de duas destas placas e na Tabela 4.2 são mostradas as características técnicas de todas as placas utilizadas.

Figura 4.3 – Placas de circuito impresso utilizadas para a confecção dos sensores. Fibra de vidro à esquerda e poliamida à direita.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.2 – Características técnicas das placas de circuito impresso utilizadas.

Nome	Placa 1	Placa 2	Placa 3
Tipo de substrato	F	F	P
Espessura do substrato (mm)	0,8	1,5	0,2
Constante dielétrica	4,4	4,4	3,7

F – Fibra de vidro

P – Poliamida

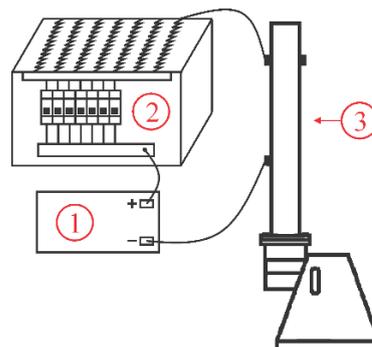
Fonte: (SEBASTIAN, UBIC e JANTUNEN, 2017).

4.2 MÉTODOS

Para possibilitar a análise da aplicabilidade dos sensores de acoplamento capacitivo no monitoramento dos contatos de arco em disjuntores de alta tensão, foi necessário realizar ensaios laboratoriais com o objetivo de medir a resistência dinâmica dos contatos, como também de produzir os sinais de arcos elétricos que seriam detectados pelos sensores. Em ambos os casos, uma corrente de teste deveria ser injetada em um dos polos do disjuntor. No interior desse polo os contatos (fixo e móvel) sob ensaio estariam instalados. Dessa forma, o sistema de injeção de corrente desenvolvido por Souza *et al.* (2014) para a medição da resistência dinâmica de contatos foi utilizado.

No sistema desenvolvido por Souza *et al.* (2014), a injeção da corrente de teste é realizada a partir da associação da bateria estacionária (12 V/220 Ah) em série com o resistor ajustável (0,040 Ω – 1,2 Ω). O arranjo bateria/resistor é capaz de injetar correntes de até 300 A em um polo do disjuntor por vez. Nos ensaios realizados neste trabalho, o arranjo foi ajustado para injetar uma corrente de 250 A. A corrente injetada pode ser medida por meio de um transdutor de corrente que fornece um sinal de tensão proporcional ao valor de corrente. A relação do transdutor empregado é 1 volt para 100 amperes. O diagrama do arranjo encontra-se ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Arranjo de injeção de corrente utilizado. 1 – bateria, 2 – resistor ajustável e 3 – disjuntor.

Fonte: Adaptado de (SOUZA *et al.*, 2014).

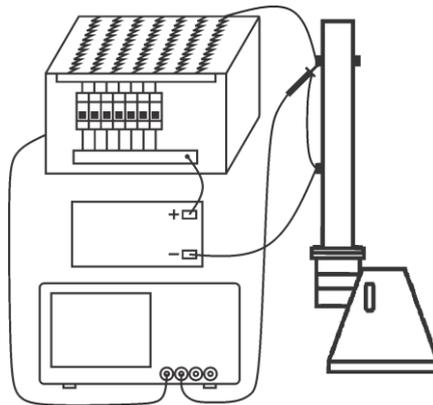
A aquisição e armazenamento dos dados obtidos nos ensaios, foi realizada por meio de um osciloscópio digital fabricado pela Tektronix, modelo TDS5104B, ele é capaz de medir frequências até 500 MHz a uma taxa de amostragem de 1,25 GA/s.

4.2.1 DEGRADAÇÃO DOS CONTATOS

Antes de investigar a correlação entre a degradação dos contatos de arco e os sinais emitidos pelos arcos elétricos, bem como avaliar a capacidade de detecção dos sensores de acoplamento capacitivo, foi necessário estimar a degradação real dos contatos de arco por meio de uma técnica empregada na literatura estudada, cujos resultados serviram como referência comparativa nas investigações. A técnica adotada para a estimação de degradação dos contatos de arco utilizados neste trabalho foi a Medição de Resistência Dinâmica (MRD) empregada/estudada por Ohlen *et al.* (1995), Landry (2006), Oliveira (2015), Souza *et al.* (2014), Trajano (2015), dentre outros.

Para executar a técnica da MRD, foram utilizados os sistemas de injeção de corrente e de aquisição de dados (osciloscópio) descritos anteriormente, formando um arranjo semelhante ao empregado por Souza *et al.* (2014). O diagrama do arranjo encontra-se ilustrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Diagrama do arranjo utilizado para a MRD.



Fonte: Adaptado de (SOUZA *et al.*, 2014).

Os valores da corrente de teste aplicada no contato e da queda de tensão sobre os contatos foram adquiridos simultaneamente e em velocidade nominal de abertura do disjuntor, de acordo com as recomendações de Landry *et al.* (2006), Trajano (2015) e Oliveira (2015). Para tanto, foram utilizados dois canais do osciloscópio digital: o primeiro canal conectado ao transdutor de corrente e o segundo conectado diretamente aos terminais de um dos polos do

disjuntor. O conjunto de contatos submetidos ao ensaio de MRD foram instalados no interior desse polo.

Posteriormente, os sinais de tensão e corrente adquiridos foram processados por uma rotina computacional desenvolvida por Souza *et al.* (2014). A rotina realiza a seguinte sequência de operações para cada aquisição:

- Obtenção das curvas de resistência dinâmica a partir do sinal de tensão e corrente de cada aquisição;
- Cálculo do valor médio da região R_{ca} das curvas de resistência dinâmica, (denotado por R_{cam});
- Cálculo da média dos valores de R_{cam} (nomeada como resistência média de contato de arco, sendo denotada por R_{mca}).

O valor de R_{mca} foi utilizado como parâmetro proporcional à degradação do contato de arco, de acordo com a recomendação de Landry *et al.* (2006).

Para possibilitar a investigação da correlação entre a degradação dos contatos de arco e os sinais emitidos pelos arcos elétricos, também foi necessário estabelecer níveis de degradação para esses contatos, baseados nos valores de R_{mca} . De acordo com as recomendações de Siemens (1986), O valor limite de resistência (estática) de contato para modelos de disjuntores utilizados nesta pesquisa é de $600 \mu\Omega$. Assim, conforme proposto por Trajano (2015), foram estabelecidos heurísticamente três níveis de degradação de contato de arco tendo como base o limite de resistência estática: elevado ($R_{mca} \geq 500 \mu\Omega$), médio ($300 \mu\Omega \leq R_{mca} < 500 \mu\Omega$) e pouco degradado ($R_{mca} < 300 \mu\Omega$).

4.2.2 SENSORES DE ACOPLAMENTO CAPACITIVO

Para alcançar os objetivos desta pesquisa, foi necessário confeccionar sensores de acoplamento capacitivo com diferentes materiais e dimensões físicas. Portanto, foram propostos sensores em forma de fita, conforme as recomendações de Oliveira (2016). O comprimento dos sensores foi definido como 290 mm, com o objetivo de envolver toda a circunferência do polo do disjuntor quando instalado. A seguir são descritos os detalhes dos sensores propostos:

- Como o objetivo de obter sensores com características idealmente idênticas, dois sensores foram propostos para possuírem a mesma largura, espessura e dielétrico

em fibra de vidro. Eles foram nomeados como *S0* e *S1*, sendo destinados à análise de posicionamento descrita no item 4.2.3;

- Um sensor com a mesma largura e tipo de dielétrico dos sensores *S0* e *S1*, porém, com a espessura do dielétrico em fibra de vidro diferente. Ele foi destinado às análises em frequência descritas no item 4.2.4, sendo nomeado como *S2*;
- Outro sensor foi proposto para possuir a mesma largura dos sensores *S0* e *S1*, porém, com dielétrico em poliamida e espessura diferente, nomeado com *S3*. Ele também seria utilizado nas análises em frequência no item 4.2.4.
- Com o objetivo de avaliar os efeitos provocados pela variação na geometria dos sensores, foram propostos três sensores com características semelhantes à *S1*, *S2* e *S3*, exceto a largura, que foi dobrada. Os sensores foram nomeados como *S4*, *S5* e *S6*, respectivamente.

Na Tabela 4.3 são mostradas as características dos sete sensores propostos.

Tabela 4.3 – Características dos sensores de acoplamento capacitivo projetados.

Nome	<i>S0</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>	<i>S6</i>
Comprimento (mm)	290	290	290	290	290	290	290
Largura (mm)	20	20	20	20	40	40	40
Espessura do dielétrico (mm)	0,8	0,8	1,5	0,2	0,8	1,5	0,2
Tipo de dielétrico	F	F	F	P	F	F	P

F – Fibra de vidro

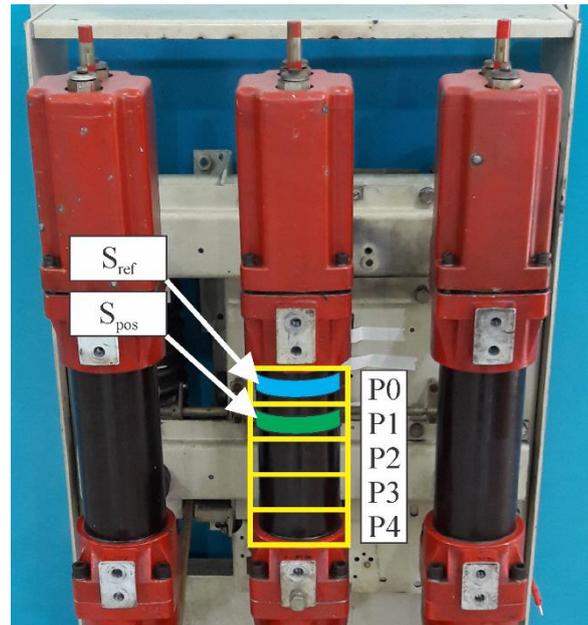
P – Poliamida

Fonte: Autoria própria.

4.2.3 POSICIONAMENTO DOS SENSORES

Para analisar a sensibilidade de detecção dos sensores de acordo com a sua posição de instalação ao longo do polo do disjuntor e, conseqüentemente, identificar a posição ótima de instalação, os dois sensores de características semelhantes (*S0* e *S1*) foram utilizados. O sensor *S0* foi mantido fixo em uma posição específica *P0* (definida como posição de referência) enquanto a posição do sensor *S1* foi modificada entre quatro posições distintas *P1*, *P2*, *P3* e *P4*. Dez aquisições simultâneas para cada posição foram realizadas. As posições de instalação dos sensores se encontram ilustradas na Figura 4.6.

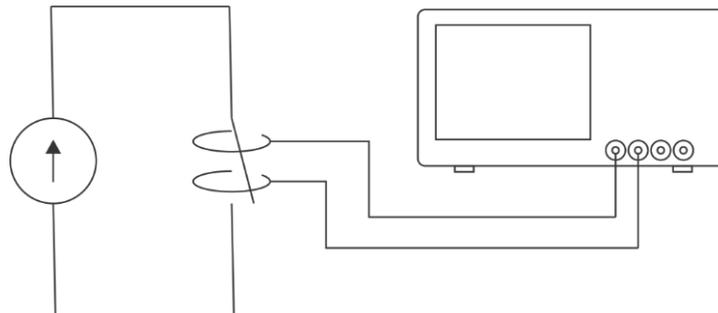
Figura 4.6 – Posições de instalação dos sensores.



Fonte: Autoria própria.

O arranjo para a injeção da corrente e a medição dos sinais de arco elétrico foi montado de acordo com o diagrama esquemático mostrado na Figura 4.7, em que o sistema de injeção de corrente é representado pela fonte de corrente, a chave representa o polo do disjuntor e os arcos de elipse representam os sensores de acoplamento capacitivo.

Figura 4.7 – Diagrama esquemático do arranjo utilizado.



Fonte: Autoria própria.

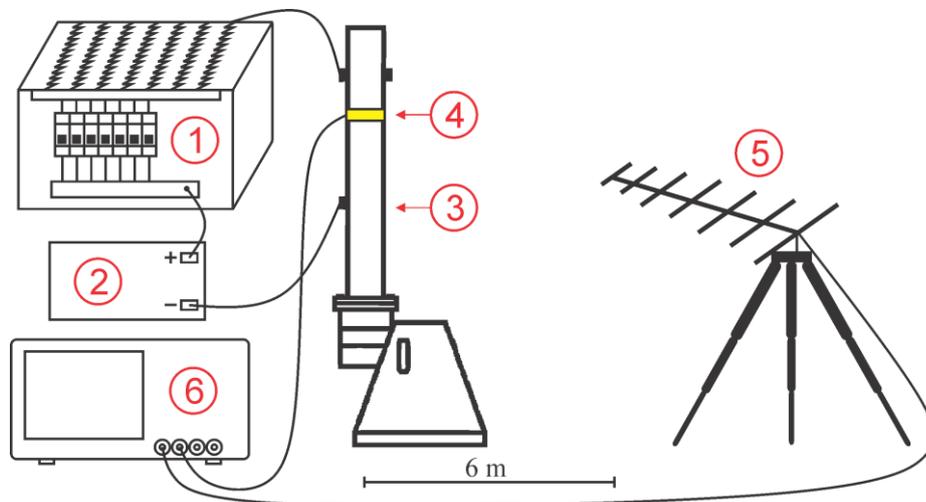
4.2.4 CAPACIDADES DE DETECÇÃO DOS SENSORES

Com o propósito de analisar a capacidade de detecção dos sensores de acoplamento capacitivo, como também de analisar os efeitos da variação nas suas geometrias, medições simultâneas com a antena direcional e os sensores de acoplamento capacitivo foram realizadas. A antena utilizada possui capacidade de detectar frequências entre 1 MHz e 2 GHz e foi adotada como referência nas avaliações dos sinais detectados pelos sensores, sendo polarizada

horizontalmente durante a aquisição dos sinais. A referida antena foi posicionada a 6 metros do polo sob análise, de modo a operar no limite do campo distante (5,5 m). O limite foi calculado de acordo com as recomendações de Bansal (1999).

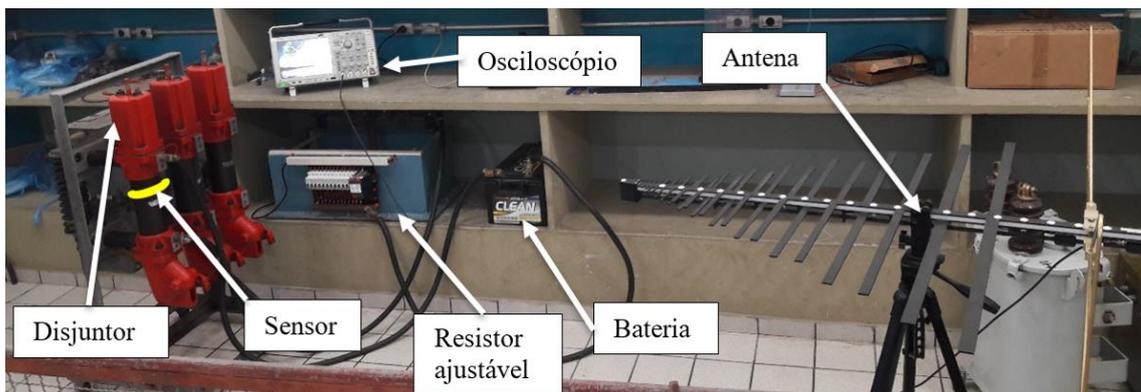
Na Figura 4.8 o diagrama do arranjo utilizado se encontra ilustrado. O circuito consiste no sistema de injeção de corrente, composto pelo resistor ajustável (1) e a bateria (2), conectado em série ao polo do disjuntor sob análise (3). Os sinais emitidos pelo arco elétrico são detectados pelo(s) sensor(es) (4) e/ou pela antena (5). O armazenamento dos sinais é realizado pelo osciloscópio (6). Na Figura 4.9 é possível visualizar o arranjo montado em laboratório.

Figura 4.8 – Diagrama do arranjo experimental utilizado nos ensaios.



Fonte: Adaptado de (SOUZA *et al.*, 2014).

Figura 4.9 – Arranjo experimental utilizado nos ensaios.



Fonte: Autoria própria.

Antes de iniciar os ensaios e análises de capacidade de detecção dos sensores, uma avaliação preliminar das formas de onda adquiridas foi realizada. O propósito foi verificar se nos sinais detectados seria possível identificar os momentos de ignição, extinção, reignição(ões)

e a duração total dos arcos elétricos, conforme recomendado por Meier (2011). Dessa forma, o sensor *S1* foi instalado no polo do disjuntor, conforme o arranjo mostrado na Figura 4.8. Em seguida, foi realizada uma aquisição simultânea de sinal junto com a antena.

Após a avaliação preliminar dos sinais detectados, três canais do osciloscópio digital foram utilizados para a aquisição simultânea dos sinais dos sensores e da antena. O primeiro canal foi conectado à antena, o segundo foi conectado a um dos sensores de menor largura (*S1*, *S2* ou *S3*) e o terceiro conectado ao sensor de maior largura (*S4*, *S5* ou *S6*) cujas demais dimensões e tipo de substrato correspondessem às do sensor conectado ao segundo canal. Dez aquisições para cada arranjo antena/sensores foram realizadas para amostras de contatos pouco, medianamente e muito degradados.

A partir dos sinais detectados, foram realizadas análises comparativas no domínio da frequência, com o objetivo de determinar a capacidade de detecção dos sensores *S1*, *S2* e *S3*. Em seguida, os sinais dos sensores *S4*, *S5* e *S6* foram comparados no domínio da frequência com os sinais dos sensores *S1*, *S2* e *S3*, respectivamente. O objetivo foi avaliar os efeitos da mudança na geometria dos sensores sobre as suas capacidades de detecção.

4.2.5 DIELÉTRICOS APLICADOS AOS SENSORES DE ACOPLAMENTO CAPACITIVO

Com o propósito de avaliar os efeitos da variação do valor da constante dielétrica do substrato dos sensores, simulações computacionais foram realizadas a partir do circuito equivalente mostrado na Figura 2.7 para a obtenção das respostas em frequência do sensor simulado. O sensor a ser simulado foi aquele no qual foi observada melhor capacidade de detecção dos sinais do arco elétrico nas análises do item 4.2.4. Assim, o valor da resistência do instrumento de medição foi definido como 50Ω e a capacitância de acoplamento foi definida de acordo com o sensor escolhido. Os materiais dielétricos (substratos) propostos para as simulações foram o ar e mais dois materiais comumente utilizados na fabricação de placas de circuito impresso: o politetrafluoretileno (PTFE) e a fibra de vidro. Na Tabela 4.4 são mostradas as constantes dielétricas dos materiais propostos.

Tabela 4.4 – Constantes dielétricas dos materiais propostos

Material	Constante Dielétrica
Ar	1
PTFE	2,2
Fibra de Vidro	4,4

Fonte: (SEBASTIAN, UBIC e JANTUNEN, 2017).

4.2.6 CORRELAÇÃO ENTRE A DEGRADAÇÃO DOS CONTATOS DE ARCO E OS SINAIS DETECTADOS

Para investigar a correlação entre a degradação dos contatos selecionados e os sinais detectados, foi criado um banco de dados composto pelos sinais detectados por meio de um dos sensores de acoplamento capacitivo. O sensor empregado foi o que apresentou melhor capacidade de detecção. Ele foi instalado na posição ótima encontrada nas análises de posicionamento, sendo realizadas 25 medições para cada um dos nove contatos, resultando em um banco de dados de 225 medições.

Para cada sinal contido no banco de dados, os valores de duração do arco elétrico e da energia do respectivo sinal foram determinados. Por fim, foram também determinados e analisados a média, o desvio padrão, a curtose e a mediana, a partir da duração e da energia dos sinais. O objetivo foi encontrar atributos estatísticos que pudessem indicar a correlação entre a degradação dos contatos de arco e os sinais detectados pelos sensores de acoplamento capacitivo.

Neste capítulo foram apresentados o material utilizado na pesquisa e os métodos empregados para analisar a aplicabilidade de sensores de acoplamento capacitivo no monitoramento de disjuntores de alta tensão nesta pesquisa.

No capítulo seguinte, serão apresentados os resultados obtidos a partir dos sinais de arcos elétricos detectados pelos sensores de acoplamento capacitivo confeccionados. Os resultados serão analisados com o objetivo de evidenciar a aplicabilidade desses sensores no monitoramento de contatos de arco disjuntores de alta tensão.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta pesquisa, iniciando pelos resultados e discussão da avaliação da degradação dos contatos de arco por meio da MRD. Logo em seguida, serão apresentadas e discutidas as principais características dos sensores de acoplamento capacitivo confeccionados, seguidos das análises de posicionamento dos sensores, análises no domínio da frequência, análise da variação na constante dielétrica e tipo do material do substrato. Por fim, serão apresentados e discutidos os resultados a respeito da investigação sobre a possibilidade da correlação entre os sinais detectados pelos sensores e a degradação dos contatos de arco dos disjuntores.

5.1 DEGRADAÇÃO DOS CONTATOS DE ARCO

Com o objetivo de estimar o estado de degradação dos contatos utilizados, ensaios de MRD foram realizados de acordo com a metodologia descrita no item 4.2.1. Na Tabela 5.1 são apresentados os valores da resistência média de contato de arco calculados para cada contato, obtidos a partir dos resultados dos ensaios de MRD. A tabela está organizada em ordem crescente do valor de resistência.

Tabela 5.1 – Resistências médias dos contatos de arco.

Contato	R_{mca}
C3	230 $\mu\Omega$
C1	296 $\mu\Omega$
C8	371 $\mu\Omega$
C2	400 $\mu\Omega$
C5	409 $\mu\Omega$
C4	481 $\mu\Omega$
C6	513 $\mu\Omega$
C9	541 $\mu\Omega$
C7	581 $\mu\Omega$

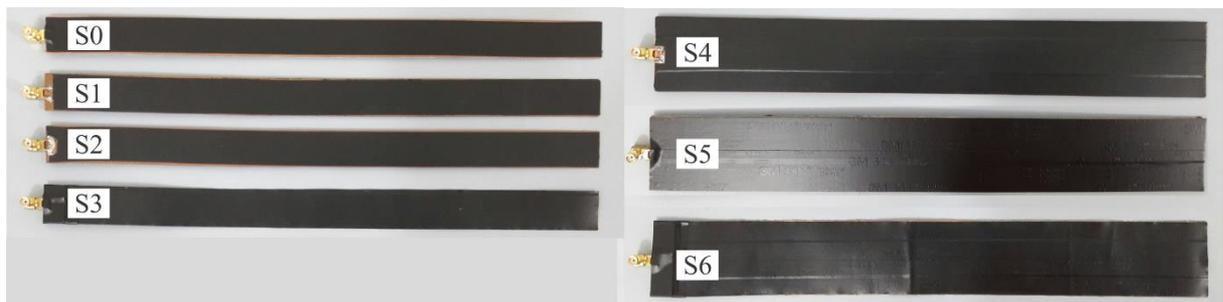
Fonte: Autoria própria.

De acordo com os níveis de degradação estabelecidos, é possível constatar pela análise dos valores apresentados na Tabela 5.1 que os contatos C6, C7 e C9 possuem degradação elevada; C2, C4, C5 e C8 possuem degradação média e os contatos C1 e C3 possuem pouca degradação.

5.2 SENSORES DE ACOPLAMENTO CAPACITIVO CONFECCIONADOS

Com o objetivo de avaliar a aplicabilidade de sensores de acoplamento capacitivo no diagnóstico de disjuntores de alta tensão, sete sensores foram confeccionados segundo as especificações propostas no item 4.2.2. Na Figura 5.1 é apresentada uma fotografia dos sensores confeccionados e na Tabela 5.2 são mostradas as suas respectivas características.

Figura 5.1 – Sensores de acoplamento capacitivo confeccionados.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 5.1, é possível observar que as faces em cobre dos sensores foram recobertas com fita de PVC, o objetivo foi prevenir oxidações do cobre. Durante as realizações dos ensaios as fitas de proteção eram removidas para não interferirem nas capacitâncias de acoplamento dos respectivos sensores.

Tabela 5.2 – Características dos sensores de acoplamento capacitivo produzidos.

Nome	<i>S0</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>	<i>S6</i>
Comprimento (mm)	290	290	290	290	290	290	290
Largura (mm)	20	20	20	20	40	40	40
Espessura do dielétrico (mm)	0,8	0,8	1,5	0,2	0,8	1,5	0,2
Tipo de dielétrico	F	F	F	P	F	F	P
Constante dielétrica	4,4	4,4	4,4	3,7	4,4	4,4	3,7
Capacitância (pF ± 2%)	353	350	184	1029	800	288	1925
Capacitância de acoplamento (pF ± 2%)*	17,4	17,4	17,4	17,4	20,5	20,5	20,5
Ganho calculado	$5,49 \cdot 10^{-2}$	$5,53 \cdot 10^{-2}$	$8,64 \cdot 10^{-2}$	$1,66 \cdot 10^{-2}$	$2,13 \cdot 10^{-2}$	$5,34 \cdot 10^{-2}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$
Frequência de corte calculada (MHz)**	8,52	8,59	15,8	3,04	3,89	10,5	1,63

F – Fibra de vidro

P – Poliamida

* Medida com o sensor na posição *P2*

** Conectado a um instrumento de medição de 50Ω

Fonte: Autoria própria.

Pela análise da Tabela 5.2, é possível verificar que foram medidas capacitâncias diferentes nos sensores *S0* e *S1*, projetados para possuírem características idealmente idênticas.

A diferença em termos percentuais corresponde a 0,85% em relação à capacitância do sensor *S0*. A diferença foi considerada como aceitável nesta pesquisa.

Quanto ao ganho dos sensores, é possível constatar na Tabela 5.2 que o maior valor foi calculado para o sensor *S2*, seguido em ordem decrescente pelos valores calculados para *S1*, *S0*, *S5*, *S4*, *S3* e *S6* respectivamente. Portanto, é presumível que o sensor *S2* seja capaz de detectar sinais de arcos elétricos de menor amplitude, quando comparado aos demais sensores.

Ainda na Tabela 5.2, é possível constatar que o menor valor da frequência de corte foi calculado para o sensor *S6*, seguido em ordem crescente pelos valores calculados para os sensores *S3*, *S4*, *S0*, *S1*, *S5* e *S2*, respectivamente. Portanto, é presumível que o sensor *S6* seja capaz de detectar sinais de arco em frequências mais baixas, quando comparado aos demais sensores.

5.3 POSICIONAMENTO DOS SENSORES

De acordo com a metodologia proposta, o sensor *S0* foi instalado na posição *P0*, enquanto que a posição do sensor *S1* foi modificado de *P1* até *P4*. Para cada posição do sensor *S1* foram realizadas dez medições. Posteriormente, os dados coletados nas medições foram processados, tendo como objetivo eliminar qualquer informação detectada antes da ignição e após a extinção da última reignição dos arcos elétricos.

Para cada medição, o valor médio da razão entre as potências dos sinais detectados pelos dois sensores foi obtido conforme a Equação (5).

$$RP = \frac{P_{S1}}{P_{S0}}, \quad (5)$$

em que P_{S1} representa o valor médio das potências dos sinais detectados pelo sensor *S1* instalado na posição sob análise e P_{S0} representa valor médio das potências dos sinais detectados pelo sensor *S0* instalado na posição de referência. Na Tabela 5.3 são mostrados os valores de médios de *RP* para cada posição.

Tabela 5.3 – Valores médios das potências relativas a *P0* de cada posição.

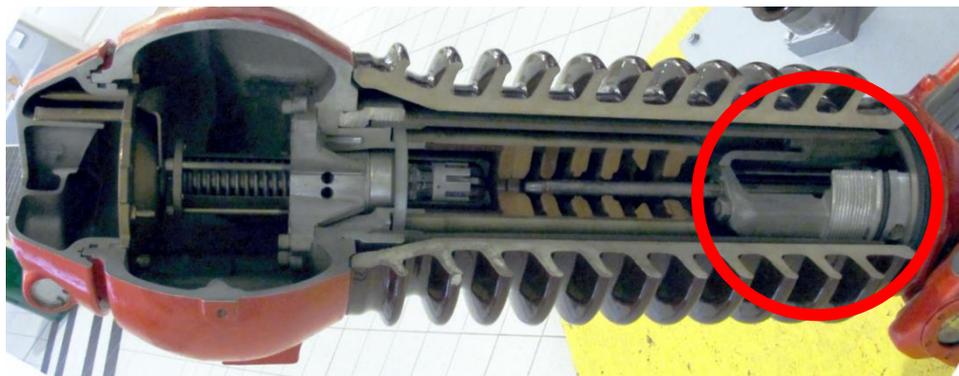
Posição	<i>RP</i>
<i>P1</i>	0,46
<i>P2</i>	0,46
<i>P3</i>	0,76
<i>P4</i>	4,52

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados exibidos na Tabela 5.3 é possível constatar que a melhor posição para a instalação dos sensores nos modelos de disjuntor analisados é a posição *P4*, visto que a razão entre as potências médias dos sinais detectados pelos sensores *S1* e *S0* foi a maior.

O valor elevado de *RP* para a *P4* em relação em relação às demais posições pode ser explicado pela presença de estruturas metálicas internas nos disjuntores analisados, localizadas na altura da referida posição. As estruturas servem de guias para a movimentação dos contatos móveis e se encontram mais próximas do invólucro da câmara de extinção do que os próprios contatos, conforme destacado na Figura 5.2. De acordo com a teoria de Chapman (2005), por estarem galvanicamente ligadas aos contatos móveis e mais próximas do sensor instalado, elas provocam o aumento da capacitância de acoplamento (C_I) do sensor e, conseqüentemente, o aumento do seu ganho.

Figura 5.2 – Detalhe das estruturas guia dos contatos móveis em um disjuntor típico.

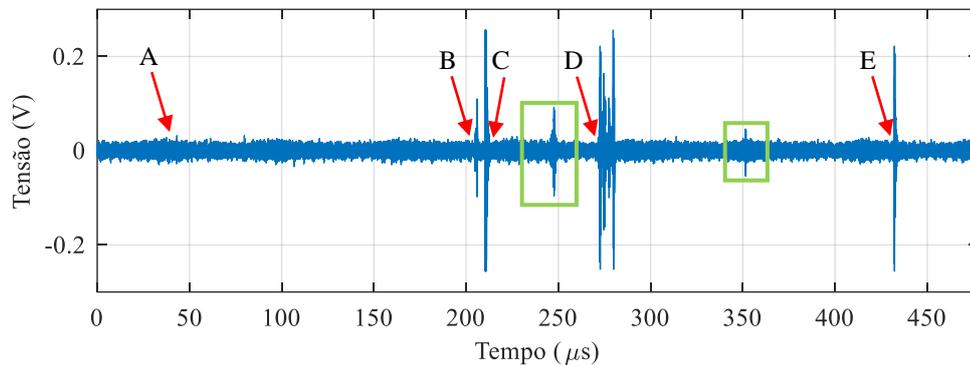


Fonte: adaptado de (FOUNDATION, 2017).

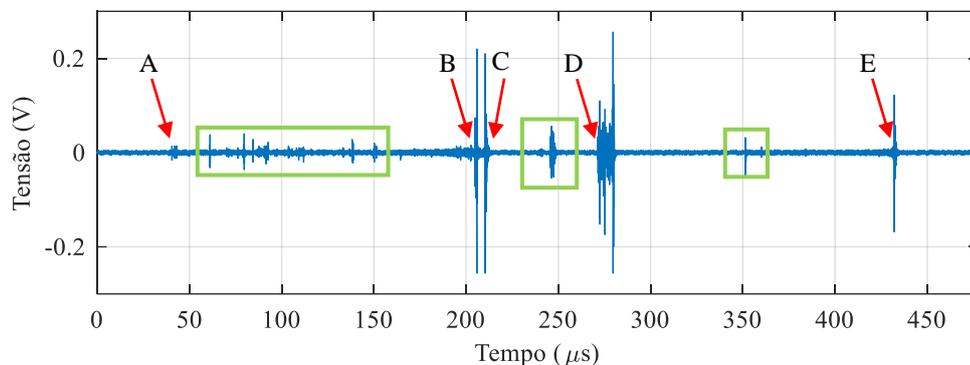
5.4 ANÁLISE DAS FORMAS DE ONDA DETECTADAS

Antes de iniciar as análises das capacidades de detecção dos sensores, uma avaliação preliminar das formas de onda adquiridas foi realizada com o propósito de verificar se nos sinais detectados seria possível identificar os momentos de ignição, reignição e extinção dos arcos elétricos. Assim, o sensor *S1* foi instalado no polo do disjuntor e uma aquisição simultânea de sinal junto com a medição por meio da antena foi realizada conforme a metodologia descrita no item 4.2.4. Na Figura 5.3 encontram-se ilustradas as formas de onda de tensão adquiridas por meio da antena e do sensor.

Figura 5.3 – Aquisição simultânea de sinal feita com antena (a) e sensor de acoplamento capacitivo (b). A – ignição do arco; B, C e D – reignições e E – extinção do arco.



a) Captação realizada pela antena



b) Captação realizada pelo sensor

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados apresentados na Figura 5.3 é possível constatar que as formas de onda detectadas pelo sensor e pela antena são equivalentes. Contudo, o sinal detectado pela antena possui maior nível de ruído, o que impossibilitou a identificação de sinais de arco com menor amplitude, como por exemplo o sinal do instante A, que marca a ignição do arco elétrico. Foi possível identificar também os momentos de três reignições (B, C e D) e da extinção do arco elétrico (E). Dessa forma a duração do arco elétrico pode ser obtida pela diferença de tempo entre os momentos E e A.

Ainda na Figura 5.3, foi possível identificar sinais de arco com baixa amplitude (destacados em verde). Segundo Meier, Moore e Coventry (2011), os sinais ocorrem nos momentos em que o arco elétrico passa por instabilidades, tendo sua impedância aumentada e reduzida rapidamente. As variações de impedância resultam em variações de tensão, que por sua vez, produzem ondas eletromagnéticas que são detectáveis pela antena e pelo sensor.

Portanto, é possível concluir que as características de interesse são identificáveis nos sinais de arco elétrico detectados, sendo justificado o uso dos disjuntores de média tensão nos ensaios. Também é possível concluir que o maior nível do ruído da antena pode inviabilizar a

identificação de algumas características relevantes, como neste caso por exemplo, o instante de ignição do arco elétrico.

5.5 ANÁLISES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Com o objetivo de avaliar o comportamento dos sensores confeccionados em relação às frequências de detecção, uma análise comparativa foi realizada entre os sinais detectados pelo sensor de acoplamento capacitivo e os sinais detectados pela antena. Os sinais obtidos por meio da antena foram tomados como sinais de referência, uma vez que ela é sensível na faixa entre 1 MHz e 2 GHz, conforme informado pelo fabricante. Dessa forma, aquisições simultâneas com a antena direcional e os sensores foram realizadas de acordo com a metodologia descrita no item 4.2.4. Posteriormente, os dados adquiridos foram processados por uma rotina computacional, ela foi desenvolvida com o objetivo de quantificar a capacidade de detecção dos sensores e da antena direcional em faixas de frequências com larguras pré-determinadas.

A rotina computacional desenvolvida implementa um método adaptado da teoria dos Vetores de Energia dos Centroides das Sub-bandas Espectrais (VECSE), apresentada por Ferreira (2011). O método consiste em dividir os espectros de frequência do ruído ambiente e dos sinais de arco, desde a ignição até a extinção da última reignição, em sub-bandas de 50 MHz das quais são calculadas suas energias de sub-banda associadas. As energias de sub-banda do ruído e do sinal do arco, nomeadas E_R e E_S respectivamente, foram utilizadas para a obtenção do parâmetro de comparação de acordo com a Equação (6):

$$RS = \frac{E_S}{E_R}, \quad (6)$$

em que RS foi nomeado como razão de energia de sub-banda, Sendo RS_S e RS_A as relações de energia de sub-banda do sensor e da antena, respectivamente.

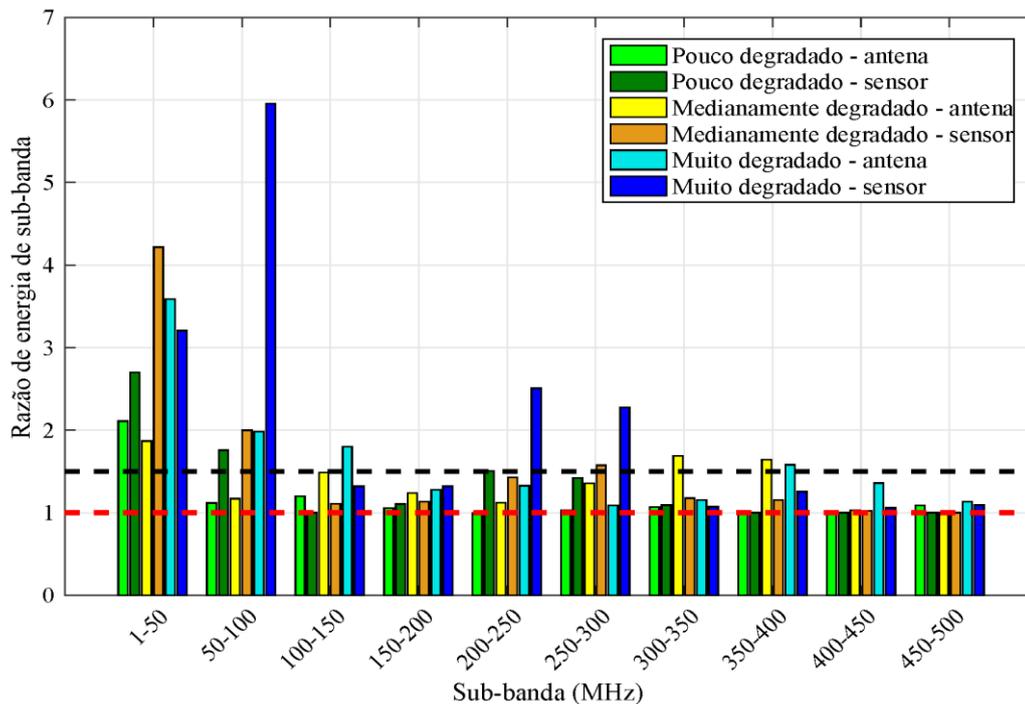
Valores de RS iguais ou próximos de 1 significam que a antena ou sensor sob análise detecta apenas o ruído ambiente na respectiva sub-banda. Nesse caso, pode-se concluir que o elemento de detecção analisado não é capaz de medir na faixa de frequência ou que o sinal de interesse não possui componentes nesta faixa de frequência. Para fins de análise, foi estabelecido o limiar de detecção do parâmetro RS como sendo 1,5. Esse valor foi escolhido considerando possíveis diferenças entre as energias de sub-banda do ruído ambiente, presente durante a ocorrência do arco elétrico e, do ruído ambiente utilizado no cálculo de RS , que foi adquirido antes da ignição do arco elétrico.

Nos ensaios realizados, a memória do osciloscópio foi suficiente para gravar um sinal composto por duas parcelas de igual tamanho (quantidade de pontos). A primeira parcela do sinal continha somente o ruído ambiente. A segunda parcela continha o sinal do arco elétrico advindo do processo de abertura do disjuntor que foi detectado pela antena e pelos sensores.

Os valores médios do parâmetro RS (Razão de Energia de Sub-banda) obtidos para cada sensor analisado foram representados em forma de gráfico de barras, nos quais o eixo horizontal corresponde às sub-bandas analisadas enquanto o eixo vertical corresponde aos valores do parâmetro RS obtidos para cada contato na sub-banda equivalente.

A análise comparativa da capacidade de detecção dos sensores foi realizada por meio dos gráficos do parâmetro RS dos sensores $S1$, $S2$ e $S3$, mostrados nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, nas quais, as linhas tracejadas horizontais em vermelho e preto indicam respectivamente $RS = 1$ e $RS = 1,5$.

Figura 5.4 – Gráfico da Razão de Energia de Sub-banda do sensor $S1$.



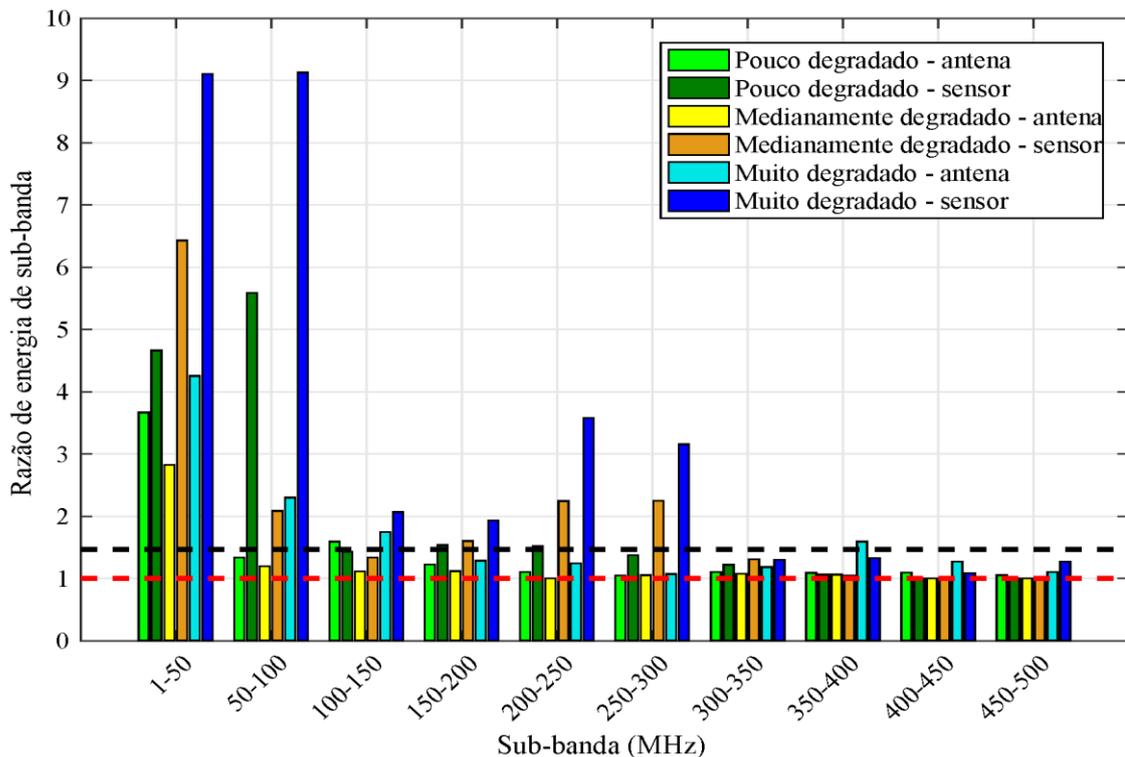
Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos para o sensor $S1$, apresentados na Figura 5.4, verifica-se que na sub-banda 1 MHz - 50 MHz, independentemente do nível de degradação dos contatos, tanto a antena quanto o sensor foram capazes de detectar os sinais com valores de RS superiores ao limite estabelecido. Na sub-banda 50 MHz - 100 MHz, o sensor $S1$ continua a detectar sinais com valores de RS superiores ao limite para todos os níveis de degradação de contato. Entretanto, a antena apresentou detecção apenas para o contato muito degradado, o que

representaria uma vantagem de detecção do sensor em relação à antena caso a informação de interesse estivesse localizada na faixa de frequência de 50 MHz a 100 MHz. Adicionalmente, é possível constatar que houve detecção pelo sensor de sinais dos contatos pouco e muito degradados nas sub-bandas de 200 MHz - 250 MHz e dos contatos medianamente e muito degradados nas sub-bandas de 250 MHz - 300 MHz.

Nas demais sub-bandas não houve captação de sinais por parte do sensor, enquanto que a antena foi capaz de detectar sinais dos contatos medianamente e pouco degradados nas sub-bandas de 100 MHz - 150 MHz e 350 MHz - 400 MHz, sendo também capaz de detectar sinais do contato medianamente degradado na sub-banda 300 MHz - 350 MHz. Portanto, a incapacidade do sensor de detectar sinais nas sub-bandas 100 MHz - 150 MHz, 300 MHz - 350 MHz e 350 MHz - 400 MHz representaria uma desvantagem em relação à antena, caso a informação de interesse estivesse localizada nas referidas faixas de frequência.

Figura 5.5 – Gráfico da Razão de Energia de Sub-banda do sensor S2.



Fonte: Autoria própria.

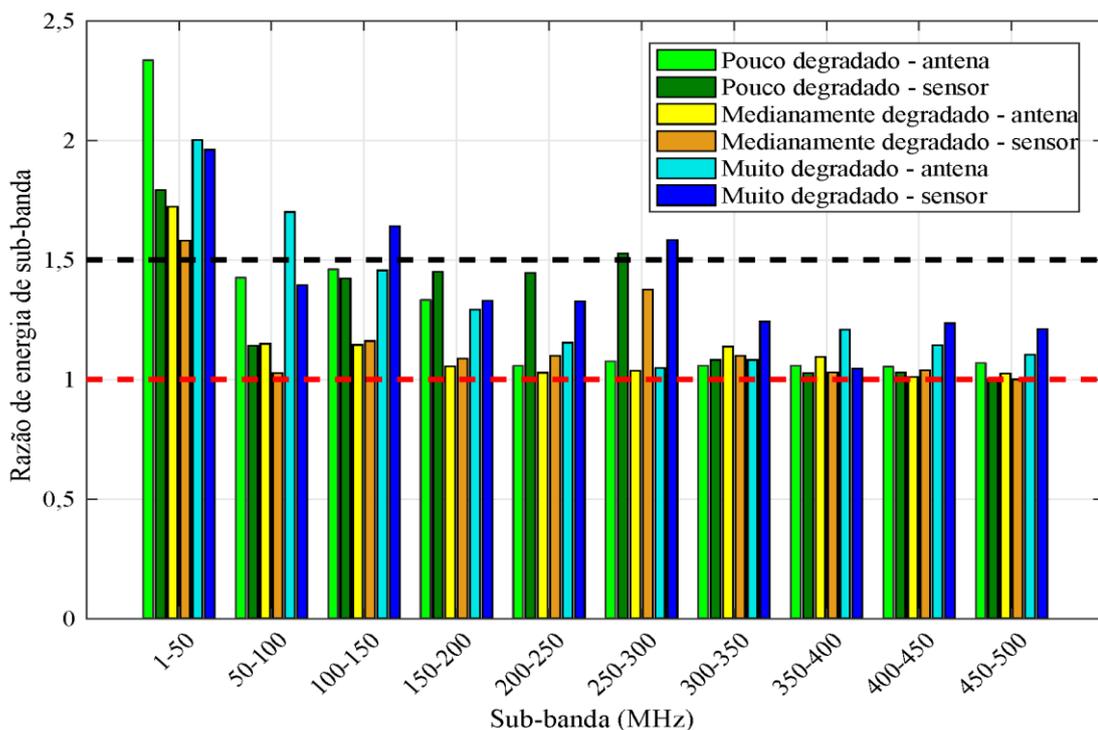
A partir dos resultados obtidos para o sensor S2, apresentados na Figura 5.5, verifica-se que na sub-banda 1 MHz - 50 MHz, independentemente do nível de degradação dos contatos, tanto a antena quanto o sensor foram capazes de detectar os sinais com valores de RS superiores ao limite estabelecido. Nas sub-bandas 50 MHz - 100 MHz, 150 MHz - 200 MHz e 200 MHz - 250 MHz, o sensor S2 continua a detectar sinais com valores de RS superiores ao limite para

todos os níveis de degradação de contato. Entretanto, a antena apresentou detecção apenas para o contato muito degradado na sub-banda 50 MHz - 100 MHz, o que representaria uma vantagem de detecção do sensor em relação à antena caso a informação de interesse estivesse localizada na faixa de frequência de 50 MHz a 250 MHz.

Ainda na Figura 5.5 (sensor *S2*), é possível constatar que houve detecção pelo sensor de sinais dos contatos pouco e muito degradados nas sub-bandas de 200 MHz - 250 MHz e dos contatos medianamente e muito degradados nas sub-bandas de 250 MHz - 300 MHz. Nas demais sub-bandas não houve captação de sinais por parte do sensor, enquanto que a antena foi capaz de detectar sinais dos contatos medianamente e pouco degradados nas sub-bandas de 100 MHz - 150 MHz e 350 MHz - 400 MHz, como também foi capaz de detectar sinais do contato medianamente degradado na sub-banda 300 MHz - 350 MHz. Portanto, a incapacidade do sensor de detectar sinais nas sub-bandas 100 MHz - 150 MHz, 300 MHz - 350 MHz e 350 MHz - 400 MHz representaria uma desvantagem em relação à antena, caso a informação de interesse estivesse localizada nas referidas faixas de frequência.

Quando comparado ao sensor *S1*, é possível concluir que o sensor *S2* possui melhor desempenho na detecção dos sinais de arco. Visto que além de detectar sinais provenientes de todos os contatos analisados em um maior número de sub-bandas, ele possui valores de *RS* maiores, devido ao seu maior ganho.

Figura 5.6 – Gráfico da Razão de Energia de Sub-banda do sensor *S3*.



Fonte: Autoria própria.

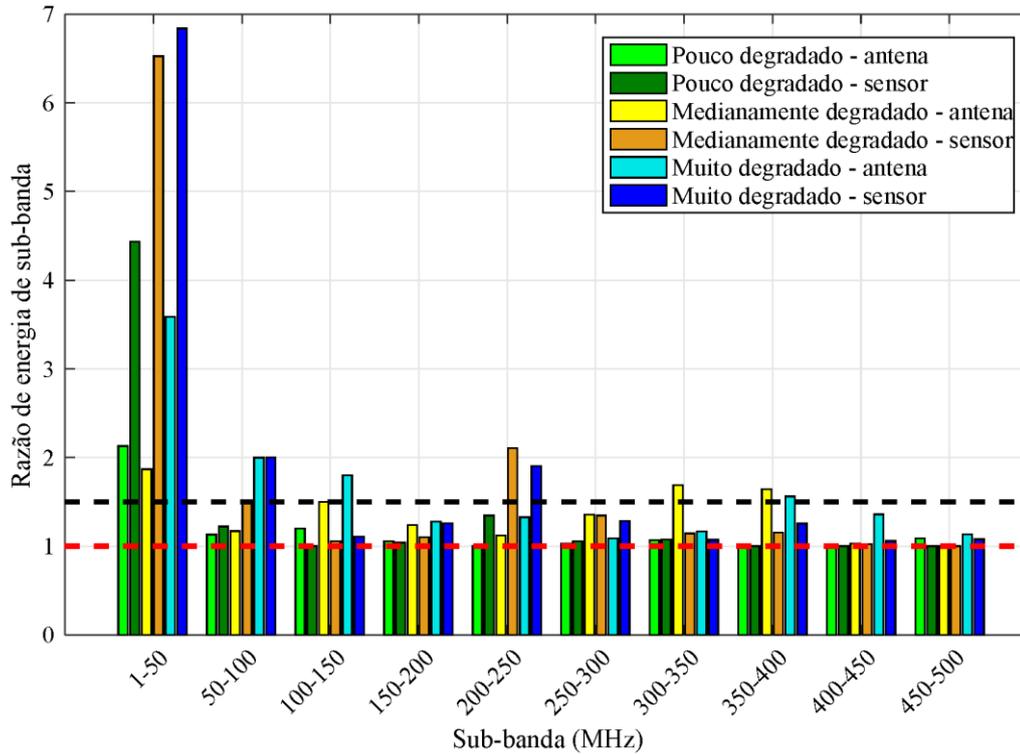
A partir dos resultados obtidos para o sensor *S3*, apresentados na Figura 5.6, constata-se que na sub-banda 1 MHz - 50 MHz, independentemente do nível de degradação dos contatos, tanto a antena quanto o sensor foram capazes de detectar os sinais com valores de *RS* superiores ao limite estabelecido. A contrário do que foi verificado nos resultados dos sensores *S1* e *S2*, o sensor *S3* não foi capaz de detectar em outras sub-bandas, sinais com valores de *RS* superiores ao limite para todos os níveis de degradação de contato. Todavia, é possível constatar que houve detecção pelo sensor de sinais dos contatos pouco e muito degradados na sub-banda 250 MHz - 300 MHz e do contato muito degradado na sub-banda de 100 MHz - 150 MHz, o que representaria uma vantagem de detecção do sensor em relação à antena, caso a informação de interesse estivesse localizada nas referidas sub-bandas. Nas demais sub-bandas não houve captação de sinais por parte do sensor, enquanto que a antena foi capaz de detectar sinais dos contatos medianamente e pouco degradados nas sub-bandas de 100 MHz - 150 MHz e 350 MHz - 400 MHz, como também foi capaz de detectar sinais do contato medianamente degradado na sub-banda 50 MHz - 100 MHz. Portanto, a incapacidade do sensor de detectar sinais nessa sub-banda representaria uma desvantagem de detecção em relação à antena, caso a informação de interesse estivesse localizada na referida faixa de frequência.

Quando comparado aos sensores *S1* e *S2*, é possível concluir que o sensor *S3* possui pior desempenho na detecção dos sinais de arco, tendo em vista que, além de detectar sinais provenientes de todos os contatos analisados em um menor número de sub-bandas, ele possui valores de *RS* menores, devido ao seu menor ganho.

Deste modo, é possível concluir que dentre os sensores analisados, o sensor *S2* é o que melhor se adequa para detectar os sinais dos arcos elétricos, de acordo com o método de avaliação empregado.

As análises do efeito da variação da geometria dos sensores, foram realizadas por meio da comparação, em cada sub-banda, das amplitudes dos parâmetros *RS* entre os sensores *S1* e *S4*, *S2* e *S5* e, por fim, entre os sensores *S3* e *S6*. Os gráficos do parâmetro *RS* dos sensores *S1*, *S2* e *S3* são mostrados nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, enquanto que os gráficos do parâmetro *RS* dos sensores *S4*, *S5* e *S6* são mostrados nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9, nas quais, as linhas tracejadas horizontais em vermelho e preto indicam respectivamente $RS = 1$ e $RS = 1,5$.

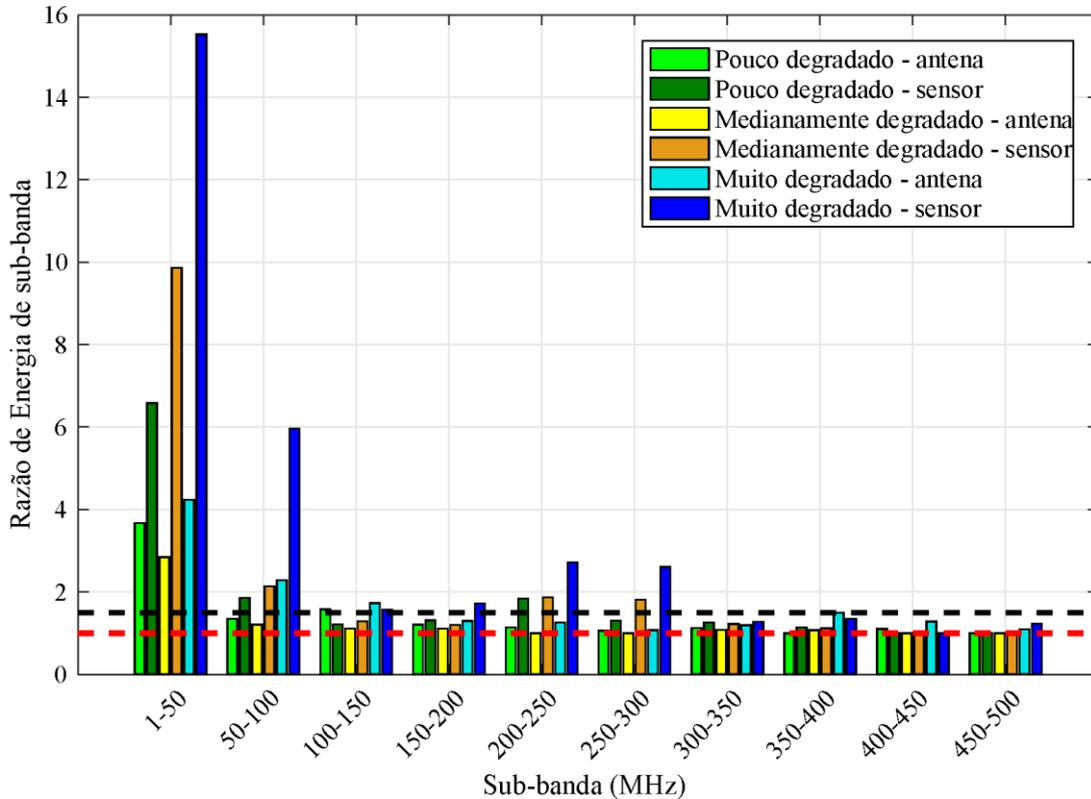
Figura 5.7 – Gráfico da Razão de Energia de Sub-banda do sensor *S4*.



Fonte: Autoria própria.

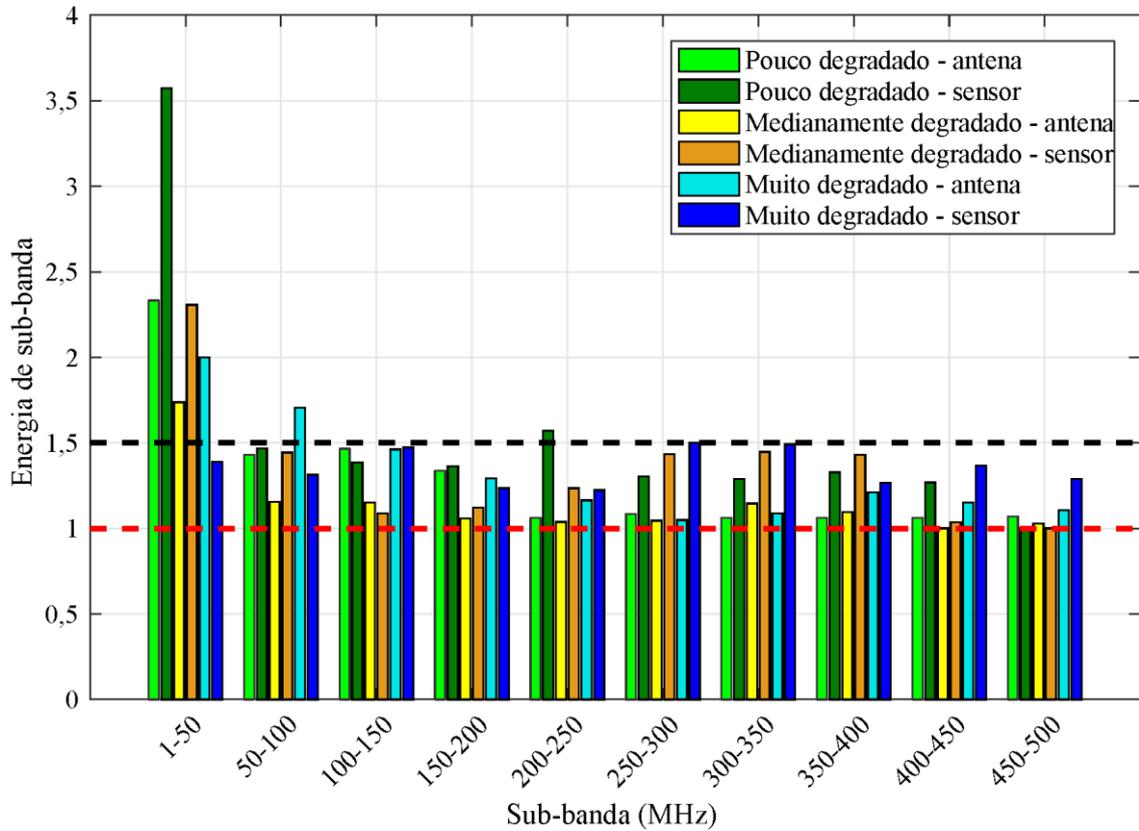
Quando os resultados do sensor *S4* (Figura 5.7) são comparados aos resultados do sensor *S1*, apresentado na Figura 5.4, constata-se que o aumento da largura do sensor provocou o aumento dos valores de *RS* na primeira sub-banda, o que se traduz na melhoria da sensibilidade de detecção dos sinais na referida sub-banda. Isto se deve à diminuição no valor da sua frequência de corte, que confere ao sensor a capacidade de detectar sinais de menor frequência. Contudo, nas demais sub-bandas, a detecção foi prejudicada, devido à redução no ganho do sensor, provocado pelo aumento da sua capacitância própria. Logo, é possível concluir que o aumento na largura do sensor *S1* torna-se vantajosa em situações nas quais os sinais de interesse encontrem-se em frequências inferiores à frequência de corte do sensor.

Figura 5.8 – Gráfico da Razão de Energia de Sub-banda do sensor S5.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise comparativa dos resultados do sensor S5 (Figura 5.8) com os resultados do sensor S2, apresentado na Figura 5.5, verifica-se que o aumento da largura do sensor provocou o aumento dos valores de RS na primeira sub-banda, o que se pode ser entendido como melhoria da sensibilidade de detecção dos sinais na referida sub-banda. Isto se deve à diminuição no valor da frequência de corte do sensor, que lhe confere a capacidade de detectar sinais de menor frequência. Contudo, nas demais sub-bandas, a detecção foi prejudicada devido à redução no ganho do sensor provocada pelo aumento da sua capacitância própria. Logo, é possível concluir que o aumento na largura do sensor S2 se torna vantajosa em situações nas quais os sinais de interesse se encontrem em frequências inferiores à frequência de corte do sensor.

Figura 5.9 – Gráfico da Razão de Energia de Sub-banda do sensor *S6*.

Fonte: Autoria própria.

Ao comparar os resultados do sensor *S6* (Figura 5.9) com os resultados do sensor *S3*, apresentado na Figura 5.6, verifica-se que o aumento da largura do sensor provocou o aumento dos valores de *RS* na primeira sub-banda, o que se pode ser entendido como melhoria da sensibilidade de detecção dos sinais na referida sub-banda. Isto se deve à diminuição no valor da frequência de corte do sensor, que lhe confere a capacidade de detectar sinais de menor frequência. Contudo, nas demais sub-bandas, a detecção foi prejudicada, devido à redução no ganho do sensor, provocado pelo aumento da sua capacitância própria. Logo, é possível concluir que o aumento na largura do sensor *S2* se torna vantajosa em situações nas quais os sinais de interesse se encontrem em frequências inferiores à frequência de corte do sensor.

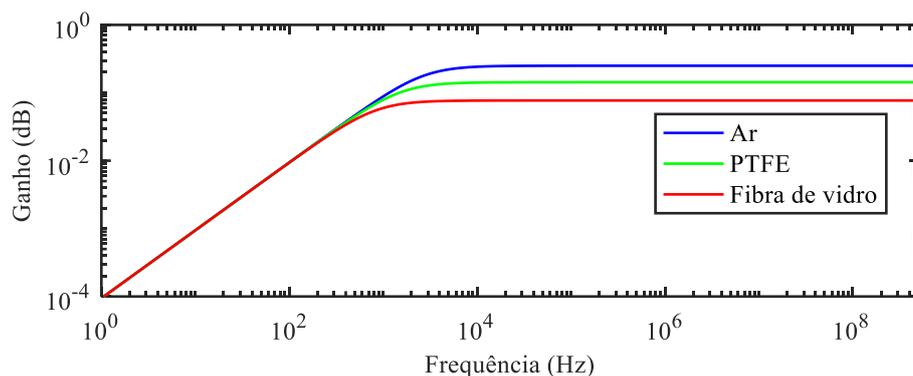
De modo geral, quando os resultados dos sensores *S4*, *S5* e *S6* são comparados aos resultados dos sensores *S1*, *S2* e *S3* em relação ao aumento de largura, verifica-se que as capacidades de detecção na primeira sub-banda nos resultados dos parâmetros *RS* são melhoradas em detrimento das demais sub-bandas. Isto se deve à diminuição das respectivas frequências de corte e dos ganhos dos sensores. De modo que a substituição dos sensores *S1*, *S2* e *S3* pelos sensores *S4*, *S5* e *S6* seria vantajosa em situações nas quais os sinais de interesse

estivessem localizados em frequências inferiores às frequências de corte dos respectivos sensores.

5.6 ANÁLISES DOS DIELÉTRICOS APLICADOS AOS SENSORES

Com o propósito de avaliar os sensores de acoplamento capacitivo quanto ao efeito da variação das suas constantes dielétricas, um dos sensores foi simulado em ambiente computacional tendo o seu dielétrico (substrato) modificado entre o ar, o PTFE e a fibra de vidro. O sensor *S2* foi selecionado para a simulação, visto que ele obteve o melhor resultado nas análises de capacidade de detecção. Na Figura 5.10 são mostradas as curvas de resposta em frequência para os três dielétricos simulados.

Figura 5.10 – Respostas em frequência para os dielétricos simulados.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise da Figura 5.10, tomando o ar como referência, é possível verificar que à medida que o valor da constante dielétrica é aumentado, o valor da frequência de corte do sensor diminui, o que representa vantagem para os sensores caso as frequências dos sinais de interesse sejam inferiores à frequência de corte original. Contudo, o aumento no valor da constante dielétrica também ocasiona redução no ganho dos sensores, o que pode prejudicar a detecção de sinais com amplitudes próximas à do ruído.

Portanto, é possível concluir que, ainda durante a fase de projeto dos sensores de acoplamento capacitivo, as características desejadas do ganho e da frequência de corte devem ser avaliadas conjuntamente no momento da escolha da constante dielétrica do substrato, uma vez que a melhoria de uma das referidas características implica na piora da outra.

Também foram investigados os efeitos mecânicos da modificação do tipo de material que compõe o dielétrico dos sensores. Para tanto, as vantagens e desvantagens observadas

durante a instalação e uso de sensores confeccionados com tipos diferentes de material de substrato foram comparadas. Dessa forma, foi constatado durante os ensaios de aquisição dos sinais que os sensores em fibra de vidro com substratos mais espessos (*S2* e *S5*) possuíam maior resistência à flexão, correndo o risco de se danificarem (rachar) no momento da instalação. A resistência à flexão se agravou com o aumento da largura dos sensores, ocasionando a quebra de dois sensores do tipo *S5*. Por outro lado, não foi constatada resistência à flexão suficiente para causar danos nos sensores produzidos em poliamida. Portanto, é possível concluir que o uso da poliamida apresenta vantagens mecânicas em relação à fibra de vidro como material empregado na fabricação dos sensores analisados nesta pesquisa.

5.7 ANÁLISES NO DOMÍNIO DO TEMPO

Com o objetivo de investigar a existência de correlação entre os sinais detectados pelos sensores de acoplamento capacitivo o estado de degradação dos contatos de arco, o sensor *S2* foi instalado na posição *P4*. Posteriormente, foram realizadas 25 aquisições de sinal para cada contato, de acordo com a metodologia descrita no item 4.2.6. Dos sinais adquiridos, foram obtidos valores da energia e do tempo de duração do arco elétrico. A partir da energia e do tempo de duração, foram calculados os atributos estatísticos de média, desvio padrão, curtose e mediana. Os atributos correspondentes à energia dos sinais encontram-se expostos na Tabela 5.4 e ilustrados sob a forma de gráficos nas Figuras A.1, A.2, A.3 e A.4 do Apêndice A. Na Tabela 5.5 são mostrados os atributos correspondentes à duração do sinal, eles também se encontram ilustrados sob a forma de gráfico no Apêndice, nas Figuras A.5, A.6, A.7 e A.8. Nas tabelas, os contatos se encontram organizados em ordem crescente de degradação, segundo os resultados obtidos no ensaio de MRD.

Tabela 5.4 – Atributos estatísticos da energia dos sinais detectados.

Atributo	C3	C1	C8	C2	C5	C4	C6	C9	C7
Média*	$7,64 \cdot 10^{-2}$	$6,23 \cdot 10^{-2}$	$1,38 \cdot 10^{-1}$	$8,98 \cdot 10^{-2}$	$2,01 \cdot 10^{-1}$	$2,34 \cdot 10^{-1}$	$2,03 \cdot 10^{-1}$	$1,67 \cdot 10^{-1}$	$5,40 \cdot 10^{-1}$
Desvio padrão*	$2,21 \cdot 10^{-2}$	$2,47 \cdot 10^{-2}$	$7,24 \cdot 10^{-2}$	$4,69 \cdot 10^{-2}$	$1,64 \cdot 10^{-1}$	$1,92 \cdot 10^{-1}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$1,20 \cdot 10^{-1}$	$3,08 \cdot 10^{-1}$
Curtose	0,249	0,195	0,249	0,239	0,278	0,214	0,321	0,333	0,344
Mediana*	$5,61 \cdot 10^{-2}$	$7,39 \cdot 10^{-2}$	$7,41 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-1}$	$1,21 \cdot 10^{-1}$	$2,28 \cdot 10^{-1}$	$5,62 \cdot 10^{-1}$	$1,19 \cdot 10^{-1}$	$1,42 \cdot 10^{-1}$

*Valores em p.u.

Fonte: Autoria própria.

A partir da análise dos valores dos atributos estatísticos obtidos a partir da energia dos sinais detectados (Tabela 5.4), é possível constatar que, com exceção dos contatos *C6* e *C9*, os

valores da média, desvio padrão e mediana tendem a aumentar de acordo com a degradação do contato. Essa tendência pode ser explicada segundo a teoria de Landry *et al.* (2006), na qual os autores afirmam que a degradação dos contatos de arco favorece reignições dos arcos elétricos e reduz a capacidade de interrupção de corrente do disjuntor. Portanto, a energia envolvida desde a ignição até a extinção dos arcos tende a ser proporcional à degradação dos contatos.

Ainda na Tabela 5.4, constata-se que contatos pouco e medianamente degradados possuem valores de curtose com característica leptocúrtica (curtose $< 0,263$), enquanto que os contatos classificados com degradação elevada apresentam valores de curtose com característica platicúrtica (curtose $> 0,263$). Esses resultados podem ser explicados pelo fato de que, em contatos novos, os arcos elétricos formam-se em regiões de relevo pouco acidentado na superfície do contato de arco, o que resulta em condições pouco variadas para a manutenção da estabilidade do arco elétrico, causando uma menor dispersão da curva de distribuição de probabilidades dos valores de energia.

Tabela 5.5 – Atributos estatísticos da duração dos sinais detectados.

Atributo	C3	C1	C8	C2	C5	C4	C6	C9	C7
Média (s)	$1,65 \cdot 10^{-4}$	$1,64 \cdot 10^{-4}$	$2,29 \cdot 10^{-4}$	$3,64 \cdot 10^{-4}$	$5,70 \cdot 10^{-4}$	$4,73 \cdot 10^{-4}$	$2,77 \cdot 10^{-4}$	$1,78 \cdot 10^{-4}$	$5,95 \cdot 10^{-4}$
Desvio padrão (s)	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$4,69 \cdot 10^{-6}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$	$1,92 \cdot 10^{-4}$	$1,64 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$3,08 \cdot 10^{-4}$	$7,24 \cdot 10^{-5}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$
Curtose	0,289	0,314	0,093	0,210	0,147	0,341	0,416	0,318	0,403
Mediana (s)	$1,62 \cdot 10^{-4}$	$1,65 \cdot 10^{-4}$	$1,95 \cdot 10^{-4}$	$3,46 \cdot 10^{-4}$	$4,74 \cdot 10^{-4}$	$4,24 \cdot 10^{-4}$	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-4}$	$6,12 \cdot 10^{-4}$

Fonte: Autoria própria.

A partir da análise dos valores dos atributos estatísticos obtidos a partir da duração dos sinais detectados (Tabela 5.5), é possível constatar que os contatos com média degradação exibem valores superiores de média, desvio padrão e mediana, quando comparados com os contatos pouco e muito degradados, tendo o contato C7 como exceção. Dessa forma, os resultados não são proporcionais à degradação dos respectivos contatos. Estes resultados não podem ser explicados pela hipótese apresentada por Landry *et al.* (2006), tendo em vista que, com as reignições de arco facilitadas pela degradação, era esperado que os valores dos referidos atributos de duração dos sinais tendessem a ser proporcionais à degradação dos contatos.

Quanto à curtose, os resultados mostrados na Tabela 5.5 tendem a apresentar valores com característica leptocúrtica para contatos medianamente degradados, tendo o contato C4 como exceção e, platicúrtica para as demais classes. Pode ser observado que os valores de curtose referentes à duração do arco elétrico não constituem uma tendência em relação ao nível de degradação dos contatos de arco, como foi observado na análise da energia do sinal. Uma

das causas deste resultado pode ser atribuída à quantidade limitada de amostras de contato disponíveis.

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos e suas respectivas análises. No capítulo seguinte serão apresentadas as conclusões deste trabalho.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, uma análise da aplicabilidade de sensores de acoplamento capacitivo na detecção de sinais eletromagnéticos emitidos por arcos elétricos foi feita. Os arcos elétricos eram provenientes do processo de abertura de disjuntores de média tensão. Para tanto, os sensores foram projetados, construídos e testados em laboratório.

O projeto dos sensores de acordo com as recomendações encontradas da literatura estudada resultou em sensores no formato de fita flexível. Esse formato facilitou a instalação dos sensores nos polos dos disjuntores. Na etapa de construção, os diferentes materiais empregados aos sensores possibilitaram as avaliações dos efeitos da variação no valor da constante dielétrica e da flexibilidade dos sensores. Nos testes, também foi observado que a posição de instalação interfere na capacidade de detecção dos sensores, o que foi evidenciado nas análises de posicionamento.

Adicionalmente aos testes dos sensores, os resultados evidenciaram a correlação entre os sinais detectados e a degradação dos contatos de arco. A correlação foi avaliada por meio da aplicação da técnica de estatística descritiva aos sinais detectados, sendo considerada uma técnica promissora para uma futura classificação do nível de degradação dos contatos de arco, por meio dos sinais detectados.

Considerando que os processos de projeto, construção, testes e correlação foram realizados e aplicabilidade de sensores de acoplamento capacitivo no monitoramento de disjuntores de alta tensão foi comprovada experimentalmente, conclui-se que o objetivo geral do trabalho foi alcançado.

Ademais, a pesquisa também permitiu que as seguintes conclusões fossem obtidas:

- A sensibilidade de detecção dos sensores depende da posição na qual foram instalados ao longo do polo analisado. E que no caso dos disjuntores utilizados neste trabalho, a melhor posição para a instalação dos sensores foi próximo do terminal inferior do polo do disjuntor (ver itens 4.2.3 e 5.3).
- Os sensores analisados são capazes de detectar os sinais provenientes de arcos elétricos em disjuntores. Todavia, a capacidade de detecção de um determinado sensor depende das suas capacitâncias própria e de acoplamento. Os resultados evidenciam que a capacitância própria afeta principalmente a frequência de corte

do sensor, enquanto que a capacitância de acoplamento afeta principalmente o ganho.

- O tipo de material empregado na confecção dos sensores, deve ter as características da flexibilidade e da constante dielétrica avaliadas. Os sensores pouco flexíveis podem sofrer danos ao serem instalados no polo do disjuntor e, constantes dielétricas elevadas podem reduzir os ganhos.
- A correlação entre os sinais de arco elétrico detectados pelos sensores e o nível de degradação foi evidenciada, por meio da análise dos atributos estatísticos de média, desvio padrão, curtose e mediana da energia dos sinais detectados.

TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos nesta dissertação evidenciaram que os sensores de acoplamento capacitivo representam alternativa viável para a detecção dos sinais emitidos por arcos elétricos em disjuntores. Também foram evidenciados indícios de correlação entre os sinais detectados e a degradação dos contatos de arco estimada por meio da MRD. Portanto, as seguintes atividades são sugeridas como continuação às pesquisas:

- Investigar, utilizando técnicas de demodulação em amplitude, a possibilidade de correlação entre os sinais captados e a degradação dos contatos de arco;
- Estabelecer correlação entre a degradação dos contatos de arco e os sinais detectados pelos sensores;
- Avaliar o desempenho dos sensores de acoplamento capacitivo frente à aplicação de correntes alternadas no polo sob análise;
- Estudar o efeito da variação no valor da corrente de teste nos sinais detectados;
- Realizar simulações computacionais com o objetivo de estudar a aplicação dos sensores de acoplamento capacitivo em disjuntores submetidos às tensões nominais de operação;
- Identificar frequências ou faixas de frequências nas quais seja possível extrair informação sobre a degradação dos contatos de arco;
- Estudar a aplicação de Redes Neurais Artificiais para a classificação da degradação dos contatos de arco com base nos atributos estatísticos extraídos dos sinais de arco elétrico;
- Estudar a aplicação de Lógica *Fuzzy* para a classificação da degradação dos contatos de arco, com base nos atributos estatísticos extraídos dos sinais de arco elétrico;
- Desenvolver sistema de auxílio à tomada de decisão, com o objetivo de otimizar a estimação do momento da retirada de operação do disjuntor para manutenção/substituição dos contatos, com base nos sinais emitidos pelos arcos elétricos;
- Desenvolver sistema portátil destinado à coleta e processamento dos sinais emitidos pelos arcos elétricos.

PUBLICAÇÕES

Durante a realização desta dissertação, artigos científicos foram publicados ou aceitos para publicação. Eles estão direta ou indiretamente relacionados ao tema da dissertação e são apresentados a seguir em ordem cronológica.

Publicados:

- **Santana, H. N. et al.** Revisão dos Métodos de Diagnóstico de Disjuntores Utilizando a Medição de Resistência Dinâmica de Contato. 5º Encontro do Grupo de Sistemas Elétricos, Campina Grande – PB. 2016.
- Oliveira, A. C.; **Santana, H. N. et al.** Monitoramento *online* e diagnóstico de disjuntores de alta tensão a partir do sinal eletromagnético irradiado. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Natal – RN. 2016.
- Oliveira, R. G. D.; **Santana, H. N. et al.** Influência de partículas sólidas contaminantes no campo elétrico em óleo isolante. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Natal – RN. 2016.

Aceitos para publicação:

Santana, H. N. et al. Capacitive coupling sensor application for monitoring and diagnosis of high voltage circuit breakers. 20th International Symposium on High Voltage Engineering. Buenos Aires, Argentina. 2017.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). ANEEL. **Resolução Normativa N° 729**, 28 Junho de 2016.
- ANSI/IEEE. STD C37.09. **Test procedure for ac high-voltage circuit breakers**, 1999.
- BANSAL, R. The Far-Field: How Far is Far Enough? **Applied Microwave & Wireless**, Novembro 1999.
- BARTLETT, E. J.; MOORE, P. J. Analysis of power system transient induced radiation for substation plant condition monitoring. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, May 2001.
- BHEL. **Handbook of switchgears**. New York: McGraw-Hill, 2006.
- BOSMA, A.; THOMAS, R. Condition Monitoring and Maintenance Strategies for High-voltage Circuit-breakers. **Advances in Power System Control, Operation and Management, Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 497)**, Hong Kong, 2003.
- CARVALHO, A. C. C.; PUENTE, A. P.; FUCHS, A.; PORTELA, C. M. **Disjuntores e Chaves - Aplicação em Sistemas de Potência**. Niterói: Editora da Universidade Federal Fluminense (EDUFF), 1995.
- CHAPMAN, M. Radio-frequency based determination of arcing duration in hvac circuit breakers. **CIREN - 18th International Conference on Electricity Distribution**, Turin, June 2005.
- CHAPMAN, M. A. **Possibilities and Limitations of Radio-frequency Measurement of Arc Duration in HVAC Circuit Breakers**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). ETH Zurich. Zurich. 2011.
- CHUDNOVSKY, B. H. **Electrical Power Transmission and Distribution - Aging and Life Extension Techniques**. New York: CRC Press, 2012.
- CORREA, S. M. B. B. **Probabilidade e estatística**. 2ª. ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003.
- FERREIRA, T. V. **Estimação Inteligente da Poluição de Isolamentos Elétricos Baseada nos VECSE do Ruído Ultrassônico**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2011.
- FLURSCHEIM, C. H. **Power circuit breaker theory and design. V. 1**. London: The Institution of Engineering and Technology, 2008.
- FOUNDATION, W. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2017. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Switchgear>>. Acesso em: 10 Junho 2017.
- FRONTIM, S. D. O. **Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. Brasília: Teixeira, 2013.
- FURLONG, S. A.; JONES, G. R.; KONG, M. G.; LEWIS, R. G. Electromagnetic radiation from a circuit breaking action. **IEEE International Conference on Plasma Science**, Raleigh, USA, 1998. pp. 199.

GARZON, R. D. High voltage circuit breakers: Design and applications. **CRC Press**, New York, 2002.

GILL, P. **Electrical Power Equipment Maintenance and Testing**. New York: CRC Press, 2008.

IEC. IEC std 62271-100. **High-voltage switchgear and controlgear gear**, 2001.

IEEE. IEEE Standard Test Procedure for Ac High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis Corrigendum 1. **Std C37.09-1999/Cor 1-2007**, 2007.

JIA-MIN, H.; XING-MING, F.; XIN, Z.; ZHI-CHAO, H.; QI-TAO, Z.; CONG, L.; WEI-JIAN, S. VCB Contact System Electrical Endurance On-line Condition Monitoring Technology and Its Application. **25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)**, Tomsk, 2012. 136-516.

LANDRY, M.; MERCIER, A.; OUELLET, G.; RAJOTTE, C.; CARON, J.; ROY, M.; BRIKCI, F. Dynamic Contact Resistance of HV Circuit Breakers. **2005/2006 PES TD**, p. 1002-1009, 2006.

LI, C.; XIA, Q.; ZHAO, Z.; YAO, C.; MI, Y.; ZHAO, X.; WANG, J. Impact analysis of the capacitive coupling sensor on bushing external insulation. **IET Generation, Transmission & Distribution**, vol. 10, no. 14, London, 2016. 3663-3670.

LOPEZ-ROLDAN, J.; BIRTWHISTLE, D.; BLUNDELL, M.; TANG, T. A Noninvasive Method for Detecting Restriking: Application to the Switching of HV Shunt Reactors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, April 2012.

MEIER, S. D.; MOORE, P. J.; COVENTRY, P. F. Radiometric Timing of High-Voltage Circuit-Breaker Opening Operations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, July 2011. 1411-1417.

MILASCH, M. **Manutenção de disjuntores de alta tensão**. Rio de Janeiro: Cervantes Ed., 1993.

MOORE, P. J. Radiometric measurement of circuit breaker interpole switching times. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2004. 987-982.

MUSTAFA, T. I.; PITZ, C. A.; ALMAGUER, H. D.; THOMAS, D. W. P.; SANTOS, J. V.; FLORES, F. T.; CEREJA, J. E.; PUCHALE, L. H. An analysis of the performance of 245 KV circuit breakers applying the radiometric monitoring and the wavelet transform. **2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility**, Gothenburg, 2014.

NASRALLAH, E.; BRIKCI, F.; PERRON, S. Electrical contacts in MV & HV power circuit breakers. **Electric Energy T&D Magazine**, p. 50-55, Jan-Fev 2007.

OHLEN, M.; DUECK, B.; WERNLI, H. Dynamic resistance measurements - A tool for circuit breaker diagnostics. **Stockholm Power Tech International Symposium on Electric Power Engineering**, 1995.

OLIVEIRA, A. C. **Ensaio de Resistência Dinâmica em Disjuntores: Análise De Sensibilidade da Corrente E da Velocidade de Abertura dos Contatos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2015.

OLIVEIRA, A. C.; SANTANA, H. N.; SOUZA, R. T.; COSTA, E. G. Monitoramento Online e Diagnóstico de Disjuntores de Alta Tensão a Partir do Sinal Eletromagnético Irradiado. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Natal - RN, 2016.

OPPENHEIM, A. V.; WILLISKY, A. S.; NAWAB, S. H. **Signals and systems**. 2^a. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, v. 1, 1996.

PINNEKAMP, F. The circuit breaker, a showcase of industrial product development. **ABB Review**, 2007. 71-75.

PORTUGUES, I.; MOORE, P. J.; GLOVER, I. A. Characterisation of radio frequency interference from high voltage electricity supply equipment. **Antennas and Propagation, Twelfth International Conference on (Conf. Publ. No. 491)**, 2003. 820-823 vol.2.

QUELEMES, P. V. **Análise da sensibilidade de acopladores direcionais microstrip na medição de descargas parciais em uma bobina de hidrogerador**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2016.

RAMLI, S.; BIRTWISTLE, D.; LOPEZ-ROLDAN, J.; TANG, T. EHV Circuit breaker condition monitoring using antenna-based coupling methods. **Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008. International Conference on**, Beijing, 2008.

REIS, E. **Estatística Descritiva**. 7^a. ed. Lisboa: Silabo, 2008.

SEBASTIAN, M. T.; UBIC, R.; JANTUNEN, H. **Microwave Materials and Applications**. 1^a. ed. Manhattan: Wiley, v. I e II, 2017.

SIEMENS. **3AC Circuit Breaker (15kV) Application Guide**. Siemens Power Transmission & Distribution, Inc. Richland. 1986.

SILVA, S. E. L. Falha Humana em Operação e Manutenção de Subestações. **Congresso Brasileiro de Manutenção**, Belo Horizonte, Agosto 2005.

SOUZA, R. T. DE; ARAÚJO, J. F. DE; COSTA, E. G. DA; MACÊDO, E. C. T. DE. A system for dynamic contact resistance with Arduino platform on MV and HV circuit breaker. **IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings**, Montevideo, 2014. 369-373.

TANAE, H.; MATSUZAKA, E.; NISHIDA, I.; MATORI, I.; TSUKUSHI, M.; HIRASAWA, K. High-frequency reignition current and its influence on electrical durability of circuit breakers associated with shunt-reactor current switching. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 19, no. 3. 1105-1111.

TEPPER, J.; SEEGER, M.; VOTTELER, T.; BEHRENS, V.; HONIG, T. Investigation on Erosion of Cu/W Contacts in High-Voltage Circuit Breakers. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, 2006. 658-665.

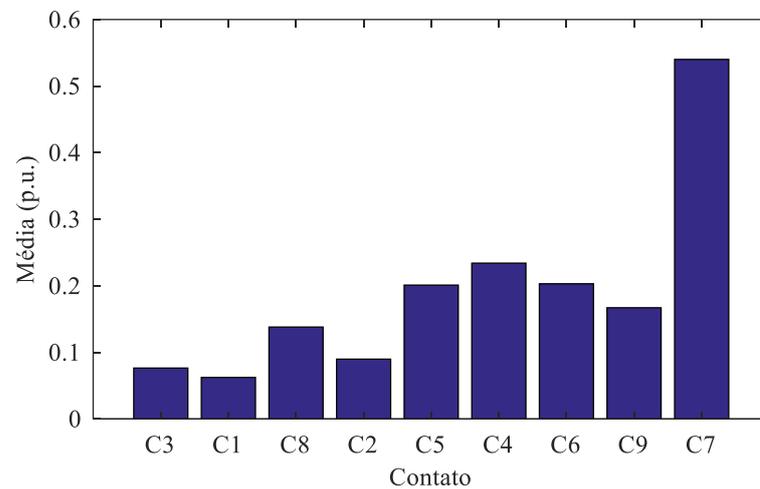
TRAJANO, R. S. **Diagnóstico de Contatos de Disjuntores Baseado na Resistência Dinâmica de Contato e Lógica Fuzzy**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2015.

TROCHIM, W. M.; DONNELLY, J. P. **Research Methods - The Essential Knowledge Base**. 2^a. ed. Boston: Cengage Learning, 2015.

APÊNDICE A – GRÁFICOS REFERENTES AOS RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS

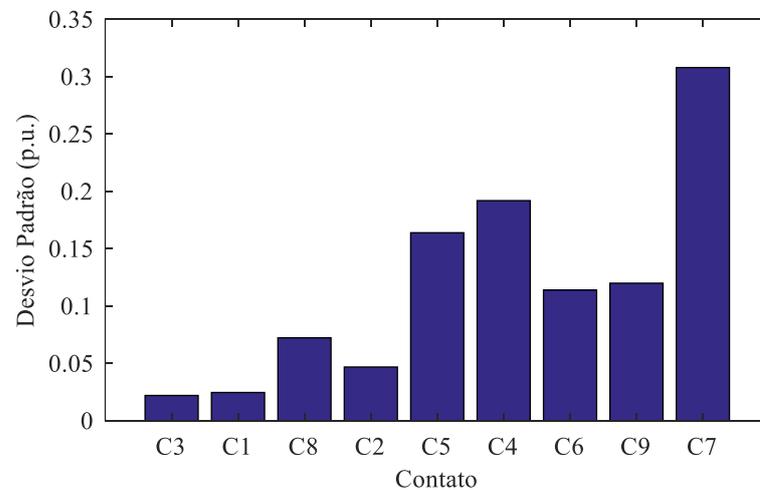
Os gráficos apresentados neste apêndice são referentes aos dados contidos na Tabela 5.4 e na Tabela 5.5. Nos gráficos, os contatos foram ordenados de acordo com os níveis de degradação obtidos por meio da MRD. Especificamente nos gráficos de curtose, as linhas tracejadas em vermelho indicam o valor de 0,263.

Figura A.1 – Média da energia dos sinais detectados.



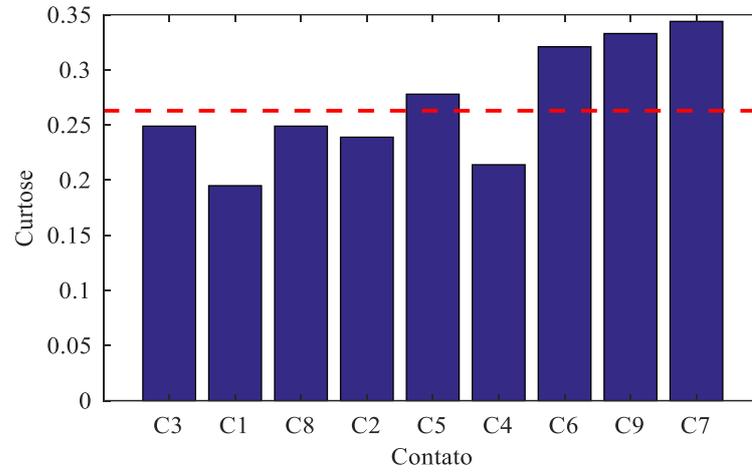
Fonte: Autoria própria.

Figura A.2 – Desvio padrão da energia dos sinais detectados.



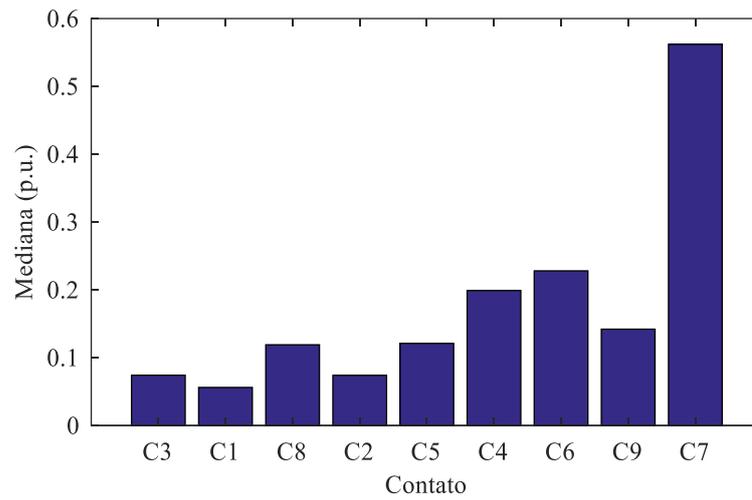
Fonte: Autoria própria.

Figura A.3 – Curtose da energia dos sinais detectados. Tracejado em vermelho indica o valor de curtose mesocúrtica (0,263).



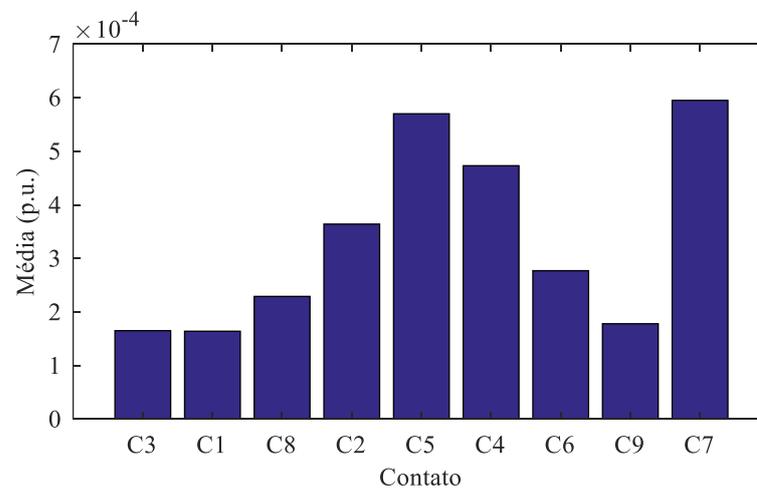
Fonte: Autoria própria.

Figura A.4 – Mediana da energia dos sinais detectados.



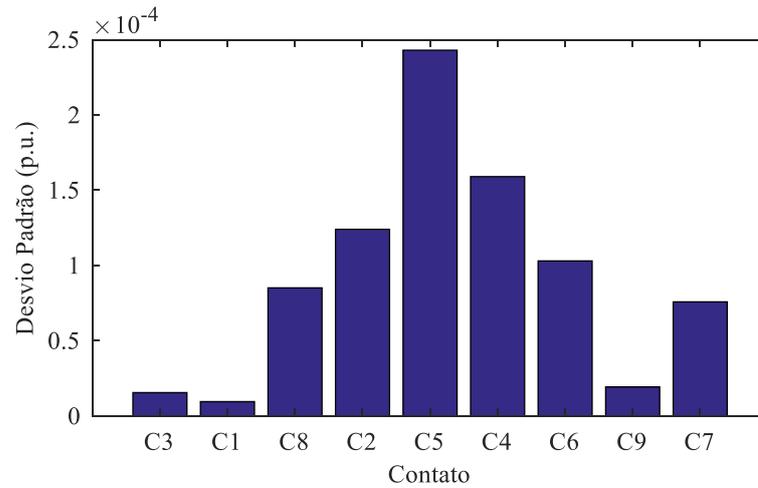
Fonte: Autoria própria.

Figura A.5 – Média da duração dos sinais detectados.



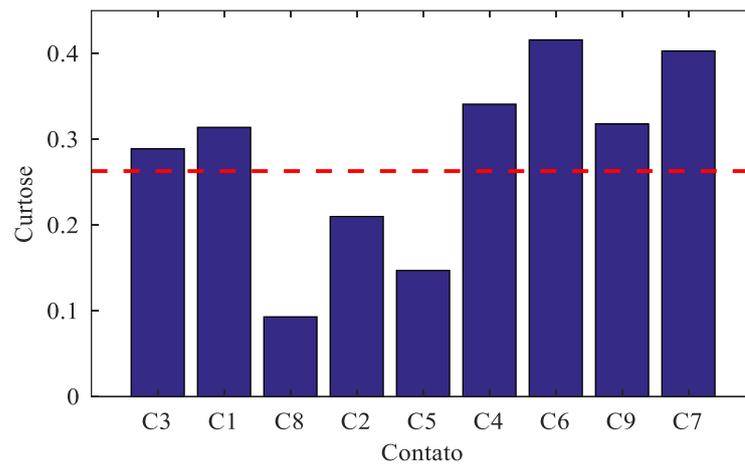
Fonte: Autoria própria.

Figura A.6 – Desvio padrão da duração dos sinais detectados.



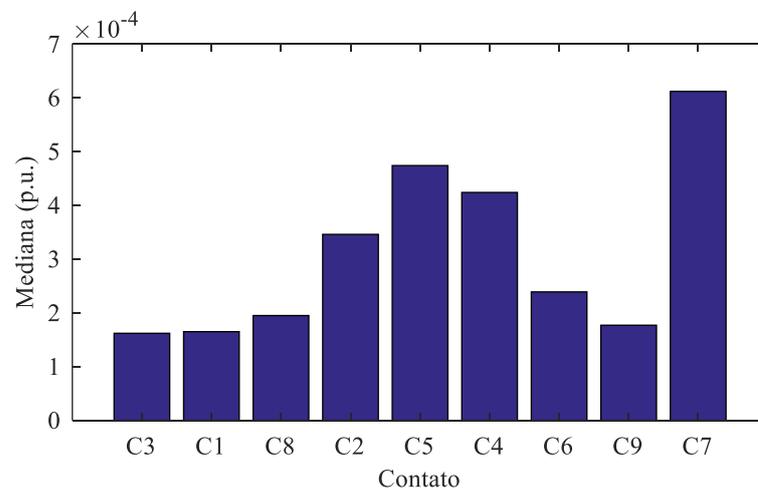
Fonte: Autoria própria.

Figura A.7 – Curtose da duração dos sinais detectados. Tracejado em vermelho indica o valor de curtose mesocúrtica (0,263).



Fonte: Autoria própria.

Figura A.8 – Mediana da duração dos sinais detectados.



Fonte: Autoria própria.