



Universidade Federal  
de Campina Grande

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

ADRIANO COSTA DE OLIVEIRA

# MÉTODO DE MONITORAMENTO RADIOMÉTRICO PARA DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

Campina Grande, Paraíba.  
Agosto de 2019

MÉTODO DE MONITORAMENTO RADIOMÉTRICO PARA DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

*Tese de Doutorado submetida à Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências do Programa de Doutorado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

---

Adriano Costa de Oliveira  
Orientando

---

Edson Guedes da Costa, D. Sc.  
Orientador

---

Alexandre Jean René Serres, D. Sc.  
Orientador

Campina Grande, Paraíba.  
Agosto de 2019

O48m      Oliveira, Adriano Costa de.  
             Método de monitoramento radiométrico para disjuntores de  
             alta tensão / Adriano Costa de Oliveira. – Campina Grande, 2019.  
             129 f. : il. color.

             Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade  
             Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e  
             Informática, 2019.  
             "Orientação: Prof. Dr. Edson Gomes da Costa, Alexandre Jean  
             René Serres".  
             Referências.

             1. Análise Boxplot. 2. Antena Monopolo Impressa. 3.  
             Diagnóstico. 4. Disjuntor. 5. Geometria Bioinspirada. 6.  
             Monitoramento. 7. Radiometria. I. Costa, Edson Gomes da. II.  
             Serres, Alexandre Jean René. Título.

CDU 621.316.57(043)

**MÉTODO DE MONITORAMENTO RADIOMÉTRICO PARA DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO**

**ADRIANO COSTA DE OLIVEIRA**

**TESE APROVADA EM 24/09/2019**



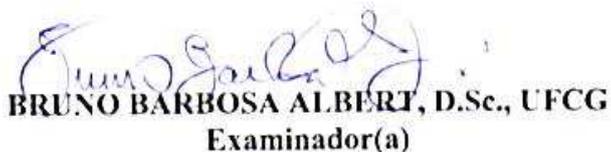
**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG**  
Orientador(a)



**ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, Dr., UFCG**  
Orientador(a)



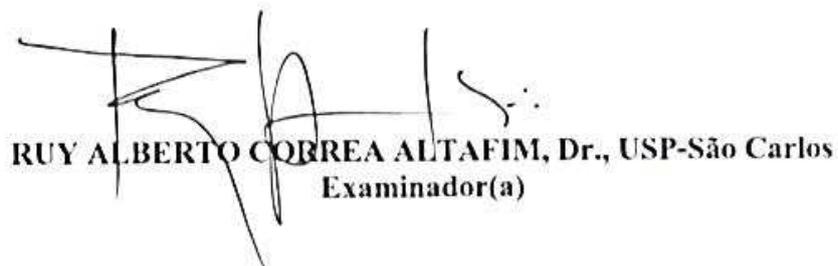
**WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG**  
Examinador(a)



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



**ESTÁCIO TAVARES WANDERLEY NETO, Dr., UNIFEI**  
Examinador(a)



**RUY ALBERTO CORREA ALTAFIM, Dr., USP-São Carlos**  
Examinador(a)

**CAMPINA GRANDE - PB**

Dedico este trabalho à minha mãe,  
Miriam, meu pai, Alciônio, e meu  
irmão, Angelo.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Miriam, por minha vida, por todo o amor, pelos abraços, pelos sorrisos, pela dedicação, pelos conselhos. Por ter sido a pessoa que mais admirei. Por ter feito de tudo para me tornar feliz. Por ter sido a melhor mãe que eu poderia desejar e que tanto amei.

Agradeço ao meu pai, Alciônio, pelo o amor e apoio me dado durante toda a minha vida. Por sempre estar ao meu lado. Por me servir de exemplo no qual me inspiro todos os dias. Por todo o carinho e dedicação que moldaram como pessoa.

Agradeço ao meu irmão, Angelo, por ser meu melhor amigo. Pelos momentos de descontração. Por tudo que já passamos juntos. Por se alguém em que sempre posso contar. Por ter me dado força nos momentos mais difíceis.

Agradeço a todos os meus familiares, que, mesmo com tão pouco tempo juntos, me proporcionaram tantos momentos de alegria.

Agradeço a minha família postiça de Campina Grande por todos os encontros maravilhosos, pelo companheirismo, pelas brincadeiras, pela eterna e verdadeira amizade, em especial os meus irmãos da vida: Rodrigo, Izabela e Daniel.

Agradeço pela inesperada surpresa que encontrei na porta ao lado a 7 anos, fonte de tantos aperseios, mas de incontáveis momentos felizes e inesquecíveis, Mayara.

Agradeço aos amigos de graduação e pós-graduação que participaram do grupo de disjuntores. Por todas as contribuições, fundamentais para a realização deste trabalho.

Agradeço aos professores Edson Guedes e Alexandre Serres, pela orientação, compreensão, compromisso, paciência e exemplo, nos quais eu me inspiro.

Agradeço a todos os amigos da vida e aos colegas, técnicos e funcionários do Laboratório de Alta Tensão (LAT), por todo o apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à CHESF, em especial ao engenheiro Vladimir, pela colaboração com o desenvolvimento desta pesquisa e pelos conhecimentos compartilhados.

Agradeço à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (COPELE), a todo o Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UFCG e à CAPES.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”.

(John F. Kennedy).

# RESUMO

As técnicas de monitoramento e diagnóstico de disjuntores atualmente empregadas pelas concessionárias de energia possuem algumas limitações técnicas, tais como seu caráter invasivo, a baixa confiabilidade e a dificuldade de aplicação. Segundo dados estatísticos, os disjuntores são um dos equipamentos que mais apresentam falhas em sistemas de transmissão/distribuição. Sendo assim, nesta pesquisa é apresentado um novo método de monitoramento radiométrico para disjuntores de alta tensão, baseado em rotinas computacionais e no uso de antenas monopolo impressas com geometria bioinspirada. A técnica facilita o procedimento de monitoramento, além de torná-lo mais eficiente. A metodologia proposta é baseada na medição de sinais eletromagnéticos irradiados pelo disjuntor durante as operações de interrupção de corrente, em técnicas estatísticas, tais como a análise *boxplot*, e um algoritmo classificador para o processamento dos dados e tomadas de decisão. Para o desenvolvimento do sistema de medição, um amplo estudo foi realizado com o objetivo de analisar as características espectrais dos sinais irradiados por disjuntores, possibilitando o projeto de sensores otimizados para esta aplicação. Antenas monopolo impressas foram projetadas, fabricadas e testadas, utilizando técnicas de otimização de ganho e largura de banda, além de técnicas de miniaturização, tornando-as aplicáveis ao monitoramento de diferentes tipos de disjuntores. Os experimentos realizados geraram resultados promissores, possibilitando a detecção de diferentes tipos de falha, como altos níveis de degradação dos contatos, falhas mecânicas no sistema de acionamento, perda das características dielétricas do meio extintor e falhas mecânicas nos contatos. Em laboratório, comparações com o diagnóstico fornecido por técnicas de referência apontaram uma concordância de 100% em relação ao grau de degradação dos contatos. Experimentos em campo foram realizados em um disjuntor a SF<sub>6</sub> destinado ao chaveamento de um reator de 33 MVAr, atestando a aplicabilidade da técnica.

**Palavras-chave:** Análise *boxplot*; Antena monopolo impressa; Diagnóstico; Disjuntor; Geometria bioinspirada; Monitoramento; Radiometria.

# ABSTRACT

The techniques used to monitor and diagnose circuit breakers currently used by electric companies have some technical limitations, such as an invasive nature, low reliability and difficulty of application. According to statistical data, circuit breakers are one of the faultiest equipment in transmission/distribution systems. Hence, in this research is presented a new radiometric monitoring method for high voltage circuit breakers based on computational routines and the use of printed monopole antennas with bioinspired geometry. The method facilitates the monitoring process and makes it more efficient. The proposed methodology is based on the measurement of electromagnetic signals radiated by the circuit breaker during current interruption operations, in statistical techniques such as boxplot analysis, and a classifier algorithm for data processing and decision making. For the development of the measurement system a broad research was carried out to analyze the spectral characteristics of the signals radiated by circuit breakers, enabling the design of optimized sensors for this application. Printed monopole antennas were designed, manufactured and tested using gain and bandwidth optimization techniques as well as miniaturization techniques, making them suitable for the monitoring of different types of circuit breakers. The carried out experiments generated promising results, allowing the detection of different types of failure, such as high level of contact degradation, mechanical failures in the actuating system, loss of the dielectric characteristics of the extinguishing medium and mechanical failure in the contacts. In laboratory, comparisons with the diagnosis provided by reference techniques indicated a 100% agreement regarding the level of contact degradation. Field experiments were performed on an SF<sub>6</sub> circuit breaker used for the switching of a 33 MVAr reactor, attesting the applicability of the technique.

**Keywords:** Boxplot analysis; Bioinspired geometry; Circuit breaker; Diagnosis; Monitoring; Printed monopole antenna; Radiometry.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Ilustração de um disjuntor tipo PVO. ....	24
Figura 2: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor PVO e das etapas de extinção de arcos elétricos. ....	27
Figura 3: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a vácuo. ....	28
Figura 4: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a SF <sub>6</sub> e das etapas de extinção de arcos elétricos. ....	30
Figura 5: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a ar comprimido. ....	31
Figura 6: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a sopro magnético e das etapas de extinção de arcos elétricos. ....	32
Figura 7: Contatos fixo e móveis de um disjuntor PVO. CA – contato de arco; CP – contato principal. ...	33
Figura 8: Ilustração de um esquema de medição da resistência estática de contato com um micro-ohmímetro. ....	39
Figura 9: Curva típica de resistência dinâmica. ....	40
Figura 10: Padrões de irradiação. (a) padrão de campo em escala linear; (b) padrão de potência em escala linear; (c) padrão de potência em escala logarítmica. ....	43
Figura 11: Lóbulos de irradiação. ....	44
Figura 12: Gráfico linear do padrão de potência. ....	45
Figura 13: Estrutura geral de uma PMA. ....	49
Figura 14: Formatos de <i>patch</i> . (a) quadrado; (b) circular; (c) retangular; (d) triangular; (e) elíptico; (f) dipolo. ....	49
Figura 15: Técnicas de alimentação. (a) linha de microfita; (b) sonda coaxial; (c) acoplamento por abertura; (d) acoplamento por proximidade. ....	50
Figura 16: Ilustração de uma PMA retangular. ....	51
Figura 17: Ilustração do efeito franja. (a) visão superior; (b) visão lateral. ....	52
Figura 18: PMA retangular com plano de terra truncado e casador de impedância tipo cone. ....	54
Figura 19: Ilustração de uma PMA com alimentação por linha de microfita e reentrância. ....	55
Figura 20: Representação típica de um gráfico <i>boxplot</i> . ....	58
Figura 21: Diagrama de blocos representativo da metodologia proposta. ....	70
Figura 22: Arranjo experimental. (1) Disjuntor PVO; (2) Bateria estacionária; (3) Osciloscópio digital; (4) Resistores de Cr-Al-Fe; (5) <i>Shunt</i> ; (6) Transdutor. ....	71
Figura 23: Ilustração do arranjo experimental. (1) Disjuntor PVO; (2) Bateria estacionária; (3) Osciloscópio digital; (4) Resistores de Cr-Al-Fe; (5) <i>Shunt</i> ; (6) Transdutor. ....	72
Figura 24: Amostras de contatos com diferentes níveis de degradação. ....	73
Figura 25: Antena direcional log-periódica. ....	74
Figura 26: Analisador de rede. ....	76
Figura 27: Arranjo experimental para medição do AF em uma câmara anecoica. ....	77
Figura 28: Folha da <i>Acer Macrophyllum</i> . ....	78
Figura 29: Fractal de Minkowski de níveis $k = 0, 1, 2$ e $3$ . ....	79
Figura 30: Densidade de corrente na antena B1. ....	80
Figura 31: Coeficiente de reflexão da antena B1. ....	81
Figura 32: Densidade de corrente na antena B2. ....	81
Figura 33: Coeficiente de reflexão da antena B2. ....	82
Figura 34: Curva de resistência dinâmica com indicação da região de transição. ....	85
Figura 35: Curvas de resistência dinâmica. C5 – pouco degradado; C6 – muito degradado. ....	86
Figura 36: Valores médios de $R_{ae} R_d$ para cada amostra de contato. ....	87
Figura 37: Espectrograma do sinal de RF captado por uma antena log-periódica de banda larga. (a) amostra de contato C1; (b) amostra de contato C6. ....	88
Figura 38: PMAs retangulares com 32 x 53 cm. (a) A1; (b) A2. ....	90
Figura 39: Valores medidos e simulados de coeficiente de reflexão. ....	91
Figura 40: Padrões de irradiação. (a) frequência mínima; (b) frequência central; (c) frequência máxima. ....	92
Figura 41: Curva de calibração do fator de antena (antena A1). ....	93
Figura 42: Sinais de RF medidos com a antena A1. ....	94
Figura 43: <i>Boxplot</i> do banco de dados de duração de arco obtidos para cada amostra de contato. ....	96
Figura 44: <i>Boxplot</i> do banco de dados de energia dos sinais de RF para cada amostra de contato. ....	96
Figura 45: Contato C7 com pontos de degradação destacados. ....	97

Figura 46: Gráficos sintéticos dos parâmetros de avaliação. (a) Duração de arco; (b) Energia do sinal. ...	98
Figura 47: Antena auxiliar. (a) frente; (b) verso (NOBREGA <i>et al</i> , 2019).....	100
Figura 48: Sinais de RF medidos com a antena A1 e a antena auxiliar. ....	100
Figura 49: Modelos de PMA criados no HFSS. (a) antena A <sub>F</sub> ; (b) antena A <sub>B</sub> . ....	101
Figura 50: Antena A <sub>B</sub> (a) antes; (b) depois da técnica de otimização proposta. ....	101
Figura 51: Coeficiente de reflexão dos modelos de PMA investigados. ....	102
Figura 52: Padrões de irradiação simulados da antena A <sub>F</sub> .....	103
Figura 53: Padrões de irradiação simulados da antena A <sub>B</sub> . ....	104
Figura 54: Ganho máximo simulado para as antenas A <sub>F</sub> e A <sub>B</sub> .....	105
Figura 55: Frente e verso da PMA bioinspirada fabricada. ....	106
Figura 56: Coeficiente de reflexão medido e simulado das PMAs bioinspiradas.....	106
Figura 57: Sinais de RF medidos com a PMA A1 e bioinspirada.....	107
Figura 58: Medição com atraso interpolar utilizando a PMA bioinspirada.....	108
Figura 59: Arranjo de ensaio para a detecção da diferença do tempo de chegada dos sinais de RF. ....	109
Figura 60: Diferença do tempo de chegada do sinal de RF. ....	110
Figura 61: Reator de derivação de 33 MVAr, denominado reator X. ....	111
Figura 62: Reator de derivação de 10 MVAr, denominado reator Y. ....	112
Figura 63: Disjuntor de 242 kV, modelo 3AS2, denominado disjuntor X.....	112
Figura 64: Disjuntor de 245 kV, modelo 3AS2, denominado disjuntor Y. ....	113
Figura 65: Arranjo de medição em campo.....	113
Figura 66: Medição em campo - Disjuntor X. ....	114
Figura 67: Medição em campo - Disjuntor Y. ....	115

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Técnicas de alargamento de banda de PMAs. ....	53
Tabela 2: Resumo dos principais trabalhos e suas respectivas contribuições. ....	69
Tabela 3: Dados de placa dos reatores chaveados.....	111
Tabela 4: Dados de placa dos disjuntores avaliados em campo. ....	112

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
ANSI	Instituto nacional americano de padrões (do inglês: <i>american national standards institute</i> )
ATP	Programa alternativo de transientes (do inglês: <i>alternative transients program</i> )
COELBA	Companhia de eletricidade do estado da Bahia
DP	Descargas parciais
FNBW	Largura de feixe de primeiro nulo (do inglês: <i>first null bandwidth</i> )
GVO	Grande volume de óleo
HFSS	Simulador de estruturas em alta frequência (do inglês: <i>high frequency structure simulator</i> )
HPBW	Largura de feixe de meia potência (do inglês: <i>half power bandwidth</i> )
IEC	Comissão eletrotécnica internacional (do inglês: <i>international electrotechnical commission</i> )
IFS	Do inglês: <i>Iterative function system</i>
IIQ	Intervalo interquartil
LT	Linha de transmissão
MEF	Método dos elementos finitos
MRD	Medição de resistência dinâmica
MRE	Medição de resistência estática
NTC	Coefficiente de temperatura negativo (do inglês: <i>negative temperature coefficient</i> )
PMA	Antena monopólio impressa (do inglês: <i>printed monopole antenna</i> )
PVC	Policloreto de vinila
PVO	Pequeno volume de óleo
RF	Radiofrequência
RSR	Relação sinal/ruído
SFE	Superintendência de fiscalização dos serviços de eletricidade
TC	Transformador de corrente
TCTRT	Taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória
TRT	Tensão de restabelecimento transitória
UHF	Ultra alta tensão (do inglês: <i>ultra high frequency</i> )
VSWR	Taxa de tensão de onda estacionária (do inglês: <i>voltage standing wave ratio</i> )

# LISTA DE SÍMBOLOS

$1/r$	Fator de escala de redução
A	Ampere
AF	Fator de antena
Ah	Ampere-hora
$D$	Maior dimensão da antena
D	Dimensão fractal
dB	Decibel
$e_{cd}$	Eficiência de irradiação da antena
$E_{ij}$	Energia do sinal da medição j com o contato i
$E_{incidente}$	Campo elétrico incidente
$f_0$	Frequência central
$f_1$	Frequência inferior
$f_2$	Frequência superior
$FeCl_3$	Percloroeto de ferro
$f_r$	Frequência de ressonância
$f_{rc}$	Frequência de ressonância da antena, considerando o efeito franja
J	Densidade de corrente
G	Ganho
GHz	Gigahertz
GS/s	Gigasamples por segundo
$h$	Espessura do substrato
Hz	Hertz
IIQ	Intervalo interquartil
kA	Kiloampere
kV	kilovolt
kW	Kilowatt
L	Comprimento do <i>patch</i>
$L_{ef}$	Comprimento efetivo do patch
$L_o$	Comprimento da linha de alimentação
m	Metro
MHz	Megahertz
mm	Milímetro
ms	Milissegundo
mV	Milivolt
MVAr	Mega volt-ampere reativo
N	Número total de cópias distintas do elemento original
ns	Nanossegundo
$P_{in}$	Potência recebida
$P_{rad}$	Potência total irradiada
Q	Fator de mérito
$q_1$	Primeiro quartil
$q_2$	Segundo quartil ou mediana
$q_3$	Terceiro quartil
$q_i$	Transformações afins
R	Limite da região de campo distante
$R_a$	Valor médio da resistência na região de contato de arco
$R_d$	Desvio padrão da resistência na região de contato de arco
$R_t$	Resistência na região de transição

$SF_6$	Hexafluoreto de enxofre
V	Volt
$V_a$	Tensão induzida nos terminais da antena
$V_{max}$	Amplitude máxima da tensão
$V_{min}$	Amplitude mínima da tensão
$V_{rmax}$	Valor máximo de tensão com ruído ambiente
W	Largura do <i>patch</i>
$W_o$	Largura da linha de alimentação
$Z_c$	Impedância característica da linha de alimentação
$Z_{in}$	Impedância de entrada da antena
$Z_o$	Impedância característica da linha de transmissão
$\Gamma$	Coefficiente de reflexão
$\epsilon_r$	Constante dielétrica
$\epsilon_{reff}$	Constante dielétrica efetiva
$\lambda$	Comprimento de onda
$\mu\Omega$	Microohm
$\Omega$	Ohm

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Delimitação do Tema.....	16
1.2	Motivação .....	17
1.3	Objetivos .....	20
1.3.1.	Objetivo Geral.....	20
1.3.2.	Objetivos Específicos .....	20
1.4	Contribuições do Trabalho.....	21
1.5	Organização do Texto.....	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	23
2.1	Disjuntores de Alta Tensão .....	23
2.2	Tipos de Disjuntores .....	25
2.2.1.	Disjuntores a Óleo .....	25
2.2.2.	Disjuntores a Vácuo .....	27
2.2.3.	Disjuntores a SF <sub>6</sub> .....	29
2.2.4.	Disjuntores a Ar Comprimido.....	30
2.2.5.	Disjuntores a Sopro Magnético.....	31
2.3	Câmaras de Extinção .....	32
2.4	Manutenção em Disjuntores.....	34
2.4.1.	Avaliação do Meio Isolante .....	36
2.4.2.	Avaliação da Parte Mecânica.....	37
2.4.3.	Avaliação dos Contatos .....	37
2.5	Técnica de Referência: Medição de Resistência Dinâmica .....	39
2.6	Parâmetros Característicos de Antenas.....	41
2.6.1.	Regiões de Campo.....	41
2.6.2.	Padrão de Irradiação.....	42
2.6.3.	Coeficiente de Reflexão.....	45
2.6.4.	VSWR.....	46
2.6.5.	Perda de Retorno .....	46
2.6.6.	Largura de Banda .....	47
2.6.7.	Ganho .....	47
2.7	Antena Monopolo Impressa (PMA) .....	48
2.7.1.	Características Gerais .....	48
2.7.2.	Técnicas de Alimentação.....	50
2.7.3.	PMA Retangular.....	51
2.7.4.	Técnicas de Otimização de Largura de Banda.....	53
2.7.5.	Técnicas de Otimização de Casamento de Impedância.....	54
2.8	Método dos Elementos Finitos.....	55
2.9	Análise <i>Boxplot</i> .....	56
2.10	Nível de Degradação dos Contatos & Sinais de RF .....	58
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	60

4	METODOLOGIA.....	70
4.1	Arranjo Experimental .....	70
4.2	Projeto do Sistema de Monitoramento .....	73
4.3	Técnicas de Miniaturização .....	77
4.3.1.	Geometria Bioinspirada.....	77
4.3.2.	Geometria Fractal.....	78
4.4	Técnica de Otimização por Análise da Densidade de Corrente .....	80
4.5	Técnica de Classificação.....	82
4.6	Comparações com a Técnica de Referência .....	83
5	RESULTADOS .....	86
5.1	Classificação via MRD .....	86
5.2	Análise de Desempenho da Antena Projetada .....	88
5.3	Classificação Via Identificação de Padrão de Irradiação .....	94
5.4	Aperfeiçoamento do Sistema de Medição .....	99
5.5	Testes em Laboratório da PMA Aperfeiçoada.....	106
5.6	Experimentos em Campo.....	111
6	CONCLUSÕES.....	117
	PUBLICAÇÕES.....	119
	REFERÊNCIAS.....	121

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O aumento da demanda de energia elétrica, gerada pelo crescimento populacional e a dependência de dispositivos elétricos/eletrônicos da sociedade moderna, ocasiona uma ampliação dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A presença de linhas de transmissão (LT), hidrogeradores, transformadores, para-raios, além de diversos outros componentes, torna os sistemas elétricos cada vez mais complexos.

Apesar das precauções tomadas pelas concessionárias de energia mediante o uso de técnicas de monitoramento e manutenções, a ocorrência de falhas em sistemas elétricos é inevitável. A maioria destas falhas, tais como curtos-circuitos e sobrecargas, geralmente resulta na formação de correntes elétricas de valores extremamente elevados, capazes de comprometer o estado operacional, reduzir a vida útil ou até mesmo destruir os componentes instalados no sistema.

Em subestações ao longo dos sistemas de transmissão, equipamentos de alto custo, como os transformadores, são instalados. Dessa forma, para evitar prejuízos financeiros e para atender as exigências básicas do sistema elétrico, tais como confiabilidade e continuidade do fornecimento de energia, o uso de sistemas de proteção torna-se fundamental.

Na eventual ocorrência de falhas, a interrupção da corrente elétrica deve ser feita com disjuntores de alta tensão. Os disjuntores são equipamentos de proteção eletromecânicos projetados para conduzir, restabelecer e interromper correntes elétricas no seu local de instalação. Apesar de ter a interrupção de correntes de falta como sua principal função, disjuntores também são utilizados para outras finalidades, tais como operações de manobra de linhas de transmissão, chaveamento de bancos de capacitores, chaveamento de reatores de derivação e a isolamento de trechos de circuitos para possibilitar trabalhos de manutenção (SOUZA *et al.*, 2014).

Durante as interrupções de corrente, existe a formação de arcos elétricos, definidos como descargas auto-sustentadas, formadas entre eletrodos separados por um

meio normalmente não-condutor. Estes arcos atingem temperaturas extremamente elevadas, que excedem a suportabilidade térmica dos equipamentos e, portanto, devem ser extintos rapidamente (LANDRY *et al.*, 2006; LANDRY *et al.*, 2008; TURCOTTE e GAUTHIER, 2008).

Os disjuntores são os únicos equipamentos projetados para interromper correntes extinguindo os arcos elétricos de forma segura e eficiente, suportando os esforços dielétricos, térmicos e mecânicos envolvidos no processo. Isto é possível devido à presença de câmaras de extinção projetadas especificamente para este propósito (NASRALLAH *et al.*, 2007).

Assim como os demais componentes do sistema elétrico, os disjuntores sofrem com um processo de degradação que pode comprometer parcialmente ou totalmente sua capacidade operacional. No caso de disjuntores utilizados mais frequentemente, tais como os que realizam chaveamento de bancos de capacitores, este processo degradativo é ainda mais intenso. Sendo assim, o monitoramento sistemático é um fator determinante para garantir o bom estado operacional dos disjuntores, aumentando, conseqüentemente, a confiabilidade do sistema como um todo.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Atualmente, algumas técnicas de monitoramento/inspeção de disjuntores utilizadas pelas concessionárias fornecem um diagnóstico incompleto, tais como a medição de resistência estática (MRE), que só é capaz de avaliar parte dos contatos elétricos. Conseqüentemente, avaliações errôneas ou equivocadas do estado operacional de disjuntores podem fazer com que equipamentos em más condições operacionais sejam postos em serviço, aumentando consideravelmente o risco de falhas. Este é um dos fatores que contribuem para o número relativamente grande de falhas apresentado por disjuntores (ADAM *et al.*, 2007; COSTA *et al.*, 2010).

As interrupções do suprimento de energia elétrica, umas das possíveis conseqüências das falhas em disjuntores, provocam grandes prejuízos para as unidades consumidoras e empresas responsáveis pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Nos casos de indústrias que dependem do fornecimento confiável e contínuo de energia para seus processos de fabricação, a indisponibilidade do fornecimento acarreta prejuízos ainda maiores.

Tendo em vista os prejuízos que podem vir a ocorrer com as interrupções do fornecimento de energia, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) prevê a aplicação de multas severas para as concessionárias de energia responsáveis por tais ocorrências.

Dados estatísticos apontam que, dentre os equipamentos presentes em subestações, os disjuntores são um dos que mais apresentam falhas, o que pode ser explicado por diagnósticos incompletos ou errôneos fornecidos por técnicas de monitoramento ineficientes.

Como parte de uma campanha de fiscalização no segmento de transmissão com o objetivo de reduzir o número de desligamentos, a Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Eletricidade (SFE) realizou uma pesquisa (entre 2013 e 2017) que revelou que boa parte dos desligamentos forçados são causados por falhas em equipamentos e acessórios. Dentre estes, disjuntores, unidades capacitivas e isoladores representam 26,7% dos desligamentos deste tipo (SFE, 2017).

Segundo Silva (2006), uma pesquisa realizada entre os anos 1999 e 2005, referente à ocorrência de falhas nas subestações operadas pela Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA) na Região Metropolitana de Salvador, revelou que os disjuntores foram os equipamentos que apresentaram o maior número de falhas. Desta forma, evidencia-se que a alta taxa de falhas de disjuntores é um fator recorrente a vários anos e, portanto, o desenvolvimento de técnicas de monitoramento/diagnóstico mais eficientes e confiáveis poderiam ajudar a contornar ou minimizar este problema.

Devido à combinação entre componentes elétricos, materiais isolantes/extintores e sistemas mecânicos para seu acionamento, o disjuntor de alta tensão é considerado um dos equipamentos mais complexos presente nas subestações do sistema elétrico. Portanto, para que o seu estado operacional possa ser avaliado por completo, vários aspectos necessitam ser cuidadosamente examinados. Sendo assim, existe uma grande dificuldade inerente ao processo de diagnóstico de disjuntores (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

O caráter invasivo é uma das principais desvantagens das técnicas utilizadas atualmente para o monitoramento/diagnóstico de disjuntores, o que gera a necessidade de retirada destes equipamentos de operação para que as inspeções possam ser realizadas. Tal atividade está atrelada a diversos custos adicionais, sejam relacionados ao tempo de inatividade ou à contratação de mão de obra qualificada. Em alguns casos, estes custos também são desnecessários, visto que de uma periodicidade ineficiente das intervenções fará com que, em diversas inspeções, nenhuma anomalia seja detectada.

Embora novas técnicas de monitoramento mais eficientes venham sendo desenvolvidas, muitas ainda apresentam o problema supracitado. Ademais, outras complicações, tais como a dificuldade de aplicação, o alto custo dos sistemas de medição, procedimentos de teste não padronizados e a falta de validação e testes de viabilidade técnica/econômica são fatores contribuintes para a relutância das concessionárias na adoção de novas metodologias.

Devido às complicações apresentadas pelas técnicas de monitoramento já existentes, novas metodologias não invasivas baseadas na medição de sinais eletromagnéticos vêm sendo desenvolvidas. Tais sinais são provenientes da formação de arcos elétricos no interior da câmara de extinção de disjuntores, que ocorre durante as operações de chaveamento. Diferentes tipos de sensores vêm sendo estudados para a medição destes sinais, cuja faixa de frequência depende do meio dielétrico no qual os arcos se formam, mas que, geralmente, não ultrapassam 800 MHz (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

O monitoramento radiométrico de disjuntores ainda é uma área de pesquisa relativamente pouco explorada e os métodos que vêm sendo propostos ainda não são ideais, visto que, em muitos casos, poucos parâmetros do disjuntor são avaliados, geralmente são de difícil aplicação e carecem de mais ensaios em campo para verificar sua eficácia.

O estado de degradação dos contatos de disjuntores é um dos parâmetros críticos a serem analisados durante a avaliação do estado operacional do equipamento. Contudo, até então, nenhuma pesquisa foi encontrada, que investigue se existe uma correlação entre este parâmetro e os sinais eletromagnéticos irradiados durante as operações de disjuntores.

A abordagem do monitoramento de disjuntores via medições radiométricas é foco deste trabalho devido às vantagens apresentadas em comparação com os métodos convencionais, tais como o caráter não invasivo, a possibilidade de monitoramento contínuo e por proporcionar uma otimização da periodicidade das intervenções/manutenções, contribuindo para a redução de custos.

Dentre os diversos tipos de antenas que podem ser utilizados para o tipo de monitoramento proposto, as antenas monopolo impressas ou PMAs (do inglês: *printed monopole antenna*) foram consideradas as mais adequadas devido à versatilidade em relação aos diversos parâmetros característicos de antenas, seu formato discreto, baixo custo, facilidade de fabricação e robustez.

Diante do exposto, justifica-se o estudo e a pesquisa para o desenvolvimento de técnicas e mecanismos mais eficientes para o monitoramento e diagnóstico de disjuntores de alta tensão.

Assim, a motivação deste trabalho está em superar os problemas apresentados pelas técnicas já utilizadas no monitoramento de disjuntores, a partir do desenvolvimento de um método não invasivo, eficiente e de fácil implementação, que forneça às equipes de manutenção uma referência objetiva para a tomada de decisão quanto à necessidade de intervenção no equipamento.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é propor e desenvolver um método eficiente e não invasivo, baseado na análise de sinais de radiofrequência (RF), para monitorar e diagnosticar o estado operacional de disjuntores de alta tensão.

### 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral desta pesquisa, elencam-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar as características espectrais dos sinais irradiados por arcos elétricos em disjuntores, de modo a definir a faixa de frequência das antenas a serem projetadas;
- Projetar e produzir um sistema de medição composto por antenas monopolo impressas ou PMAs, compatível com a característica espectral dos sinais de RF irradiados pelos arcos elétricos, formados em câmaras de extinção de disjuntores;
- Otimizar as antenas projetadas a partir da aplicação de geometrias bioinspiradas no elemento irradiador;
- Aplicar técnicas estatísticas e rotinas computacionais para o processamento de sinais, extraindo parâmetros avaliativos necessários para a avaliação dos disjuntores;

- Propor uma técnica de avaliação do estado de degradação dos contatos do disjuntor a partir das características dos sinais de RF medidos;
- Analisar a acurácia do método proposto a partir de comparações com técnicas de referência, tais como a medição de resistência dinâmica (MRD);
- Adaptar o método desenvolvido em laboratório e, com isso, propor uma metodologia de medição em campo de modo a atestar a aplicabilidade do método proposto.

## 1.4 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

As principais contribuições do trabalho proposto são:

- Propor uma nova metodologia para estimar o estado operacional de disjuntores baseada nos sinais de RF irradiados, a partir da utilização de PMAs bioinspiradas;
- Apresentar uma técnica de processamento de sinais a fim de estimar o estado operacional de disjuntores a partir de parâmetros críticos extraídos dos sinais de RF;
- Propor uma nova técnica de otimização de PMAs baseada na análise da densidade de corrente superficial nas partes condutoras da antena;
- Possibilitar o monitoramento de disjuntores em campo, a partir de um método não invasivo e eficiente;
- Otimizar as atividades de manutenção a partir do monitoramento contínuo do disjuntor, auxiliando as equipes técnicas na tomada de decisão quanto a necessidade de intervenção. Com esta manutenção preditiva, a redução de custos e uma melhor gestão de ativos podem ser obtidos.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado em seis capítulos, descritos a seguir.

No Capítulo 2 é apresentado o conteúdo teórico que serve de base para o desenvolvimento do trabalho. Nele, está incluída uma revisão teórica acerca dos disjuntores de alta tensão, a técnica empregada para o projeto e fabricação das PMAs, a

técnica utilizada como referência para fins de comparação, bem como o método de processamento de sinais baseado em técnicas estatísticas.

No Capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica, na qual são elencados os principais trabalhos correlatos ao tema, bem como suas principais contribuições. Dentre os temas tratados, estão aqueles que desenvolvem métodos para diagnóstico de disjuntores de alta tensão baseados na análise do sinal de RF.

No Capítulo 4, é apresentada a metodologia empregada nos experimentos de medição radiométrica no disjuntor. Também é descrito o funcionamento do método de processamento de sinais para fins de extração de parâmetros classificativos.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento da pesquisa, abrangendo testes em laboratório e em campo.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões da pesquisa apresentada e as perspectivas de trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é apresentada uma base teórica para os temas abordados na presente tese. Assim, são descritos os seguintes conteúdos: disjuntores de alta tensão; MRD, técnica de referência utilizada para fins de comparação com a técnica proposta; teoria de antenas, abordando PMAs e os parâmetros de caracterização de antenas; análise *boxplot* e método dos elementos finitos.

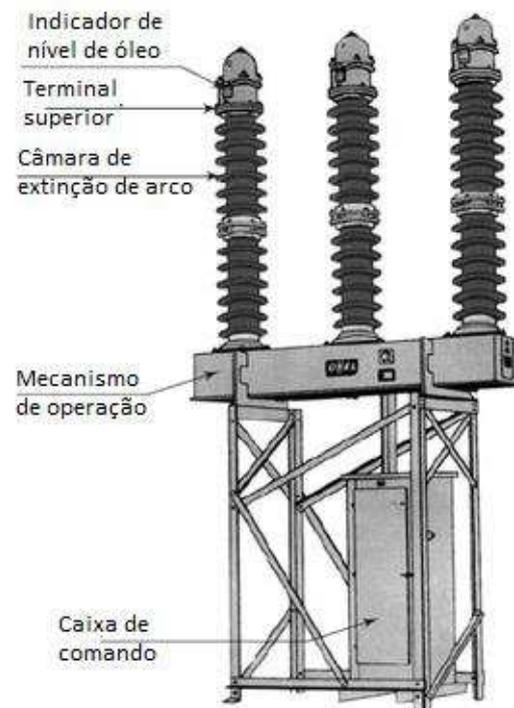
### 2.1 DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

Os disjuntores de alta tensão são dispositivos de proteção eletromecânicos cuja principal função é a interrupção de correntes de falhas, em especial as correntes provenientes de curto-circuito na rede elétrica. Além disso, são utilizados para interromper correntes de sobrecarga, seccionar partes de circuitos para viabilizar trabalhos de manutenção, manobras de linhas de transmissão, chaveamento de bancos de capacitores e reatores, dentre outras funções. Os disjuntores devem ser capazes de interromper correntes de falhas rapidamente, independentemente da quantidade de tempo que permaneceram sem operar, de modo a limitar os efeitos de degradação dos seus contatos, bem como para controlar o tempo de duração da falta (GARZON, 2002). Ademais, os disjuntores devem ser capazes de estabelecer e interromper a corrente nominal ou inferior, e de isolar trechos da rede elétrica quando na posição aberta.

Quando os contatos do disjuntor se encontram na posição fechada, eles devem apresentar entre si uma impedância muito pequena, da ordem de microohms, e quando se encontram na posição aberta, uma impedância extremamente elevada, idealmente com um valor infinito. O disjuntor deve ser capaz de alterar o seu estado de fechado para aberto e vice-versa a partir de quaisquer condições do circuito, a uma taxa de variação da impedância compatível com os parâmetros do circuito. Se esta taxa de variação ocorre em um tempo relativamente longo, a comutação envolve uma energia térmica considerável, a qual o disjuntor deverá absorver e dissipar, tornando o dispositivo maior e mais oneroso (FLURSCHEIM, 2008).

Na Figura 1 é apresentada uma ilustração de um disjuntor tripolar a pequeno volume de óleo (PVO) com indicações de alguns dos seus principais componentes.

Figura 1: Ilustração de um disjuntor tipo PVO.



Fonte: (BHEL, 2006).

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 tempo, de acordo com as especificações do fabricante;
- Isolar a tensão do sistema, em relação à terra e entre seus polos;
- Possuir resistência mecânica suficiente para suportar as vibrações geradas durante as operações de fechamento e abertura.

A necessidade de realizar todas essas tarefas de forma absolutamente confiável para evitar danos aos demais equipamentos, inclui os disjuntores entre os equipamentos de maior complexidade instalados nas subestações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Os disjuntores de alta tensão são constituídos por três componentes principais:

- Câmara de extinção: compartimento vedado do disjuntor que envolve os contatos elétricos, o meio extintor e isolante, e também é onde acontece o isolamento e extinção de arco elétrico. Os arcos elétricos se formam a partir

dos gases ionizados entre os contatos já separados (MCDONALD, 2003). Desse modo, a recuperação dielétrica do meio deve ocorrer o mais rápido possível, de modo a extinguir o arco elétrico formado entre os contatos;

- Mecanismo de acionamento: sistema mecânico composto por molas, mecanismo pneumático ou hidráulico que fornecem a energia necessária para fechar e abrir os contatos do disjuntor. Podem ser acionados de forma manual com o uso de manoplas ou através de atuadores elétricos;
- Circuito de controle: sistema elétrico, interligado com relés de proteção, com acionamento local e/ou remoto, responsável pelas ações de comando para as operações de fechamento e abertura dos contatos do disjuntor.

Os disjuntores são classificados de acordo com diversos critérios, tais como: tensão de aplicação, local de instalação (interno ou externo), características de construção e o princípio utilizado na extinção do arco elétrico.

Quanto às características de construção, há duas categorias de disjuntores: uma em que a câmara de extinção é metálica e aterrada (*deadtank*), e outra onde a câmara é isolada do plano de terra (*livetank*) (ANSI STF C37.100). Dentre estes tipos, os disjuntores com configuração externa do tipo *livetank* apresentam menor custo, menor área de instalação e menor quantidade de meio extintor, como o óleo ou SF<sub>6</sub>.

## 2.2 TIPOS DE DISJUNTORES

Os disjuntores são classificados de acordo com o princípio utilizado para interromper os arcos elétricos nas suas câmaras de extinção. Nesta seção serão apresentados os tipos de disjuntores.

### 2.2.1. DISJUNTORES A ÓLEO

Nos disjuntores a óleo, os contatos fixos e móveis ficam imersos em óleo mineral isolante (óleo naftênico ou parafínico). A câmara de extinção fica preenchida pelo óleo que possui duas funções: extinção dos arcos elétricos e isolação entre as partes energizadas e o tanque (FLURSCHEIM, 2008).

O óleo mineral atua no sentido de extinguir o arco elétrico de duas formas: alongando o arco através de um defletor, fazendo com que o arco seja interrompido na passagem da corrente pelo zero, e promovendo o resfriamento do arco.

Durante as operações de interrupção de corrente em um disjuntor a óleo, as altas temperaturas geradas pela formação de arcos elétricos provocam a decomposição do óleo isolante. Os gases gerados como consequência da decomposição do óleo aumentam a pressão no interior da câmara, forçando o alongamento do arco e, assim, promovendo sua extinção.

A decomposição do óleo também produz resíduos condutores a base de carbono, comprometendo suas características dielétricas e isolantes. Desse modo, o óleo necessita ser recuperado após um certo número de interrupções de curto-circuito. Além disso, a fim de evitar o acúmulo destes resíduos próximo aos contatos, as câmaras de extinção de disjuntores a óleo não devem ser instaladas na posição horizontal.

Os disjuntores a óleo são divididos em duas categorias:

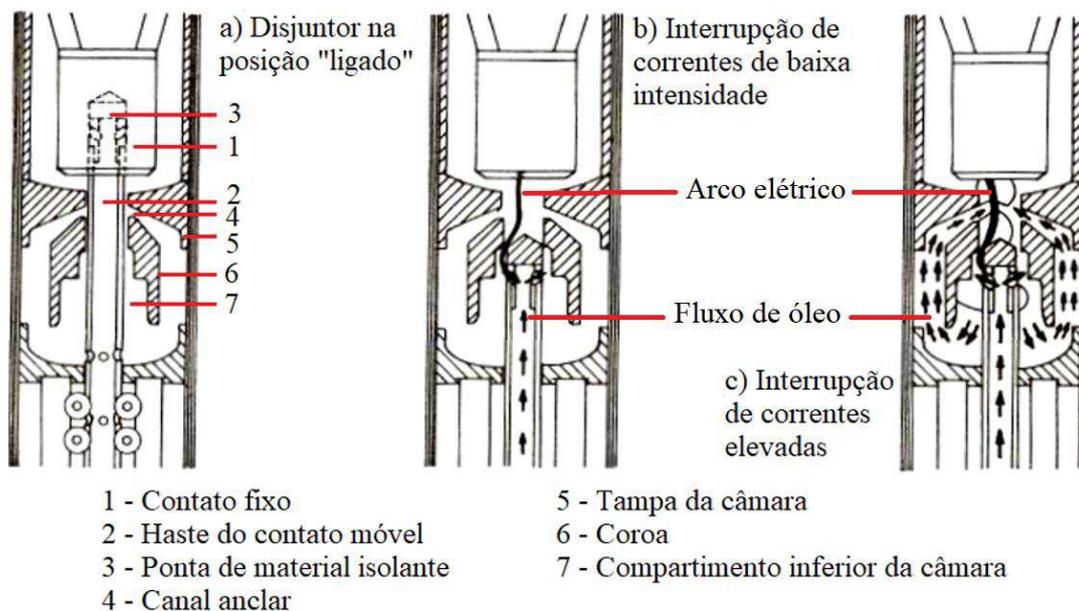
- Disjuntores a pequeno volume de óleo (PVO);
- Disjuntores a grande volume de óleo (GVO).

Os disjuntores GVO possuem alta capacidade de interrupção em curto-circuito e são utilizados em sistemas de média e alta tensão (até 230 kV), no entanto, por serem tecnicamente ultrapassados e devido à dificuldade de manutenção, vêm sendo substituídos por disjuntores com tecnologias mais eficientes.

Os disjuntores PVO foram projetados como uma evolução dos disjuntores GVO, onde o volume de óleo foi consideravelmente reduzido e as câmaras de extinção projetadas com sistemas de fluxo de óleo forçado, aumentando a eficiência no processo de interrupção de corrente. São relativamente leves e compactos, de fácil manutenção e usualmente são utilizados em sistemas de média tensão.

Na Figura 2 é apresentada uma ilustração da câmara de extinção de um disjuntor PVO, bem como das etapas de extinção de arco elétrico.

Figura 2: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor PVO e das etapas de extinção de arcos elétricos.



Fonte: (FERREIRA, 2006).

### 2.2.2. DISJUNTORES A VÁCUO

De acordo com a teoria de Townsend, o processo de formação de ruptura em determinado espaço depende da movimentação de partículas carregadas. Sendo assim, na ausência de partículas, como no caso de um vácuo perfeito, não deveria haver condução. Contudo, na literatura, diversas teorias envolvendo o mecanismo de formação de arcos elétricos no vácuo elevado foram propostas. Algumas teorias assumem que uma partícula carregada pode ser emitida de um eletrodo sob a ação de um alto campo elétrico. Ao atingir o outro eletrodo, partículas carregadas com carga oposta são liberadas. As partículas liberadas são aceleradas por um campo elétrico elevado, dando origem a uma reação em cadeia que provoca o processo de ruptura. Nesse mecanismo, processos de erosão dos eletrodos podem ocorrer.

Outras teorias assumem que existem imperfeições na superfície dos eletrodos, como microsaliências, pontas salientes ou partículas fracamente agregadas. Tais imperfeições promovem a liberação de partículas que, combinadas com o campo elétrico elevado, dão origem ao processo de ruptura.

Em disjuntores a vácuo, os contatos elétricos estão localizados no interior de uma ampola com elevado nível de vácuo. Apesar da quase inexistência de íons positivos e elétrons, ainda existe a formação de arcos elétricos. Isto ocorre devido à evaporação de partículas metálicas dos contatos durante as operações de interrupção de corrente, fornecendo um meio para formação do processo de ionização. Mesmo assim, a duração

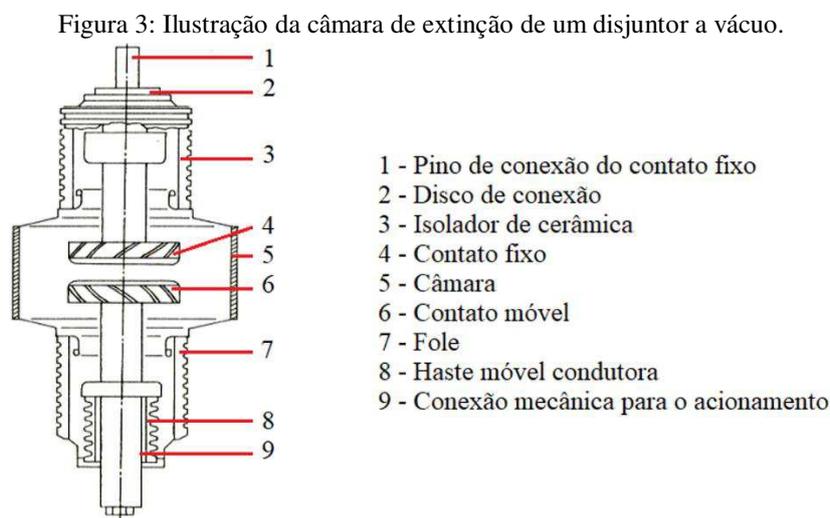
dos arcos é muito pequena, visto que a intensidade da nuvem de vapor metálico é proporcional a intensidade da corrente de arco, desse modo, correntes de baixa intensidade não são suficientes para manter a descarga, sendo interrompidas antes da passagem por zero.

Os vapores metálicos formados na ampola de vácuo são altamente condutivos, gerando uma tensão de arco muito pequena, de tal forma que a energia liberada quase não causa desgaste no material dos contatos, isto porque quando o arco elétrico é extinto, o vapor metálico rapidamente se condensa na superfície dos contatos, restabelecendo a rigidez dielétrica.

A curta duração dos arcos elétricos, a pequena quantidade de energia liberada durante os processos de interrupção de corrente e o material utilizado nos contatos explicam a elevada expectativa de vida dos contatos elétricos de disjuntores a vácuo. Além disso, uma das principais vantagens dos disjuntores a vácuo é que os mesmos praticamente não requerem manutenções.

Os contatos de disjuntores a vácuo geralmente são fabricados a partir de ligas de cobre com bismuto (CuBi), crômio (CuCr) ou argônio (CuAr). Sendo o CuCr o material com as melhores características para níveis de corrente de 8 até 63 kA (BHEL, 2006). Embora o uso de disjuntores a vácuo venha ocorrendo majoritariamente em sistemas de média tensão, modelos projetados para aplicação em alta tensão vêm sendo desenvolvidos (GODECHOT *et al.*, 2014).

Com o intuito de apresentar de uma forma mais clara a estrutura geral da câmara de extinção de disjuntores a vácuo, na Figura 3 uma ilustração com seus principais componentes é exibida.



Fonte: (BHEL, 2006).

### 2.2.3. DISJUNTORES A SF<sub>6</sub>

O hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) é um gás isolante, inerte, não inflamável e que possui melhores propriedades refrigerantes em comparação com o ar. Tais características o torna ideal para a fabricação de equipamentos elétricos de alta capacidade e desempenho. Além disso, suas propriedades isolantes permitem o desenvolvimento de equipamentos mais compactos e seguros.

O SF<sub>6</sub> é um dos gases de maior peso molecular que existem (cerca de 5 vezes mais pesado que o ar) e é fabricado em laboratório. É inodoro e incolor, dificultando a detecção de vazamentos. Equipes de manutenção utilizam câmeras especiais infravermelho para detectar a presença de vazamentos de SF<sub>6</sub> em seus equipamentos. Em pressão atmosférica, o SF<sub>6</sub> possui rigidez dielétrica 2,5 vezes maior que a do ar (D'AJUZ *et al.*, 1985).

A principal característica do SF<sub>6</sub> que permite sua utilização como gás isolante é a sua alta eletronegatividade, ou seja, sua capacidade de capturar elétrons livres de modo a formar moléculas com características de íons (molions), o que dificulta o processo de ionização formador dos arcos elétricos.

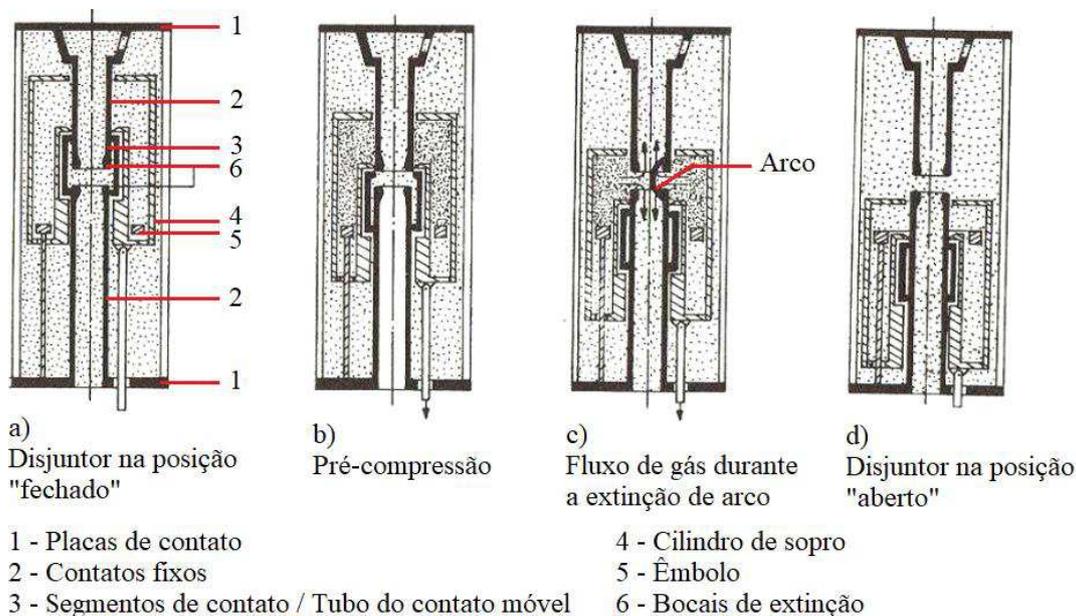
Uma das grandes vantagens dos disjuntores a SF<sub>6</sub> é que eles requerem pouca manutenção, pois os componentes em que o gás se decompõe durante as interrupções de corrente não são condutores.

Uma das principais desvantagens do gás SF<sub>6</sub> são os impactos ambientais. A sua grande capacidade de absorção das ondas de irradiação terrestre (ondas longas), contribuem significativamente para a intensificação do efeito estufa, possuindo um fator de aquecimento de 22800 vezes superior ao CO<sub>2</sub> (LIRA, *et al.*, 2017). Outra desvantagem significativa dos disjuntores a SF<sub>6</sub> é o alto custo do gás e do sistema de monitoramento de pressão, necessário para garantir que o mesmo mantenha o nível de rigidez dielétrica desejável.

Existem dois tipos de tecnologias empregadas nas câmaras de extinção de disjuntores a SF<sub>6</sub>. Os modelos mais modernos utilizam um sistema de pressão única, em que o gás é impulsionado na direção do arco elétrico pela própria movimentação dos contatos. Os modelos mais antigos utilizam um sistema de dupla pressão, em que a câmara de extinção é dividida em duas partes, uma em baixa pressão onde ficam os contatos fixo e móvel, e outra em alta pressão selada por uma válvula, de modo que, quando a válvula se abre, o gás é impulsionado na direção do arco elétrico (FRONTIM,

2013). Na Figura 4 é apresentada uma ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a SF<sub>6</sub>, bem como das etapas de extinção de arco elétrico.

Figura 4: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a SF<sub>6</sub> e das etapas de extinção de arcos elétricos.



Fonte: (FERREIRA, 2006).

#### 2.2.4. DISJUNTORES A AR COMPRIMIDO

Nos disjuntores a ar comprimido, o ar é utilizado tanto para a extinção dos arcos elétricos como para a isolação interna do disjuntor. Para tal propósito, ele necessita ser mantido em alta pressão. Um jato de ar, com velocidade proporcional à pressão em que é mantido, é propellido na direção do arco elétrico (em geral, transversalmente), promovendo a extinção do arco a partir do seu resfriamento. Em alguns casos, o ar também é utilizado como mecanismo de acionamento dos contatos (CARVALHO *et al.*, 1995).

Os disjuntores a ar comprimido possuem um reservatório que fornece o ar para a extinção de arco, onde o ar é mantido a uma pressão de aproximadamente cinco ou seis vezes maior que a pressão do ar no interior da câmara de extinção de arco. Para estes equipamentos, a extinção do arco é independente da corrente a ser interrompida, e o tempo de interrupção é da ordem de dois ciclos (GREMMEL, 2002; D'AJUZ *et al.*, 1985).

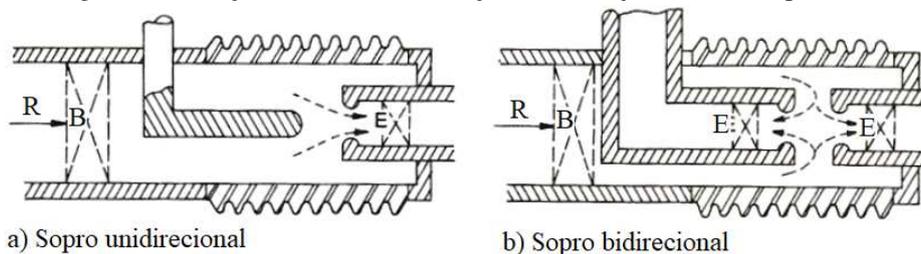
Como o próprio ar é utilizado como mecanismo de extinção de arcos, a poluição no interior da câmara de extinção é baixa. Portanto, disjuntores a ar comprimido demandam pouca manutenção com respeito a degradação do ar. No entanto, um sistema

de monitoramento do sistema de compressão de ar deve ser implementado para garantir que a isolamento e a capacidade de interrupção de corrente não sejam comprometidas.

Apesar de utilizarem o ar como meio isolante e extintor, os disjuntores a ar comprimido não são baratos, visto que, para manter o gás em alta pressão, é necessária à instalação de esquemas de controle e sistemas de compressão que elevam o custo do equipamento. Além disso, caso o disjuntor não seja instalado em um local remoto, o alto nível de ruído sonoro gerado durante as operações de interrupção faz com que seja necessário o uso de supressores de ruído.

Existem duas técnicas utilizadas para promover a extinção do arco elétrico em disjuntores a ar comprimido: sopro unidirecional (*monoblast*) e sopro bidirecional (*duoblast*), sendo esta última a mais eficiente e mais utilizada atualmente (FRONTIM, 2013). Na Figura 5 são apresentadas ilustrações dos tipos de câmara de extinção de um disjuntor a ar comprimido.

Figura 5: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a ar comprimido.



a) Sopro unidirecional

b) Sopro bidirecional

R - Suprimento de ar comprimido  
E - Válvulas de escape (jusante)  
B - Válvulas de sopro (montante)

Fonte: (D'AJUZ *et al.*, 1985).

#### 2.2.5. DISJUNTORES A SOPRO MAGNÉTICO

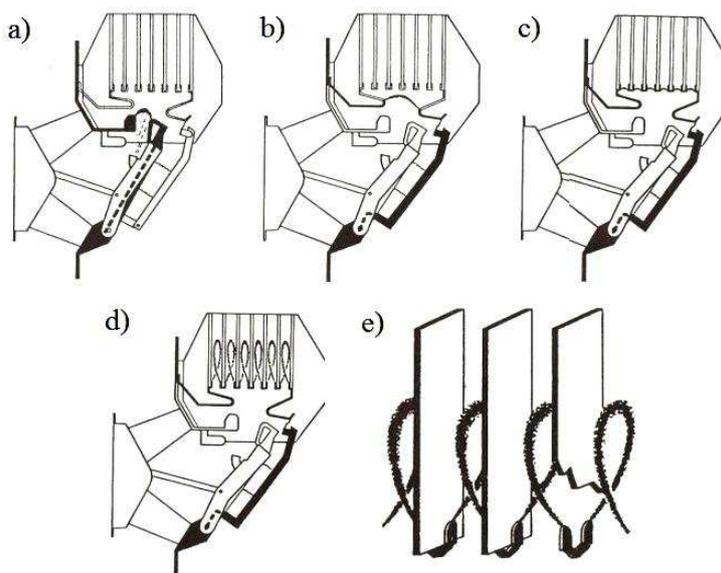
Nos disjuntores a sopro magnético, os contatos abrem e fecham no ar em pressão atmosférica. Devido ao seu tipo de construção, os disjuntores a sopro magnético são de uso restrito a aplicações de média tensão (até 24 kV), instalações de alta segurança ou sistemas industriais (ARAÚJO, 2001).

Nas suas câmaras de extinção, os disjuntores a sopro magnético possuem várias lâminas metálicas com o propósito de dividir e resfriar o arco elétrico, facilitando a desionização e a extinção do arco. Nestes equipamentos, as forças que impelem o arco elétrico para dentro das fendas da câmara de extinção são geradas pela presença de um intenso campo magnético ou, eventualmente, por um sopro pneumático auxiliar

produzido pelo mecanismo de acionamento. O arco é extinto como consequência do seu alongamento em contato com as paredes da câmara (ARAÚJO, 2001).

Devido ao princípio utilizado na extinção dos arcos elétricos, os disjuntores a sopro magnético possuem um tempo de extinção de arco muito grande em relação a outros tipos de disjuntores, o que explica a sua limitação de uso em sistemas de baixa tensão. Na Figura 6 é apresentada uma ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a sopro magnético, bem como das etapas de extinção de arco.

Figura 6: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a sopro magnético e das etapas de extinção de arcos elétricos.



Fonte: (FERREIRA, 2006).

### 2.3 CÂMARAS DE EXTINÇÃO

A câmara de extinção é um compartimento do disjuntor que envolve os contatos fixos e móveis, responsáveis pela condução da corrente elétrica, bem como o meio isolante utilizado para a extinção do arco elétrico e o isolamento entre os polos e a carcaça.

A câmara de extinção deve ser capaz de resistir aos esforços dielétricos e aos esforços térmicos e mecânicos provenientes do arco elétrico, proporcionando condições favoráveis à extinção do arco. Além disso, a câmara e seus componentes devem ser projetados para suportar fenômenos químicos que deterioraram os componentes internos e as juntas de vedação. A deterioração das juntas provoca vazamentos do meio isolante e são foco de inspeção.

Durante as operações de interrupção de corrente, uma tensão de alta frequência (na ordem de kHz) surge entre os contatos do disjuntor, conhecida como tensão de

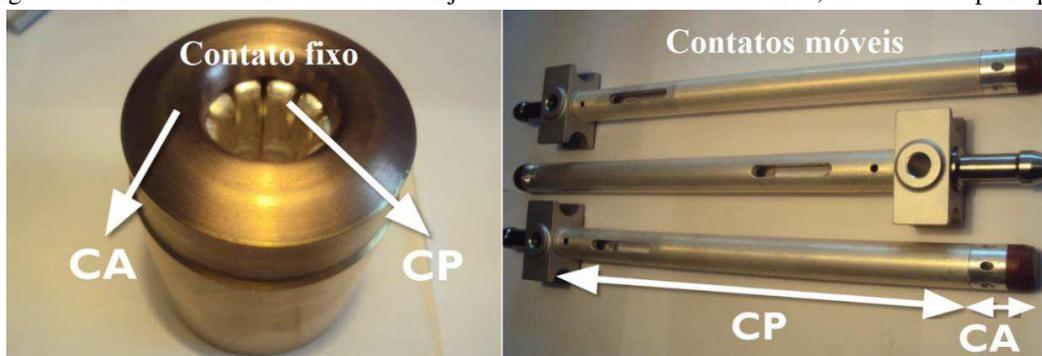
restabelecimento transitória (TRT), que pode atingir valores de pico várias vezes superiores a tensão do sistema em que o disjuntor está operando (SINDER, 2007).

A TRT provoca a tendência de reignição do arco elétrico, seja por ruptura do dielétrico ou mesmo por reignição térmica, portanto, o disjuntor deve ser projetado para resfriar e recuperar o meio no interior da sua câmara de extinção mais rápido que o crescimento da TRT. Além disso, a rigidez dielétrica na câmara de extinção deve ser capaz de suportar as solicitações impostas pelos valores de pico atingidos pela TRT. O grau de solicitação que a TRT pode causar depende não apenas do seu valor de pico, mas também da sua taxa de crescimento (TCTRT) (IEEE C37.011-2005).

O fechamento dos polos do disjuntor ocorre no interior da câmara de extinção. O disjuntor se encontra na posição fechada quando há contato galvânico entre os contatos principais dos contatos fixo e móvel, de modo complementar, o disjuntor se encontra na posição aberta, quando não há o contato galvânico entre os contatos fixos e móveis.

Os contatos fixos e móveis apresentam duas regiões distintas, denominadas de contato principal e contato de arco. O contato principal é responsável pela condução da corrente de carga, em condições normais de operação, bem como da corrente de sobrecarga e curto-circuito, até que ocorra a separação galvânica entre os contatos principais durante a operação de abertura para seccionamento do circuito. Quando os contatos já se encontram galvanicamente separados, a corrente de arco circula entre os contatos de arco dos contatos fixos e móveis, até a extinção total do arco elétrico. Na Figura 7, fotografias com indicações das partes dos contatos de um disjuntor PVO são apresentadas.

Figura 7: Contatos fixo e móveis de um disjuntor PVO. CA – contato de arco; CP – contato principal.



Fonte: Próprio autor.

O processo de concepção dos contatos elétricos é bastante complexo, uma vez que a combinação de materiais e geometria devem ser otimizadas, de modo a obter excelentes

características elétricas e mecânicas. Além disso, uma análise técnica e econômica deve ser feita, considerando as fases de fabricação e manutenção.

Os contatos utilizados no circuito seccionador dos disjuntores devem ser capazes de suportar o calor gerado pela corrente de carga, e principalmente pelo arco elétrico, sem apresentar degradação excessiva. Além disso, eles precisam ter boas propriedades de condução, de forma a apresentar baixa resistência elétrica, quando o disjuntor se encontra na posição fechada (GARZON, 2002).

Em relação à geometria, os contatos móveis geralmente são construídos em forma de haste sólida, que pode ser oca ou não, que se desloca durante a abertura e fechamento. O contato fixo, que permanece imóvel, é formado por uma carcaça cilíndrica com dedos de contato, que têm por objetivo melhorar o contato galvânico entre os contatos fixos e móveis, sendo a pressão em cada dedo do contato exercida por molas. Para evitar a queima excessiva dos dedos de contato durante o arco elétrico, o contato fixo é formado por um anel de arco.

Os contatos também devem possuir uma geometria que facilite a remoção dos subprodutos neles depositados, provenientes de gases e partículas dos contatos formadas em virtude do arco elétrico. Os subprodutos podem diminuir os níveis de isolamento interna provocando reignições do arco durante a abertura dos contatos em baixas correntes (PONS *et al.*, 1993). Além disso, podem formar uma camada isolante no contato aumentando a resistência entre os contatos na posição fechada (NASRALLAH *et al.*, 2007).

A ação de limpeza nos contatos é executada na operação de fechamento, quando o contato móvel desliza sobre os dedos do contato fixo, até parar na posição fechada, proporcionando um melhor contato galvânico.

## 2.4 MANUTENÇÃO EM DISJUNTORES

Assim como qualquer outro equipamento do sistema elétrico, os disjuntores, desde a sua instalação, sofrem com a deterioração dos seus componentes e associado a sua alta complexidade. Portanto, caso não sejam submetidos a um monitoramento e a manutenções periódicas, o alto nível de degradação pode ocasionar falhas elétricas e avalias no próprio disjuntor e nos equipamentos protegidos por ele.

Em condições ideais, as técnicas de monitoramento devem possibilitar que manutenções desnecessárias sejam evitadas. Assim, durante as etapas de desmontagem e remontagem, novos problemas podem surgir, como erros humanos, a introdução de

impurezas no óleo ou a danificação de juntas de vedação, tornando o disjuntor susceptível a falhas de operação, conseqüentemente reduzindo a confiabilidade do sistema elétrico.

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

Geralmente, os disjuntores seguem um padrão de manutenção cuja periodicidade é determinada com base no número de manobras efetuadas ou no tempo de serviço do equipamento.

As técnicas de monitoramento devem ser capazes de produzir dados precisos para o correto diagnóstico do estado do disjuntor, tanto em relação à parte elétrica como à parte mecânica. Durante as inspeções/manutenções, os seguintes parâmetros são avaliados:

- Tempo de fechamento dos contatos;
- Tempo de abertura dos contatos;
- Sincronização de abertura dos contatos;
- Vibração durante as operações de abertura e fechamento;
- Operação dos circuitos de comando;
- Resistência dos contatos.

Um programa de manutenção bem definido e corretamente implementado minimiza acidentes, reduz paradas não planejadas, aumenta o tempo médio entre falhas de equipamentos elétricos, reduz os custos com reparos e o tempo de inatividade do equipamento, promove uma melhoria da segurança pessoal e material. Além disso, multas por inatividade relacionadas à parcela variável podem ser evitadas.

A frequência da realização de inspeções/manutenções em disjuntores pode aumentar de acordo com a presença dos seguintes fatores (GILL, 2008):

- Atmosfera agressiva (presença de elementos que favoreçam a oxidação dos equipamentos);
- Temperatura ambiente alta;
- Excesso de poeira, sujeira ou fuligem;
- Umidade alta;

- Equipamentos mais antigos;
- Alta frequência de interrupção de falhas.

Dependendo do diagnóstico fornecido pelas técnicas de monitoramento, alguns serviços de manutenção podem ser necessários, neste caso, o disjuntor é submetido a uma rotina de ajustes ou reparos, e posteriormente é submetido a novos ensaios para verificar se os defeitos foram corrigidos.

De modo geral, as manutenções em disjuntores avaliam três aspectos do equipamento: o meio isolante, a parte mecânica e os contatos. Nas seções seguintes serão descritos os principais testes realizados para avaliar o estado operacional de um disjuntor.

#### 2.4.1. AVALIAÇÃO DO MEIO ISOLANTE

Os disjuntores possuem um meio dielétrico com a função de promover o isolamento entre suas partes energizadas e a terra e entre os polos, e um meio dielétrico com a função de promover a extinção dos arcos elétricos, conhecidos como meio isolante e meio extintor, respectivamente.

Nos casos de disjuntores em que o meio isolante permanece separado do meio extintor, o meio isolante geralmente sofre um processo de deterioração relativamente lento, visto que o mesmo é submetido a poucos agentes contaminantes. Já o meio extintor tende a se deteriorar mais rapidamente, devido à contaminação proveniente de gases e subprodutos gerados durante a extinção do arco elétrico.

Os meios isolante e extintor podem, ou não, ser constituídos do mesmo material. Em alguns casos, os disjuntores possuem os meios isolante e extintor separados, com o objetivo de reduzir o tempo de manutenção, visto que apenas a parte do dielétrico deteriorado necessita ser substituída ou recuperada (SANTOS, 2013). Para avaliar o isolamento de disjuntores, os seguintes testes são realizados:

- Teste de rigidez dielétrica do óleo mineral isolante;
- Verificação da pressão do gás ( $\text{SF}_6$  ou ar comprimido);
- Análise físico-química para detecção de agentes contaminantes;
- Verificação da concentração de gases dissolvidos no óleo mineral isolante a partir de uma análise cromatográfica.

#### 2.4.2. AVALIAÇÃO DA PARTE MECÂNICA

O sistema de acionamento de um disjuntor é responsável pelo armazenamento e liberação da energia necessária para as suas operações de abertura e fechamento. A grande quantidade de detalhes construtivos o torna umas das partes mais complexas do disjuntor. Sendo assim, o grau de confiabilidade do disjuntor está diretamente relacionado com o estado operativo do seu sistema de acionamento.

Sistemas de acionamento podem ser monopolares ou tripolares. Nos monopolares, o acionamento de cada polo é realizado individualmente, tornando o sistema mais caro e complexo. Já nos sistemas tripolares, o acionamento dos três polos é efetuado quase simultaneamente. Os principais tipos de sistemas de acionamento são:

- Acionamento por solenoide;
- Acionamento por molas;
- Acionamento a ar comprimido;
- Acionamento hidráulico.

Os principais testes realizados para avaliar a parte mecânica de disjuntores são:

- Medição do tempo de abertura dos contatos;
- Medição do tempo de fechamento dos contatos;
- Verificação da sincronização de operação dos contatos;
- Testes de vibração durante as operações de abertura e fechamento.

#### 2.4.3. AVALIAÇÃO DOS CONTATOS

Os contatos fixos e móveis de um disjuntor são os responsáveis pela condução da corrente elétrica em condições normais e anormais do sistema. Suas geometrias e materiais constituintes devem ser escolhidos de tal forma a suportar os esforços mecânicos e térmicos gerados pelas operações do disjuntor.

O desgaste dos contatos de disjuntores é algo normal e previsível. Este processo se inicia no momento que o equipamento é colocado em operação. Contatos com nível de degradação muito elevado podem comprometer o desempenho do disjuntor, limitar sua capacidade de interrupção de corrente e causar falhas de operação (MCDONALD, 2003). Sendo assim, um monitoramento sistemático contatos de disjuntores deve ser realizado e as causas do seu desgaste são:

- Atrito entre os contatos;
- Corrente elétrica de carga;
- Arcos elétricos.

Dentre as três causas supracitadas, os arcos elétricos são reconhecidos como a causa mais significativa.

A resistência elétrica dos contatos, que idealmente deve ser zero, vai aumentando à medida que eles vão se desgastando. Por este motivo, as principais técnicas destinadas a verificar o grau de degradação dos contatos se baseiam na medição de resistência. Dependendo da fabricação dos contatos, também é possível que a degradação provoque uma erosão dos contatos, de tal forma a reduzir o seu comprimento.

A MRE é a técnica mais difundida e utilizada pelas concessionárias de energia para avaliar o estado dos contatos de disjuntores. A técnica é aplicada periodicamente e é tomada como base para decisões sobre a realização de intervenções para troca dos contatos.

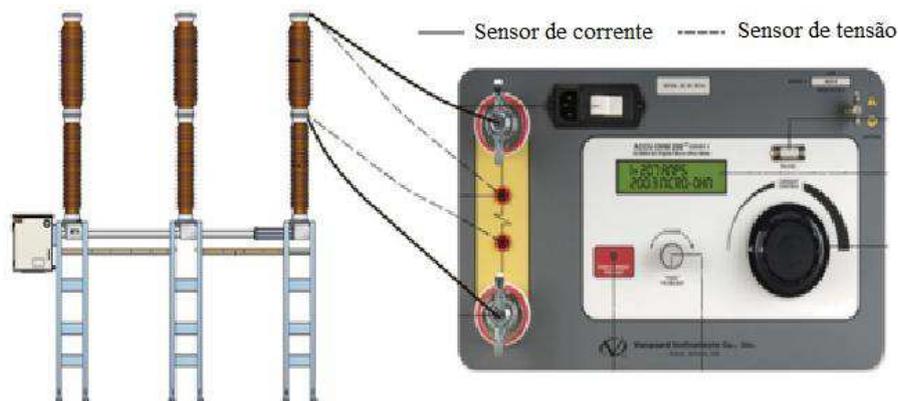
O ensaio de MRE é implementado com a injeção de um sinal de corrente contínua através dos contatos principais do disjuntor e medindo-se a queda de tensão sobre os mesmos, sem a necessidade de remoção do meio isolante da câmara de extinção de arco (GILL, 2008). A resistência é calculada mediante a aplicação direta da Lei de Ohm.

Nos ensaios de MRE, utiliza-se uma fonte de corrente contínua, a fim de evitar erros na medição da resistência causados por eventuais componentes indutivos no circuito sob teste (STANISIC e NEIMANIS, 2010).

Algumas normas padronizam o nível de corrente que deve ser utilizado nos ensaios de resistência de contato. De acordo com a norma IEC, a resistência de contato deve ser medida com uma corrente de teste mínima de 50 A. Já a norma ANSI determina que a corrente de ensaio deve ser de no mínimo 100 A (IEC 62271-1; ANSI STF C37.100).

Para tomada de decisão sobre a troca dos contatos, os valores de resistência medidos devem ser comparados com os valores limite recomendados pelos fabricantes, com os valores das outras fases do disjuntor sobre ensaio ou com os valores de disjuntores similares. Geralmente, os ensaios de MRE são implementados com o auxílio de analisadores de disjuntor, que possuem um micro-ohmímetro incorporado. A medição é feita individualmente em cada polo do disjuntor. Os sensores do micro-ohmímetro são conectados de acordo com a ilustração apresentada na Figura 8.

Figura 8: Ilustração de um esquema de medição da resistência estática de contato com um micro-ohmímetro.



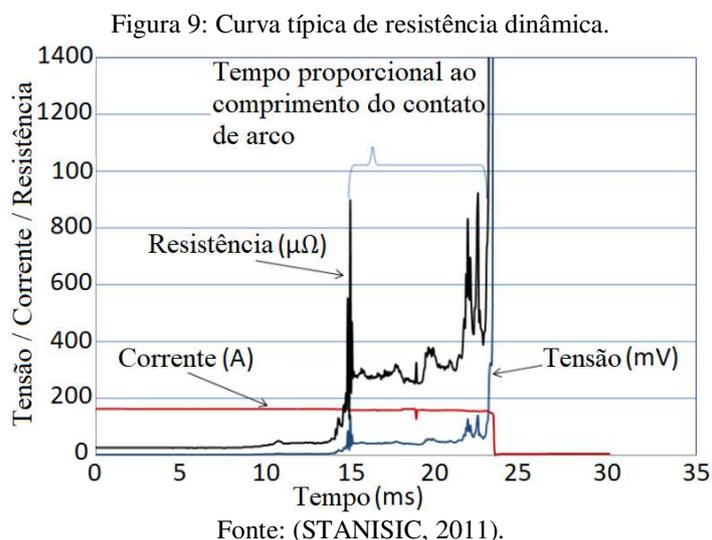
Fonte: (ABB, 2009), (VANGUARD, 2010).

A MRE é realizada com os contatos completamente fechados, portanto, só há contato galvânico entre os contatos principais. Desse modo, a técnica é capaz de avaliar o estado dos contatos principais, mas não dos contatos de arco. Como consequência, diagnósticos incorretos podem ser gerados, já que baixos valores de resistência não implicam, necessariamente, em contatos em bom estado. Devido a tal complicação, novas técnicas para a avaliação dos contatos de disjuntores via medição de resistência vêm sendo desenvolvidas, sendo a principal delas a medição de resistência dinâmica (MRD) (abordada no tópico 2.5), que será utilizada nesta pesquisa como técnica de referência para a comparação com alguns dos resultados obtidos com a técnica proposta.

## 2.5 TÉCNICA DE REFERÊNCIA: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DINÂMICA

Com o objetivo de se obter informações mais completas para produzir um diagnóstico mais preciso e confiável, pesquisas vêm abordando a aplicação da MRD na avaliação dos contatos de disjuntores de alta tensão.

O ensaio de MRD é bastante semelhante ao ensaio de MRE, no entanto, ao invés de se medir apenas um valor de resistência, a resistência é medida durante o processo de abertura dos contatos, resultando em uma curva de resistência  $R$  ( $\Omega$ ) em função do tempo de abertura (s) ou do deslocamento dos contatos (mm). Na Figura 9, uma curva típica de resistência dinâmica é apresentada.



No gráfico apresentado na Figura 9, os valores de resistência até aproximadamente 15 ms são referentes aos contatos principais, enquanto que os valores de resistência entre 15 ms e 24 ms são referentes aos contatos de arco. Assim, esta técnica permite uma avaliação mais completa dos contatos de disjuntores.

Embora o procedimento de análise de curvas de MRD ainda não seja padronizado, a maioria dos trabalhos encontrados na literatura utilizam os seguintes valores como parâmetros de avaliação (LANDRY *et al.*, 2006):

- Valor médio de resistência;
- Área abaixo da curva de resistência;
- Valor máximo de resistência.

A curva de resistência resultante da MRD é obtida com a aplicação de uma corrente contínua de teste através dos contatos. O valor da queda de tensão entre os contatos é então medida simultaneamente durante uma operação de abertura, e então a resistência é calculada pela aplicação direta da lei de Ohm (LANDRY *et al.*, 2006). As curvas de resistência dinâmica permitem a avaliação individual dos contatos principais e de arco.

Os resultados dos ensaios efetuados de MRD com velocidade nominal de abertura dos contatos não se reproduzem de um ensaio para outro, sendo necessária a aplicação de altas correntes ou a redução da velocidade de abertura dos contatos para se obter resultados consistentes (LANDRY *et al.*, 2006; LANDRY *et al.*, 2008; TURCOTTE e GAUTHIER, 2008).

A MRD pode ser realizada tanto no fechamento quanto na abertura dos contatos do disjuntor, entretanto, as medições não apresentam bons resultados durante operações de fechamento, visto que a corrente contínua existente no momento do contato galvânico dos contatos de arco gera um ruído indesejável, que compromete os resultados (LANDRY *et al.*, 2006; LANDRY *et al.*, 2008).

Apesar de ainda não existir um modelo conclusivo de análise das curvas de resistência, pesquisas sobre MRD mostram que é possível correlacionar o padrão das curvas de resistência dinâmica com o estado real dos contatos de disjuntores, mediante a aplicação de técnicas de apoio e bancos de dados, resultando em um diagnóstico mais preciso e eficiente (LANDRY *et al.*, 2006; LANDRY *et al.*, 2008).

A técnica de monitoramento proposta neste trabalho é baseada em medições radiométricas, tendo em vista que, nos processos de abertura e fechamento, os disjuntores irradiam energia na forma de ondas eletromagnéticas. Assim, nas próximas seções, são apresentados os principais parâmetros característicos utilizados na avaliação do desempenho de antenas, abordando aspectos como a sensibilidade e a diretividade.

## 2.6 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DE ANTENAS

As antenas podem ser definidas como elementos capazes de converter energia eletromagnética, na forma de ondas viajantes, em energia elétrica guiada por linhas de transmissão, ou vice-versa (KRAUS, 1988). As antenas são elementos essenciais para a presente pesquisa, uma vez que o sistema de monitoramento proposto se baseia na medição de sinais eletromagnéticos irradiados.

Para projetar e avaliar o comportamento de uma antena, uma série de parâmetros devem ser analisados. Nas subseções a seguir, os principais parâmetros característicos de antenas abordados neste trabalho serão descritos.

### 2.6.1. REGIÕES DE CAMPO

O comportamento de uma antena, ou seja, a forma com que ela capta a energia eletromagnética depende da distância entre a mesma e a fonte. Portanto, de acordo com a distância, o espaço ao redor de uma antena pode ser dividido em três regiões:

- **Região de campo próximo reativo:** É a região imediatamente próxima à antena, na qual predomina a componente reativa do campo elétrico. O limite desta região é definido como (BALANIS, 2005):

$$R < 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}, \quad (2.1)$$

em que  $D$  representa a maior dimensão da antena e  $\lambda$  o comprimento da onda eletromagnética.

- **Região de campo próximo irradiado:** Também conhecida como região de Fresnel, esta região corresponde ao espaço em que os campos irradiados são predominantes e a distribuição angular da componente de campo elétrico depende da distância até a antena. Ademais, a presença de campos radiais e transversais é significativa. Os limites desta região são (BALANIS, 2005):

$$0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R \leq 2 \frac{D^2}{\lambda}. \quad (2.2)$$

- **Região de campo distante:** Também conhecida como região de Fraunhofer, esta região se caracteriza por possuir a distribuição angular da componente de campo irradiado independente da distância à antena. Ademais, os campos são essencialmente transversais. O limite desta região é dado pela expressão (BALANIS, 2005):

$$R > 2 \frac{D^2}{\lambda}. \quad (2.3)$$

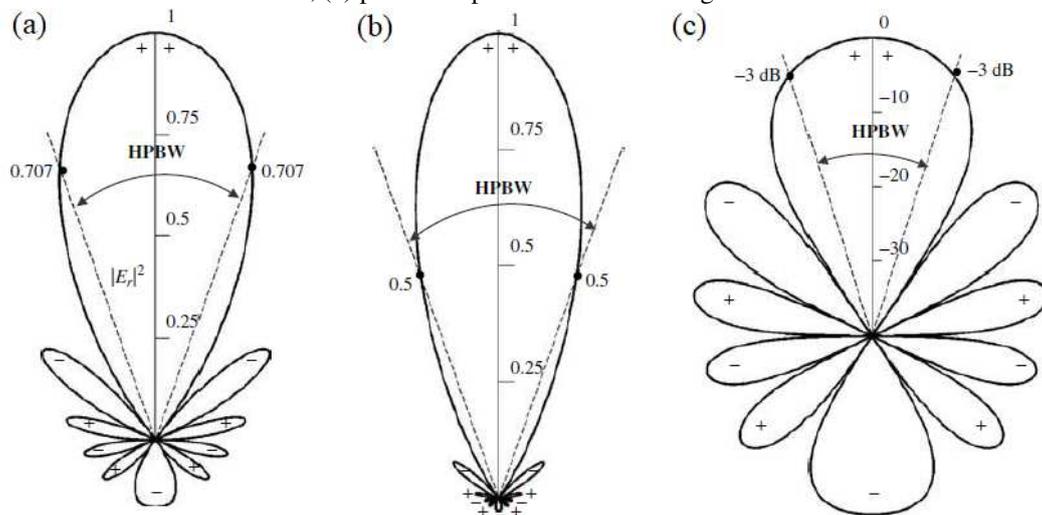
O conhecimento das regiões de campo de uma antena é essencial para o entendimento desta pesquisa, uma vez que os parâmetros característicos descritos nas subseções a seguir só são válidos para a região de campo distante.

#### 2.6.2. PADRÃO DE IRRADIAÇÃO

O padrão de irradiação de uma antena é o que define suas propriedades de irradiação em função do espaço de coordenadas, seja por meio de uma função matemática ou por uma representação gráfica. Diversas informações podem ser obtidas a partir de padrões de irradiação, tais como diretividade, ganho, polarização e potência de irradiação, podendo, em alguns casos, serem representados em escala logarítmica, uma vez que isto permite realçar alguns detalhes do padrão que possuem valores muito pequenos.

Normalmente, tais padrões são apresentados de forma normalizada com relação ao seu valor máximo. Na Figura 10, exemplos de padrões de irradiação são apresentados (BALANIS, 2005).

Figura 10: Padrões de irradiação. (a) padrão de campo em escala linear; (b) padrão de potência em escala linear; (c) padrão de potência em escala logarítmica.



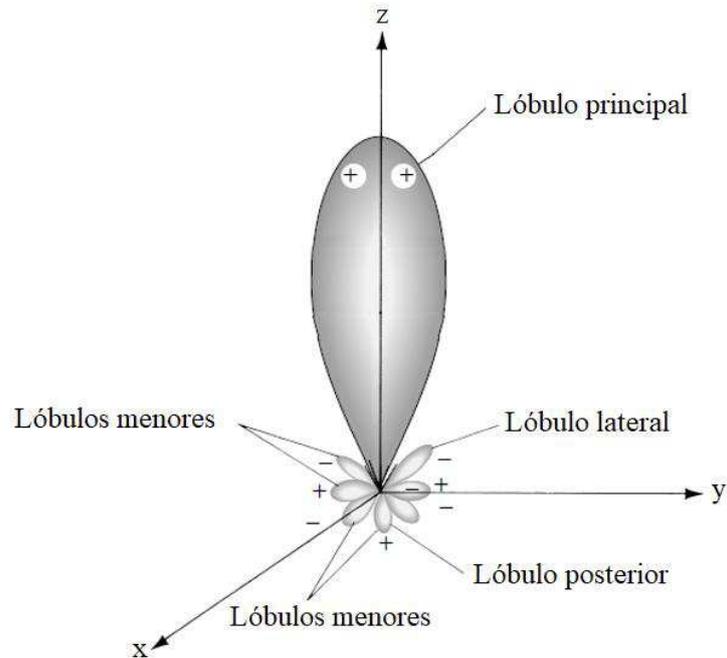
Fonte: Adaptado de Balanis (2005).

Para os tipos de padrão de irradiação apresentados na Figura 10, as seguintes informações são fornecidas:

- **Padrão de campo (escala linear):** Representa a amplitude do campo elétrico ou magnético em função da abertura angular;
- **Padrão de potência (escala linear):** Representa o quadrado da amplitude do campo elétrico ou magnético em função da abertura angular;
- **Padrão de potência (escala logarítmica):** Representa a amplitude do campo elétrico ou magnético, em dB, em função da abertura angular.

A partir da Figura 10, pode-se observar que o padrão de irradiação apresenta diversos lóbulos. Por definição, um lóbulo de irradiação é uma parte do padrão de irradiação limitado por regiões de intensidade de irradiação relativamente baixa (BALANIS, 2005). Estes lóbulos podem ser classificados como lóbulo principal ou lóbulo menor, podendo este último ser classificado como lateral ou posterior. Na Figura 11 apresenta-se um padrão de irradiação em 3D com indicações dos tipos de lóbulo.

Figura 11: Lóbulos de irradiação.

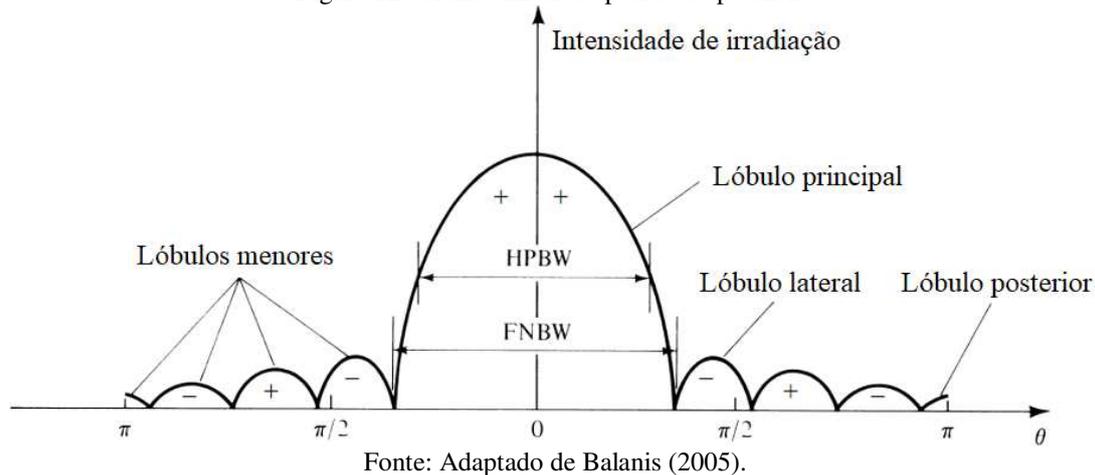


Fonte: Adaptado de Balanis (2005).

Os lóbulos menores geralmente representam irradiações em direções indesejadas e, portanto, devem ser minimizados para se obter uma antena com comportamento mais direcional.

A partir do lóbulo principal, é possível se obter outro parâmetro chamado de largura de feixe, que é definido como a separação angular entre dois pontos idênticos localizados em lados opostos do lóbulo principal (BALANIS, 2005). A largura de feixe de meia potência ou HPBW (do inglês: *Half Power Bandwidth*) é uma das formas mais comuns de representação de largura de feixe, e é definido a partir dos pontos em que se observa metade do valor de intensidade máxima no lóbulo principal. A largura de feixe de primeiro nulo ou FNBW (do inglês: *First Null Bandwidth*) também é utilizada, e é definida como a abertura angular entre os primeiros nulos do padrão de irradiação. Na Figura 12 é apresentado um gráfico linear do padrão de potência em que o HPBW e o FNBW são destacados.

Figura 12: Gráfico linear do padrão de potência.



### 2.6.3. COEFICIENTE DE REFLEXÃO

Durante a utilização de uma antena, espera-se, idealmente, que haja a máxima transferência de potência entre o sinal incidente e a linha de transmissão. No entanto, isto pode ser comprometido caso ocorram reflexões de onda devido a diferença de impedância dos meios através dos quais a onda se propaga. Sendo assim, ao projetar um sistema de medição com antenas, deve-se atentar para que a impedância de entrada da antena ( $Z_{in}$ ), a impedância característica da linha de transmissão ( $Z_0$ ) e a impedância de entrada do osciloscópio sejam correspondentes. Geralmente, a impedância característica utilizada nestes circuitos é de  $50 \Omega$ .

O coeficiente de reflexão ( $\Gamma$ ) é o parâmetro utilizado para indicar a parcela da onda refletida em uma estrutura, e pode ser expressa por:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}. \quad (2.4)$$

A partir da equação 2.4, nota-se que, quanto mais próximo a impedância de entrada for da impedância característica da linha, menor será a reflexão de onda, logo, maior será a transferência de potência. O nível de proximidade destes dois parâmetros é denominado casamento de impedância.

O casamento de impedância pode ser estimado a partir da perda de retorno e da taxa de tensão de onda estacionária ou VSWR (do inglês: *Voltage Standing Wave Ratio*). Estes parâmetros são descritos nas subseções a seguir.

#### 2.6.4. VSWR

Por definição, o VSWR é a razão entre a amplitude máxima e a mínima de um sinal, e pode ser escrita como:

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}. \quad (2.5)$$

A partir da equação 2.5, nota-se que para um casamento ideal de impedância, ou seja, com  $\Gamma = 0$ , o VSWR assume o valor unitário. No entanto, como na prática é impossível obter um casamento de impedância perfeito, considera-se que valores de VSWR abaixo de 2 são satisfatórios, o que correspondem a uma transferência de potência acima de 90% (BALANIS, 2005). Assim, a partir da equação 2.5, os valores de  $\Gamma$  desejáveis são aqueles abaixo de -10 dB.

#### 2.6.5. PERDA DE RETORNO

A perda de retorno (PR) é a medida de efetividade com que a potência é entregue de uma linha de transmissão a uma carga, como uma antena. Quanto maior este valor, melhor é o casamento de impedância entre estes componentes. Expressando a potência em termos de tensão (ou equivalentemente como intensidade de campo) em uma linha de transmissão (assumindo uma antena passiva), a PR é dada por:

$$PR(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{1}{\Gamma^2} \right|. \quad (2.6)$$

$$PR(dB) = -20 \cdot \log_{10} |\Gamma|. \quad (2.7)$$

O parâmetro mais comumente utilizado para descrever o casamento de impedância em uma antena é a perda de retorno ( $S_{11}$ ), que representa (em dB) a razão entre a potência refletida da antena e a potência entregue à linha de transmissão (BIRD, 2009). O  $S_{11}$  pode ser expresso em função do VSWR ou do coeficiente de reflexão ( $\Gamma$ ) de acordo com as equações 2.6 e 2.7, respectivamente. Em outras palavras, a PR representa o negativo do coeficiente de reflexão expresso em decibéis.

### 2.6.6. LARGURA DE BANDA

A largura de banda de uma antena é definida como a faixa de frequência na qual a mesma pode irradiar ou receber energia de forma satisfatória, o que pode ser avaliado a partir da análise de vários parâmetros, tais como os citados nas subseções anteriores (BALANIS, 2005). Geralmente, a largura de banda é definida em função do coeficiente de reflexão, considerando o intervalo de frequência para o qual este parâmetro assume valores abaixo de  $-10 \text{ dB}$ .

Existem três frequências características da banda de uma antena: frequência central ( $f_0$ ), frequência inferior ( $f_1$ ) e frequência superior ( $f_2$ ).  $f_1$  e  $f_2$  representam os limites para os quais considera-se que a antena apresenta uma transferência de potência satisfatória ( $\Gamma < -10 \text{ dB}$ ). Na frequência  $f_0$ , a antena geralmente apresenta valores ótimos de desempenho.

### 2.6.7. GANHO

O ganho de uma antena, em determinada direção, é definido como a razão entre a intensidade máxima de irradiação e a intensidade de irradiação que seria obtida pela antena se a potência recebida fosse irradiada isotropicamente (BALANIS, 2005). A intensidade de irradiação referente a esta potência é igual a potência recebida dividida por  $4\pi$ , assim, o ganho ( $G$ ) pode ser expresso por:

$$G = 4\pi \frac{\text{Intensidade de irradiação}}{\text{Potência total recebida}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}}. \quad (2.8)$$

A equação 2.8 retrata o ganho para uma situação ideal, em que toda potência irradiada é recebida pela antena. Porém, sabe-se que este processo sempre envolve perdas, e assim, para que as perdas sejam levadas em consideração, a potência total irradiada deve ser descrita da seguinte forma:

$$P_{rad} = e_{cd} P_{in}, \quad (2.9)$$

em que  $P_{in}$  é a potência total recebida pela antena e  $e_{cd}$  representa a eficiência de irradiação da antena. Aplicando 2.9 em 2.8, tem-se:

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[ 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right]. \quad (2.10)$$

A medição do ganho de uma antena é realizada mediante uma análise comparativa com uma antena de referência com ganho conhecido, submetendo ambas à mesma potência de entrada. Assim, de acordo com as potências irradiadas pelas antenas, é possível estimar o ganho da antena sob análise.

## 2.7 ANTENA MONOPOLO IMPRESSA (PMA)

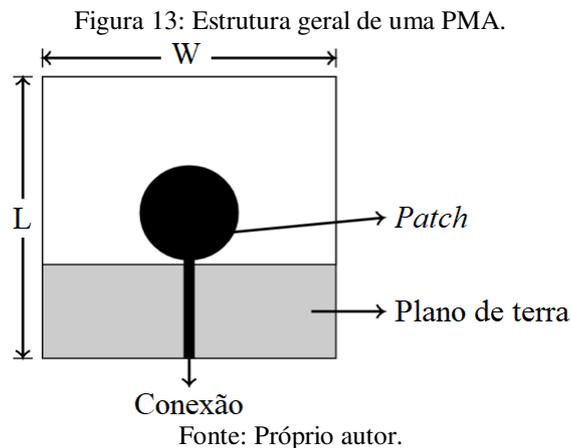
As PMAs são caracterizadas por sua versatilidade em relação à frequência de ressonância, polarização, impedância e padrões de irradiação. Além disso, seu formato discreto, conformidade a superfícies planas ou não planas, baixo custo, facilidade de fabricação e robustez quando instaladas em uma superfície rígida são algumas das vantagens que as tornam adequadas para diversos tipos de aplicação, tais como aeronáutica, tecnologia aeroespacial, uso em satélites, aplicações militares, dentre outros.

Dentre as desvantagens das PMAs destacam-se seu ganho relativamente baixo e a irradiação espúria na alimentação que, por sua vez, gera uma largura de banda estreita. No entanto, tais desvantagens podem ser contornadas mediante o uso de técnicas de otimização, apresentadas nas próximas seções (BALANIS, 2005). Assim, devido às vantagens supracitadas e a operação em banda larga (obtida a partir de técnicas de otimização), as PMAs são consideradas sensores ideais para a aplicação no monitoramento de disjuntores de alta tensão.

### 2.7.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS

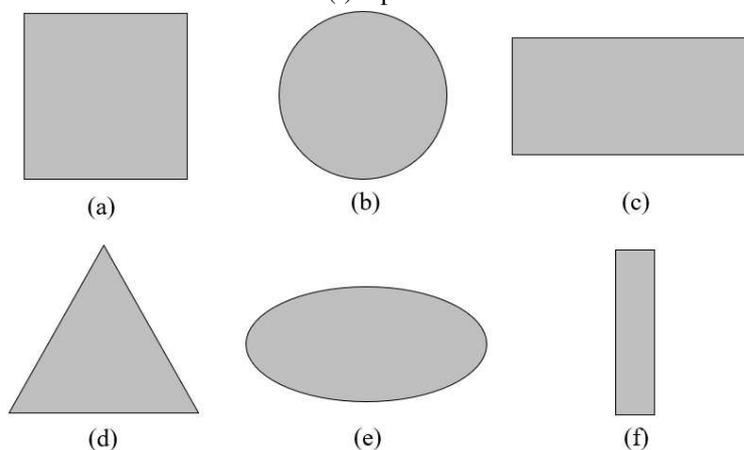
As PMAs são compostas por uma fina camada metálica (*patch*) localizada em cima de um material dielétrico (substrato) que, por sua vez, é apoiado sobre outra fina camada metálica, denominada plano de terra. A escolha do formato e tamanho do *patch*, bem como o material e espessura do substrato influenciam diretamente no comportamento da antena. É comum o uso de camadas metálicas com espessura muito menor que o comprimento de onda ( $\lambda$ ), enquanto que a espessura do substrato encontra-se na faixa  $0,003\lambda \leq h \leq 0,05\lambda$ . Diferentes materiais são utilizados para o substrato no projeto de PMAs, sendo mais comum o uso de materiais com constante dielétrica na faixa de  $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$ . Geralmente, substratos mais espessos e com menores valores de constante dielétrica proporcionam melhor eficiência e maior largura de banda. Já os substratos finos e de maior constante dielétrica são desejáveis para circuitos de micro-ondas, visto que estes reduzem as irradiações e acoplamentos indesejados, porém,

devido ao aumento das perdas, existe uma redução da eficiência e a largura de banda é relativamente pequena (BALANIS, 2005). Na Figura 13, uma ilustração da estrutura geral de uma PMA é apresentada.



Os elementos irradiadores (*patches*) podem assumir diversos formatos, sendo os *patches* quadrados, retangulares, circulares e dipolos os de uso mais comum, devido à fácil análise e fabricação, e boas características de irradiação, especialmente a baixa irradiação de polarização cruzada. O tamanho reduzido e a maior largura de banda proporcionada por dipolos os fazem adequados para uso em arranjos. Na Figura 14, uma ilustração de diferentes formatos de *patch* é apresentada.

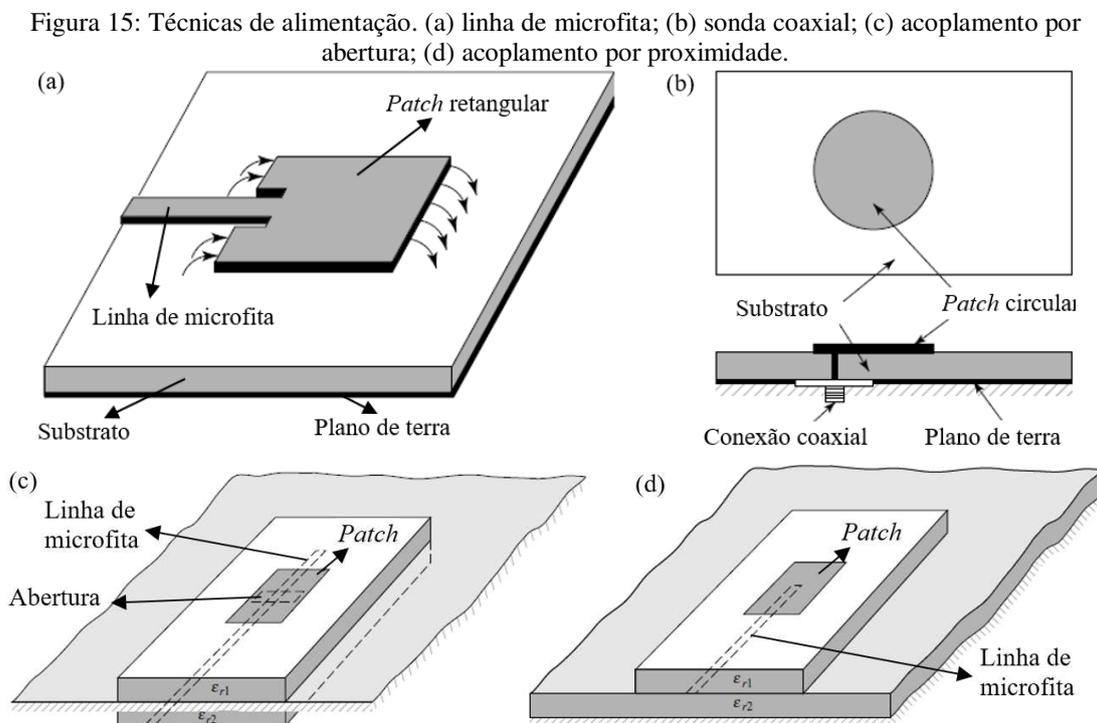
Figura 14: Formatos de *patch*. (a) quadrado; (b) circular; (c) retangular; (d) triangular; (e) elíptico; (f) dipolo.



O uso de arranjos, ou seja, a combinação de dois ou mais *patches* pode ser realizado para obter diferentes tipos de polarização. Ademais, diferentes formas de alimentação (discutidas na próxima subseção) podem ser aplicadas para melhorar o comportamento da antena em certos aspectos, tais como a diretividade (BALANIS, 2005).

### 2.7.2. TÉCNICAS DE ALIMENTAÇÃO

As técnicas mais comumente utilizadas para a alimentação de PMAs são: linha de microfita, sonda coaxial, acoplamento de abertura e acoplamento por proximidade (CARVER e MINK, 1981; KATEHI e ALEXOPOULOS, 1984; POZAR, 1985). Uma ilustração destas técnicas de alimentação pode ser observada na figura a seguir:



Fonte: Adaptado de Balanis (2005).

A linha de microfita é geralmente muito mais estreita que o *patch*. Sua utilização tem como principais vantagens a facilidade de modelagem e fabricação, além de permitir o casamento de impedância a partir da sua posição de conexão com o *patch*. Entretanto, para substratos mais espessos as ondas de superfície e as irradiações espúrias na alimentação aumentam, limitando a largura de banda.

A sonda coaxial, cuja conexão interna conecta-se ao elemento irradiador através do substrato e a conexão externa é ligada ao plano de terra, também é amplamente utilizada, uma vez que é de fácil fabricação e apresenta pouca irradiação espúria. Porém, seu processo de modelagem é relativamente complexo, além de também ser de banda estreita.

Tanto a alimentação por linha de microfita como por sonda coaxial produzem irradiação de polarização cruzada, algo que não acontece nas técnicas apresentadas na Figura 15.c e 15.d.

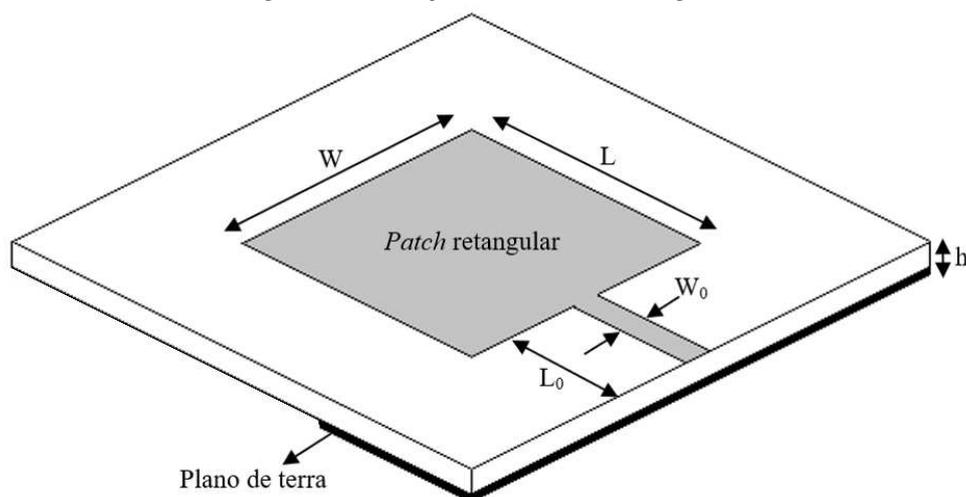
O acoplamento por abertura é a de mais difícil fabricação de todas as técnicas supracitadas, além de também apresentar bandas estreitas. Por outro lado, é de fácil modelagem e apresenta irradiação espúria moderada. Para este tipo de alimentação, dois substratos são separados pelo plano de terra. Uma linha de microfita é colocada em baixo do substrato inferior, e sua energia é acoplada ao *patch* através da abertura no plano de terra. Tipicamente, um material com maior constante dielétrica é utilizado para o substrato inferior, enquanto que um material mais espesso e de menor constante dielétrica é utilizado para o substrato superior. A isolação entre a alimentação e o *patch*, proporcionada pelo plano de terra, contribui para minimizar interferências de irradiações espúrias. O casamento de impedância pode ser obtido a partir de ajustes na espessura da linha de alimentação e do tamanho da abertura.

O acoplamento por proximidade é, dentre todas as técnicas de alimentação citadas, a que proporciona a maior largura de banda, é relativamente fácil de modelar e apresenta pouca irradiação espúria. Esta técnica tem como principal desvantagem a dificuldade de fabricação.

### 2.7.3. PMA RETANGULAR

A PMA retangular, ilustrada na Figura 16, é a configuração mais comumente utilizada. Isto se deve a sua facilidade de análise, modelagem e fabricação. A etapa inicial para o projeto de uma antena deste tipo é a definição de três parâmetros: constante dielétrica ( $\epsilon_r$ ) e espessura ( $h$ ) do material do substrato, e a frequência de ressonância desejada ( $f_r$ ).

Figura 16: Ilustração de uma PMA retangular.



Fonte: Próprio autor.

A largura do *patch* ( $W$ ) pode ser calculada a partir da expressão:

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}, \quad (2.11)$$

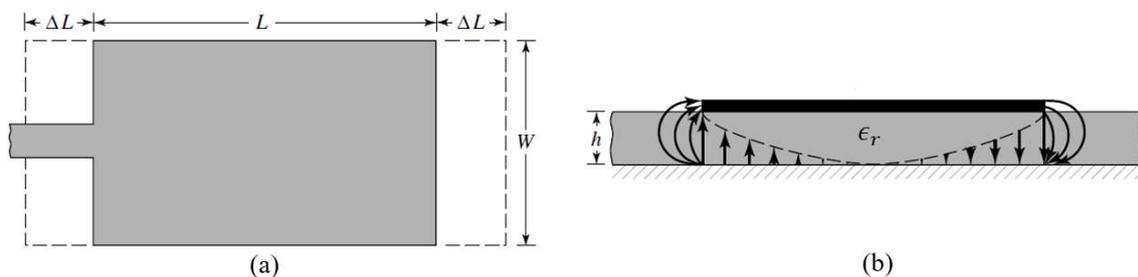
em que  $c$  é a velocidade de propagação da luz no vácuo. Em condições ideais, o comprimento do *patch* ( $L$ ) seria dado pela equação 2.12.

$$L = \frac{\lambda}{2}. \quad (2.12)$$

No entanto, para se calcular o comprimento efetivo do *patch*, deve-se considerar o efeito de franja, que ocorre nas bordas do *patch*, em que parte das ondas se propagam através do ar e parte através do substrato. Assim, as dimensões do *patch* parecem eletricamente maiores que suas dimensões físicas. O efeito de franja é ilustrado na Figura 17. Para considerar este efeito, o conceito de constante dielétrica efetiva ( $\epsilon_{reff}$ ) é introduzido. Supondo que o *patch* se encontra imerso em um material dielétrico uniforme, a  $\epsilon_{reff}$  é definida como a constante dielétrica deste meio, de modo que o *patch* apresente características idênticas às apresentadas em sua configuração real (entre o ar e o substrato). O valor de  $\epsilon_{reff}$  pode ser calculado a partir da equação 2.13.

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-1/2}. \quad (2.13)$$

Figura 17: Ilustração do efeito franja. (a) visão superior; (b) visão lateral.



Fonte: Balanis (2005).

Uma estimativa do aumento aparente do comprimento do *patch* ( $\Delta L$ ) devido ao efeito franja pode ser obtida por:

$$\Delta L = 0,412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)}. \quad (2.14)$$

Uma vez que o comprimento do *patch* é aumentado de  $\Delta L$  nos dois lados, o comprimento efetivo do *patch* passa a ser expresso por:

$$L_{ef} = L + 2\Delta L = \frac{\lambda}{2} + 2\Delta L. \quad (2.15)$$

A frequência de ressonância da antena, considerando o efeito franja, é dada por:

$$(f_{rc})_{010} = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}. \quad (2.16)$$

#### 2.7.4. TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO DE LARGURA DE BANDA

Apesar de PMAs apresentarem inerentemente uma banda estreita, técnicas de otimização podem ser aplicadas, aumentando significativamente a faixa de operação da antena. De modo geral, existem três formas de aumentar a largura de banda de uma PMA, tal como é apresentado resumidamente na Tabela 1.

Tabela 1: Técnicas de alargamento de banda de PMAs.

Abordagem	Técnica
<b>Diminuição do fator de mérito (Q)</b>	Mudança do formato do <i>patch</i>
	Aumento da espessura do substrato
	Diminuição da constante dielétrica
<b>Uso de casamento de impedância</b>	Inserção de um circuito casador de impedância
	Adição de elementos de sintonia
	Uso de fendas no <i>patch</i>
<b>Introdução de múltiplas ressonâncias</b>	Uso de elementos parasitas
	Uso de fendas no <i>patch</i>
	Excitação do tipo acoplamento por abertura ou proximidade

Fonte: (CHEN e CHIA, 2006).

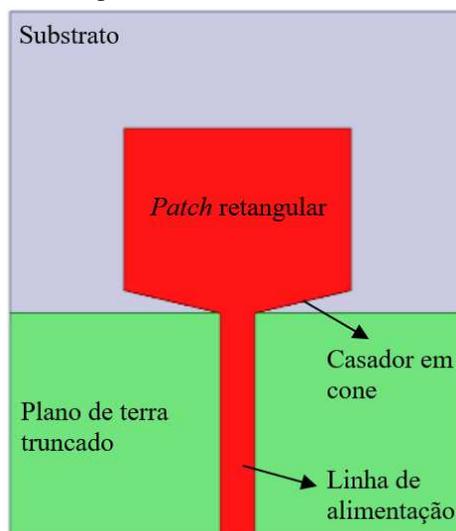
A técnica de alargamento de banda a ser utilizada geralmente depende do tipo de alimentação do *patch*. Para antenas com alimentação por sonda coaxial, são inseridas aberturas no elemento irradiador (HUYNH e LEE, 1995). O uso de sondas em L e T é realizado para antenas alimentadas via acoplamento (LUK *et al.*, 1998). As técnicas de alargamento de banda aplicadas a antenas alimentadas por linha de microfita consistem

em alterações no plano de terra e são bastante eficientes, proporcionando larguras de banda acima de 100% (HARAZ e SEBAK, 2013).

A inserção de fendas ou o truncamento do plano de terra em PMAs proporciona o aumento do efeito capacitivo, compensando os efeitos indutivos inerentes e, com isso, aumentando a largura de banda. No entanto, a aplicação destas técnicas geralmente provoca distorções no padrão de irradiação, comprometendo algumas características da antena, tais como a diretividade e o ganho (MELO, 2011).

Para antenas alimentadas via linha de microfita, a inserção de um circuito de casamento de impedância (como o do tipo cone, ilustrado na Figura 18) minimiza transições abruptas entre a linha de alimentação e o elemento irradiador, reduzindo o coeficiente de reflexão e, conseqüentemente, aumentando a largura de banda (SILVA, 2014).

Figura 18: PMA retangular com plano de terra truncado e casador de impedância tipo cone.



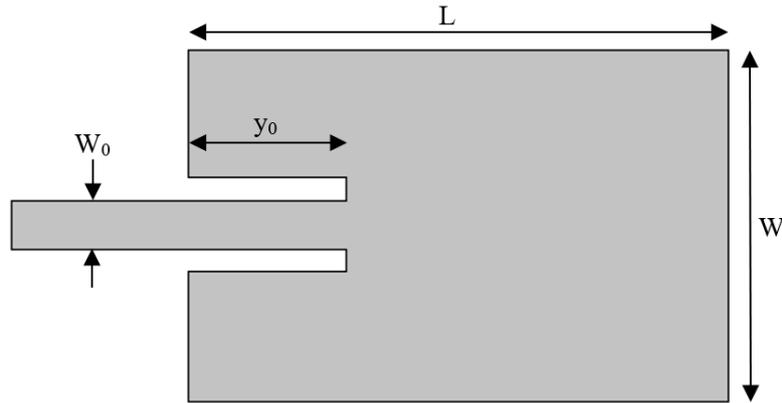
Fonte: (SILVA, 2014).

#### 2.7.5. TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO DE CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA

De acordo com o que foi mencionado na seção 2.6.3, o casamento de impedância entre os componentes de um sistema de medição é essencial para evitar a ocorrência de reflexões de ondas. O tipo de técnica a ser aplicada para proporcionar o casamento de impedância depende do tipo de alimentação da antena.

Para antenas alimentadas via linha de microfita, uma das técnicas mais utilizadas é a inserção de reentrâncias no elemento irradiador, aproximando o ponto de conexão da linha de alimentação ao centro do *patch*, tal como está representado na Figura 19.

Figura 19: Ilustração de uma PMA com alimentação por linha de microfita e reentrância.



Fonte: Próprio autor.

A impedância característica da linha de alimentação é dada por:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\epsilon_{reff}} \ln \left( \frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right), & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[ \frac{W_0}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left( \frac{W_0}{h} + 1,444 \right) \right]}, & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases}, \quad (2.17)$$

em que  $W_0$  representa a largura da linha de alimentação. A resistência de entrada da reentrância pode ser estimada em função do comprimento da reentrância ( $y_0$ ) a partir da equação 2.18.

$$R_{in}(y = y_0) = R_{in}(y = 0) \cos^2 \left( \frac{\pi}{L} y_0 \right). \quad (2.18)$$

As reentrâncias, no entanto, inserem uma capacitância na junção que exerce uma pequena influência na frequência de ressonância, geralmente na ordem de 1% (BALANIS, 2005). À medida que a conexão da alimentação se move da borda do *patch* até o seu centro, a impedância de entrada ressonante diminui até chegar ao valor zero no centro. Ademais, quanto mais próximo do centro for a conexão da alimentação, maior a taxa de variação da resistência de entrada, de acordo com a equação 2.18.

## 2.8 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O uso de técnicas numéricas é comum para solucionar problemas que envolvem equações diferenciais parciais de resolução analítica complexa ou impossível (NORRIE e VRIES, 1978). Geralmente, as técnicas utilizadas para a simulação de antenas no domínio do tempo são: método dos elementos finitos (MEF); técnica de integração finita (WEILAND, 1977); método das diferenças finitas (YEE, 1966).

O método dos elementos finitos foi desenvolvido por Courant (1943), tendo sua primeira aplicação no eletromagnetismo em 1968 (SADIKU, 1989). A aplicação do método consiste em quatro etapas:

- **Discretização:** Subdivisão da região sob análise em formas geométricas, sendo triângulos os mais comumente utilizados. Cada elemento passa a ser considerado parte do domínio da solução do fenômeno de interesse estudado. Assim, uma aproximação é feita para determinada grandeza física em cada elemento;
- **Equacionamento:** O comportamento da grandeza física é estimado mediante modelos equacionais que regem os elementos. Com isso, as matrizes dos coeficientes para cada elemento são calculadas;
- **União dos elementos:** Um sistema de equações matriciais é criado a partir das matrizes de cada elemento;
- **Solução do sistema:** Solução do sistema de acordo com as condições de contorno pré-estabelecidas e inseridas na matriz global de coeficientes.

Uma vez realizadas as quatro etapas, a solução do sistema de equações matriciais pode ser obtida via métodos numéricos tradicionais, fornecendo valores numéricos para cada nó do sistema. Os resultados obtidos geralmente são fornecidos de forma visual, tais como gráficos, mapas de cores e linha equipotenciais.

Como nesta pesquisa a ferramenta utilizada para o projeto inicial das PMAs foi o *software* HFSS, o MEF foi apresentado, uma vez que ele é utilizado pelo HFSS para as simulações de campo eletromagnético de onda completa.

Para a análise dos sinais medidos com as antenas projetadas, uma série de técnicas estatísticas foram utilizadas no método proposto neste trabalho. Dentre elas, a análise *boxplot*, a partir da qual alguns parâmetros avaliativos foram extraídos dos bancos de dados. Assim, na próxima seção, uma descrição da análise *boxplot* é apresentada.

## 2.9 ANÁLISE *BOXPLOT*

Histogramas e diagramas de caule-e-folha fornecem uma impressão geral, em forma visual, de um conjunto de dados, enquanto que valores numéricos como a mediana e o desvio padrão fornecem informações sobre apenas um aspecto dos dados. O *boxplot*, por sua vez, exhibe graficamente e simultaneamente várias informações que caracterizam

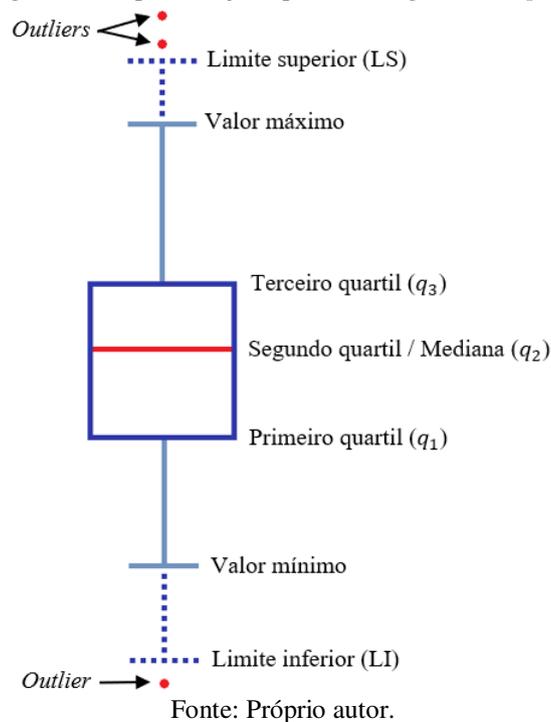
um conjunto de dados, como a mediana, espalhamento, simetria e a identificação de valores atípicos (*outliers*) (WALLPOLE *et al.*, 2012).

Um *boxplot* é definido a partir dos seguintes valores:

- **Primeiro quartil ( $q_1$ ):** Valor abaixo do qual encontram-se 25% dos valores do conjunto de dados;
- **Segundo quartil ou mediana ( $q_2$ ):** Valor abaixo do qual encontram-se 50% dos valores do conjunto de dados. Pode ser utilizado para representar o comportamento geral dos dados;
- **Terceiro quartil ( $q_3$ ):** Valor a baixo do qual encontram-se 75% dos valores do conjunto de dados;
- **Intervalo interquartil (IIQ):** Diferença entre o terceiro e o primeiro quartil ( $q_3 - q_1$ ). Pode ser interpretado como uma métrica da dispersão dos dados;
- **Limite superior (LS):** Valor acima do qual os dados são considerados *outliers*. É definido como  $(q_3 + 1,5(q_3 - q_1))$ ;
- **Limite inferior (LI):** Valor abaixo do qual os dados são considerados *outliers*. É definido como  $(q_1 - 1,5(q_3 - q_1))$ ;
- **Valor máximo:** Maior valor do conjunto de dados abaixo do limite superior;
- **Valor mínimo:** Menor valor do conjunto de dados acima do limite inferior;
- **Outlier:** Valor atípico, geralmente proveniente de erros de medição. É definido como qualquer valor acima do limite superior ou abaixo do limite inferior.

Em um *boxplot*, os valores supracitados são exibidos em orientação vertical ou horizontal. Na Figura 20, um exemplo típico de um *boxplot* é apresentado.

Figura 20: Representação típica de um gráfico *boxplot*.



De acordo com o que é apresentado na seção 5.3, dentre os valores característicos de um *boxplot*, a mediana e o IIQ se mostraram ideais para a avaliação dos sinais que compõem o banco de dados montado nesta pesquisa.

Uma das maiores contribuições do método proposto neste trabalho é a capacidade de avaliação do estado de degradação dos contatos de disjuntores de forma não invasiva. Assim, na próxima seção, um embasamento teórico para esta avaliação é apresentado.

## 2.10 NÍVEL DE DEGRADAÇÃO DOS CONTATOS & SINAIS DE RF

O método de monitoramento e diagnóstico apresentado neste trabalho é baseado na medição radiométrica dos sinais de RF produzidos por disjuntores durante suas operações de interrupção de corrente. Dentre os diversos aspectos do disjuntor, a técnica permite a avaliação do sistema mecânico, do material isolante/extintor, do circuito de acionamento e do nível de degradação dos contatos. A avaliação da degradação dos contatos consiste numa das maiores contribuições da pesquisa, visto que este tipo de estudo ainda não foi abordado em outras pesquisas.

Embora não haja referências afirmando diretamente que o estado dos contatos de arco influencia o comportamento dos arcos elétricos, ou que expliquem diretamente o fenômeno físico envolvendo este processo, existem diversas referências que servem de base teórica para a investigação.

As referências que descrevem o mecanismo de condução em dielétricos frequentemente afirmam que um dos principais fatores que afetam as características do arco elétrico são os eletrodos (NAIDU e KAMARAJU, 1996; RIZK e TRINH, 2014). O campo elétrico é um fator chave para a formação de arco elétrico. Portanto, a degradação dos eletrodos/contatos, que provoca deformações em sua superfície, irá aumentar a concentração de campo elétrico, favorecendo a formação dos arcos.

Ademais, como descrito por Bagherpoor *et al.* (2017), imediatamente antes da separação dos contatos, a densidade de corrente aumenta drasticamente, gerando um aumento de temperatura que provoca a fusão de uma pequena porção dos contatos. Esta massa derretida dos contatos (que evapora em seguida) também favorece o processo de formação de arco.

Conseqüentemente, quando os contatos estão mais degradados, deformações na sua superfície causam um aumento ainda maior da densidade de corrente pré-abertura, gerando temperaturas ainda maiores e uma quantidade ainda maior de massa fundida serve de meio condutor para o arco.

Diversas referências afirmam que as características do sinal irradiado por arcos elétricos dependem das propriedades do meio dielétrico no qual estes se formam. Assim, a quantidade de massa derretida envolvida na formação do arco, que depende do estado de degradação dos contatos, influencia no comportamento do arco (PORTUGUÉS *et al.*, 2003; FREDRICKSON, 1999; BLACK e REYNOLDS, 1965).

Neste capítulo, uma fundamentação teórica contendo os principais conceitos necessários para o entendimento do trabalho foi apresentada. Com o intuito de melhor contextualizar a pesquisa dentro do que vem sendo desenvolvido por outros pesquisadores, uma revisão bibliográfica abordando os principais trabalhos correlatos encontrados na literatura é apresentada.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como o objetivo principal desta pesquisa é o desenvolvimento de um método de monitoramento eficiente e não invasivo, baseado na análise de sinais de radiofrequência (RF), neste capítulo são apresentados os principais trabalhos com esta temática. No entanto, como o monitoramento radiométrico de disjuntores ainda é uma área de pesquisa relativamente pouco explorada, outros trabalhos que propõem diferentes abordagens também serão discutidos. Assim, será apresentado um panorama geral do que vem sendo estudado na área de monitoramento *online* de disjuntores.

Embora já existissem estudos referentes à estimativa do estado operacional de disjuntores, a partir de ondas de RF, o primeiro trabalho a apresentar uma aplicação prática e estudos de caso foi o de Moore, em 2004, em que o autor propôs uma nova técnica para avaliar somente o sistema mecânico de disjuntores a partir da medição de sinais de irradiação impulsiva de RF gerados por arcos elétricos. O sistema utilizado consistia em antenas discone, um osciloscópio para aquisição e amostragem dos dados, e um computador pessoal para processamento dos dados. As antenas utilizadas possuem um formato de cone duplo combinado com uma base de alumínio, caracterizadas por terem uma banda de operação relativamente grande e um comportamento diretivo, algo considerado ideal para a medição e localização de ruídos impulsivos. O estudo foi realizado com um disjuntor AEG S1-145, 132-kV a SF<sub>6</sub>, ao redor do qual foram colocadas quatro antenas próximas do nível do solo. O parâmetro utilizado pelo autor para fornecer o diagnóstico do disjuntor é o tempo de comutação interpolar, cujo cálculo é baseado na diferença do tempo de chegada do sinal irradiado em cada antena. A partir da comparação entre os valores teóricos e os medidos da diferença do tempo de chegada dos sinais nas antenas, a técnica apresentada é capaz de identificar a ordem de operação dos polos e o tempo de comutação interpolar. Estas mesmas informações também foram obtidas para um disjuntor idêntico ao analisado inicialmente, porém instalado a 26,7 m do mesmo. No entanto, tentativas para analisar um disjuntor a 53,4 m do inicial falharam. O método proposto se destaca por permitir o monitoramento contínuo de disjuntores, fornecendo informações sobre a variação dos parâmetros medidos ao longo do tempo. Apesar de ser um método radiométrico, a aplicação do método ainda requer a instalação de um transformador de corrente (TC) nos circuitos de controle do disjuntor para permitir o cálculo do tempo de comutação total.

Considerando que a maioria das falhas em disjuntores são de origem mecânica, Zhensheng *et al.*, em 2005, apresentaram uma nova abordagem para a avaliação de sistemas mecânicos de disjuntores de alta tensão, baseada na medição de vibração. Para monitorar a vibração de disjuntores, os autores propuseram a utilização de sensores piezoelétricos, que convertem a vibração do equipamento (durante operações de abertura e fechamento) em sinais elétricos que são gravados a uma frequência de amostragem de 50 Hz por um osciloscópio. O processamento destes sinais é feito mediante aplicação da transformada *wavelet* para obter os parâmetros dos sinais de vibração baseando-se na teoria fractal. Estudos de caso foram realizados com amostras de disjuntores com boas condições de operação e disjuntores com mecanismos de acionamento defeituosos. Os sinais medidos foram processados com o algoritmo desenvolvido e, a partir de comparações com informações de referência, o método proposto foi validado. Os autores constaram que existem fenômenos com características fractais em sinais de vibração de disjuntores, e que a partir da análise da similaridade dos sinais, a transformada *wavelet* pode ser utilizada para obter as curvas de dimensão fractal locais. Estas curvas mantêm-se estáveis e semelhantes entre si para mecanismos de acionamento em boas condições operacionais. Por outro lado, disjuntores com mecanismos de acionamento defeituosos resultam em curvas de dimensão fractal com um formato bastante diferente das supracitadas, embora sejam reproduzíveis caso o mecanismo não seja modificado.

Em 2005, Chapman *et al.* propuseram um novo método não invasivo para a medição direta da duração de arcos elétricos durante operações de interrupção de corrente em disjuntores. O método baseia-se no acoplamento de campos elétricos de alta frequência gerados pelo arco. Para realizar as medições, os autores utilizaram um sensor de campo elétrico que funciona como um divisor de tensão capacitivo. O mesmo consiste em um plano de terra (aterrado) e um disco posicionado paralelamente à superfície do solo e alimentado por uma conexão BNC. Os sinais medidos são enviados para um amplificador de banda larga (5 – 400 MHz) com o objetivo de levar o sinal a um nível apropriado para a etapa de demodulação por detecção de envoltória. Uma vez demodulado, o sinal atinge frequências relativamente baixas (na ordem de 30 kHz) e pode ser transmitido para um dispositivo de gravação via cabo coaxial ou fibra óptica. Ensaios foram realizados em um disjuntor a SF<sub>6</sub> instalado em uma câmara fechada, com tensão nominal de 24 kV e corrente nominal de 630 A. Medições foram realizadas utilizando a própria câmara metálica em que o disjuntor encontrava-se instalado como plano de terra e também utilizando uma placa metálica aterrada. Apesar de eficaz, o método proposto

apresenta algumas limitações. Embora a duração do arco seja algo facilmente perceptível para uma pessoa, nenhum sistema automático foi implementado para calcular este parâmetro. A depender do sistema de amplificação do sinal, é possível que a potência do sinal seja reduzida a nível baixo durante o período de menor instabilidade do arco, fazendo com que resultados errôneos sejam apresentados. O método se mostra um pouco susceptível a irradiações espúrias, embora interferências de curta duração possam ser removidas mediante algoritmos de detecção. Interferências provenientes de arcos ou outras fontes de interferência de maior duração também podem introduzir erros no sistema de medição. Os autores também realizaram um estudo com um cilindro metálico encapsulando cada uma das câmaras de extinção do disjuntor, de modo a fornecer uma blindagem à passagem direta dos campos elétricos entre os polos e, com isso, obtiveram um bom nível de atenuação da interferência interpolar.

O método desenvolvido por Hoidalén *et al.*, em 2005, é destinada a avaliação da parte mecânica de disjuntores a partir da medição da vibração durante as operações de abertura/fechamento. Os autores propuseram a utilização de acelerômetros instalados diretamente no mecanismo de acionamento, a uma curta distância do eixo principal. Um polímero termofixo rígido foi utilizado na instalação dos sensores, evitando ruídos por acoplamento capacitivo, mas mantendo a transferência de vibração mecânica. Para a avaliação do sistema desenvolvido, os autores realizaram medições durante três anos, analisando o padrão de vibração obtido em mais de 1000 medições, em três diferentes disjuntores a SF<sub>6</sub>. A detecção de falhas ocorreu por meio da identificação de variações dos sinais de vibração em relação aos seus respectivos padrões de referência. Com a detecção prévia de um defeito em um dos disjuntores analisados, a eficácia da técnica foi comprovada. Embora o sistema de medição seja pouco influenciado por condições climáticas e ruídos acústicos, interferências eletromagnéticas podem comprometer a acurácia do método.

Em 2008, Ramli *et al.* apresentaram um método não invasivo para medição de sinais de tensão de alta e baixa frequência durante operações de chaveamento com disjuntores. O sistema de medição proposto consiste na combinação de uma antena ativa e três antenas passivas. A antena ativa é composta por um dipolo passivo e um amplificador de RF projetado para uma resposta de frequência de 1,5 – 1500 MHz, proporcionando um ganho de 12 dB. O amplificador atua como um transformador de impedância, convertendo a alta impedância de saída do dipolo nas frequências mais baixas para uma baixa impedância de saída. Nas frequências mais altas o amplificador de

RF atua apenas amplificando o sinal recebido. As antenas passivas, por outro lado, são construídas com cilindros metálicos fechados nas extremidades, que atuam como um divisor potencial capacitivo. Os sinais medidos pelas antenas passivas são enviados para um osciloscópio de 100 MHz, usado para gravar os sinais transitórios de baixa frequência. A antena ativa, conectada a outro osciloscópio com alta taxa de amostragem, tem como finalidade o gatilhamento e atuar como marcador de alta frequência. Os autores investigaram a aplicabilidade do método realizando medições em um disjuntor a SF<sub>6</sub> de 275 kV, utilizado para o chaveamento de bancos de capacitores. A partir da superposição dos sinais de tensão de cada fase, medidos com as antenas passivas, com os pulsos de tensão medidos com a antena ativa, é possível a identificação precisa da sequência de fechamento dos polos, bem como a temporização desta operação. O disjuntor analisado possui transdutores de tensão capacitivos e bobinas de Rogowski pré-instalados, que forneceram resultados bastante semelhantes aos obtidos com o sistema proposto nesse trabalho. Os autores também realizaram uma análise semelhante para o chaveamento de um reator de derivação. Durante as operações de fechamento, foi possível identificar os tempos de comutação interpolar a partir das marcações de alta frequência fornecidas pela antena ativa. Durante operações de abertura, foi possível identificar o intervalo de tempo entre as interrupções de corrente em cada polo a partir da comparação da amplitude dos sinais medidos. Embora o método proposto se destaque pela acurácia dos resultados obtidos, atestada por meio de comparações com os sinais gerados por sensores pré-instalados, o método ainda se limita a avaliação apenas do sistema mecânico do disjuntor.

Em 2011, Meier *et al.* apresentaram um novo método de monitoramento radiométrico para disjuntores instalados em subestações isoladas a gás. O método baseia-se na ocorrência de eventos característicos do processo de formação de arcos elétricos, como a ignição e extinção do arco, que podem ser identificados devido à emissão de pulsos eletromagnéticos. Além de permitir o monitoramento contínuo do equipamento, o sistema desenvolvido se destaca por um processo de instalação que não requerer acesso interno à subestação isolada e não provoca interrupções prolongadas. Os sensores utilizados para medir os sinais irradiados são antenas de banda larga, construídas com dois discos de alumínio isolados por PVC. Considerando que as dimensões da antena são limitadas de acordo com o tamanho das janelas dielétricas nas quais são instaladas, só restou ao autor a opção de ajustar o espaçamento entre as placas de alumínio para que a antena possuísse a frequência de ressonância desejada. Além da instalação de uma

antena para cada fase, um TC (tipo núcleo dividido) foi instalado em um cabo para monitorar o pulso de disparo e, com isso, atuar como gatilho do osciloscópio, onde os sinais são amostrados e transferidos para uma unidade de armazenamento. Embora a identificação do polo de origem de cada sinal irradiado seja dificultada devido ao acoplamento interpolar, um algoritmo foi desenvolvido para realizar a alocação de fase de acordo com o tempo de chegada dos sinais em cada antena e, caso a amplitude do pulso inicial seja insuficiente para que os intervalos entre os tempos de chegada sejam detectados, uma lógica de alocação de fase de acordo com a amplitude é implementada, cujo funcionamento baseia-se no fato de que a antena cuja fonte do sinal irradiado estiver mais próxima, receberá o mesmo de forma menos atenuada. Em suma, a técnica desenvolvida se destaca por sua característica minimamente invasiva, por permitir que as medições sejam realizadas com o disjuntor em serviço, ser de fácil instalação e por proporcionar o monitoramento de parâmetros importantes para a avaliação do estado operacional do equipamento, tais como a duração de arco e o intervalo de tempo entre pulso de disparo e formação de arco. Contudo, a eficácia do método depende das posicionamento e dimensões das janelas dielétricas pré-instaladas.

Em 2011, Melli *et al.* desenvolveram um sistema para o monitoramento *online*, aplicável a diversos tipos de disjuntores. A partir da utilização de múltiplos sensores, o sistema é capaz de fornecer diversas informações, tais como densidade do SF<sub>6</sub>, umidade, temperatura, deslocamento dos contatos e nível de tensão das baterias. Assim, permitindo a avaliação do estado de várias partes do equipamento e, conseqüentemente, possibilitando prever falhas eminentes e detectar possíveis defeitos. De modo geral, o sistema consiste em um computador local e um remoto para processamento e análise dos sinais medidos, alarmes e lâmpadas para indicação de erros, e o sistema de monitoramento do disjuntor. Este último pode ser considerado um sistema robusto, visto que pode operar em uma ampla faixa de temperatura (-20°C a 60°C) e de umidade relativa (0 – 95%). Ademais, o sistema possui boa imunidade a interferências eletromagnéticas e todos os seus módulos possuem resistência a impacto e a vibração de acordo com as normas IEC 68 2-27 e IEC 68 2-64, respectivamente. A placa de aquisição é instalada no mesmo invólucro que o computador local. Os módulos são instalados no cubículo do sistema mecânico de acionamento ou em um cubículo adicional instalado ao lado deste. Através da placa de aquisição, todos os dados obtidos são armazenados na memória do computador local, onde, a partir de comparações com valores de limiar, uma avaliação do estado do disjuntor é obtida. De acordo com o resultado destas avaliações, alarmes ou

lâmpadas de erro são acionados. Por meio de uma interface gráfica no computador remoto, um usuário pode ter acesso aos dados medidos, resultados das análises, pode imprimir diversos tipos de relatórios ou até mesmo configurar o sistema de monitoramento. Embora o sistema tenha sido testado apenas em um disjuntor a SF<sub>6</sub>, o autor afirma que ele também pode ser instalado em outros modelos mediante pequenos ajustes. O sistema proposto possibilita a redução de custos com manutenção a longo prazo. No entanto a eficiência do sistema requer uma otimização de custo e de compatibilidade dos componentes.

Similarmente ao trabalho de Melli *et al.* (2011), Andrusca *et al.*, em 2012, desenvolveram um sistema de monitoramento *online*, que mede, transfere e processa informações sobre o disjuntor sob análise. Complementarmente, os autores criaram um aplicativo com o *software* LabVIEW que permite a visualização de formas de ondas dos parâmetros analisados, gerar alarmes em caso de detecção de defeitos, gerar relatórios, dentre outras funções. Um sistema de processamento de sinais baseado em transformada *wavelet* também foi utilizado para redução de ruídos e reconhecimento de padrões, a fim de extrair informações como o deslocamento dos contatos móveis, velocidade dos contatos móveis, as correntes em cada fase, correntes nas bobinas de abertura e fechamento, e tensão de operação. Em suma, o sistema desenvolvido é capaz de proporcionar: detecção de defeitos em seu estado inicial, evitando falhas graves e os prejuízos financeiros associados; aumento da confiabilidade e disponibilidade do sistema; aumento da eficiência e qualidade dos serviços de manutenção em caso de falhas; redução de custos com inspeções e revisões técnicas do equipamento; aumento da segurança de técnicos/operadores; obtenção de um banco de dados com o histórico de falhas e da condição operacional do disjuntor. Entretanto, a otimização de custos e de compatibilidade entre os componentes e o disjuntor analisado não é complexo e, caso não for feita corretamente, pode comprometer a eficácia do método.

A técnica de monitoramento desenvolvida por Lopez-Roldan *et al.*, em 2014, consiste na aplicação de uma combinação de uma antena ativa de alta frequência e três antenas passivas de baixa frequência. A antena ativa se trata de uma antena dipolo combinada com um amplificador RF de banda-larga, e as antenas passivas são sensores capacitivos de campo elétrico fabricados a partir de um cilindro metálico fechado nas extremidades e montado sobre um tubo isolante plástico. Este sistema de medição se provou mais adequado para o uso em disjuntores do tipo *deadtank*. No entanto, outro sistema de medição também foi avaliado, sendo composto por quatro antenas de ultra alta

frequência ou UHF (do inglês *ultra high frequency*), mais adequado para o uso em disjuntores do tipo *livetank*. No trabalho, os autores destacam a aplicação em campo durante a abertura e fechamento de reatores de derivação e bancos de capacitores. Os parâmetros utilizados para a avaliação do disjuntor são: ocorrência de reignições; tempo de abertura/fechamento dos contatos; tempo de fechamento de resistores de pré-inserção; perda de rigidez dielétrica; desempenho do sistema de chaveamento controlado. Dentre todos os trabalhos contidos nesta revisão bibliográfica, este se destaca por ter sido o mais explorado em campo, aplicando diferentes sistemas de medição em diferentes tipos de disjuntores.

Em 2014, Mustafa *et al.* apresentaram um método para o monitoramento radiométrico de disjuntores de alta tensão, semelhante aos que foram desenvolvidos por Moore *et al.* (2004) e Ramli *et al.* (2008), porém utilizando outros tipos de sensores e aplicando transformada *wavelet* durante a etapa de processamento dos sinais medidos. O sistema de monitoramento proposto consiste de uma combinação de quatro antenas passivas. Destas, três são antenas de acoplamento capacitivo, fabricadas com cilindros de alumínio fechados nas extremidades, com o objetivo de obter informações de fenômenos em frequências mais baixas. A quarta antena, do tipo dipolo, tem como finalidade fornecer marcadores de alta frequência para os sinais de baixa frequência medidos, além de fornecer um sinal de gatilho para o osciloscópio digital (1 GHz). Para verificar a eficiência do método, os autores realizaram medições em um disjuntor a SF<sub>6</sub> com tensão nominal de 245 kV e utilizado para o chaveamento de bancos de capacitores. Devido à diferença de amplitude dos sinais medidos com as antenas cilíndricas, estes foram normalizados, o que não prejudicou a identificação dos tempos de fechamento/abertura dos polos. O tempo de comutação interpolar (durante a abertura e fechamento dos contatos), parâmetro utilizado para avaliar o sistema mecânico do disjuntor, foi obtido a partir da análise do sinal medido com a antena dipolo. Reforçando a afirmação feita por Moore (2004), os autores constataram que, para chaveamentos em bancos de capacitores, os sinais medidos durante a abertura dos contatos são sempre de menor amplitude que aqueles gerados durante operações de fechamento, o que pode gerar erros de medição causados por falhas no gatilhamento do osciloscópio. A aplicação da transformada *wavelet* para a decomposição dos sinais medidos facilitaram a identificação dos instantes de fechamento dos contatos para cada fase. Embora tenha gerados bons resultados, o método proposto pode apresentar falhas a depender do tipo de carga chaveada.

Em 2015, Li *et al.* apresentaram um novo método de monitoramento de temperatura para os contatos de disjuntores, utilizando um sistema de comunicação sem fio. O sistema de monitoramento proposto é composto por sensores de temperatura, um módulo de interface sem fio e um computador remoto. Os sensores de temperatura compostos de resistores térmicos NTC (do inglês: *negative temperature coefficient*) possuem um rápido tempo de resposta, alta sensibilidade e estabilidade, além de operarem numa faixa de temperatura de  $-40 - 300^{\circ}\text{C}$ . Uma interface RS-485 é utilizada para transmitir os sinais medidos via ondas de rádio para um computador remoto. Todo o sistema de transmissão de dados e os microprocessadores são alimentados por uma bateria, portanto, para que o sistema tenha um bom tempo de vida útil, tais componentes foram otimizados para apresentarem um baixo consumo de energia. O baixo consumo do microprocessador foi obtido via *software*, ativando um modo de economia de energia. Este modo é desativado a cada quatro minutos para que o microprocessador realize a amostragem de um conjunto de dados, ative o módulo de transmissão de dados e, em seguida, volte para o modo de economia de energia. Deste modo, o autor estima que o sistema desenvolvido possa ficar em serviço por até 10 anos. Ademais, uma interface homem-máquina simples e de fácil utilização foi criada no computador remoto. Embora o trabalho forneça uma grande contribuição para a área de monitoramento, a avaliação realizada é limitada aos contatos dos disjuntores. Ademais, o aquecimento pode não ser suficiente para possibilitar a detecção de todos os tipos de defeitos que ocorrem nos contatos.

Em 2016, Mustafa *et al.* deram continuidade ao trabalho apresentado por Mustafa *et al.* 2014, analisando a aplicabilidade do sistema desenvolvido para o monitoramento de um disjuntor a SF<sub>6</sub> utilizado para o chaveamento de um reator de derivação de 25 MVar. Para uma análise detalhada do disjuntor, os sinais provenientes dos arcos elétricos em cada fase foram descritos no domínio do tempo e da frequência. Para este propósito, a transformada *wavelet* foi utilizada. Deste modo, foi possível identificar facilmente o instante de fechamento de cada fase, bem como a sequência de fases. Diferentemente dos resultados obtidos para o fechamento do disjuntor, os sinais medidos durante as operações de abertura não são facilmente identificados. No entanto, a partir da decomposição dos sinais utilizando a *wavelet* Meyer, foi possível a identificação dos instantes de abertura em cada fase. Este trabalho se destaca por demonstrar como técnicas de processamento de sinais podem ser fundamentais para a obtenção de um diagnóstico mais eficiente.

Com o objetivo de verificar se os métodos de monitoramento radiométrico de disjuntores estão de acordo com métodos tradicionais, Kuhlmann *et al.*, em 2017, apresentaram um estudo comparativo entre os sinais medidos em campo via radiometria e sinais obtidos via simulações computacionais. Para tanto, os autores criaram, de acordo com padrões internacionais, um modelo computacional de parte de um sistema de transmissão utilizando o *software ATP/ATPDraw*, permitindo estudar a TRT durante operações de abertura dos contatos do disjuntor. Complementarmente, um modelo de arco elétrico foi adicionado à simulação. Este modelo consiste de uma chave em paralelo com outra chave conectada em série com um resistor. Estes componentes são controlados por modelos de rotina baseados nas equações de Cassie-Mayr. Para as medições em campo, foi utilizado um sistema de medição semelhante ao que foi desenvolvido por Moore *et al.* (2004). A partir dos resultados obtidos, os autores observaram que, durante operações de abertura, enquanto os contatos ainda mantêm contato galvânico, não há diferença de potencial entre os contatos na simulação. Porém, as medições em campo apresentaram sinais de tensão na mesma frequência do sistema (60 Hz). Analogamente, após a separação dos contatos, a simulação mostrou apenas a tensão de arco, enquanto que as medições em campo apresentaram a tensão de arco somadas as tensões de linha, uma vez que o fluxo de corrente não foi ainda interrompido. Após a extinção do arco e a completa interrupção de corrente, os resultados das medições se referem apenas a TRT, enquanto que as simulações apresentaram a tensão de linha em conjunto com a TRT. Segundo os autores, as diferenças entre os resultados dos métodos se devem, parcialmente, ao fato de que as medições com as antenas se baseiam na presença do campo elétrico, portanto, níveis menores de tensão são observados devido à distância entre as antenas e a linha. Por fim, o autor afirma que a metodologia radiométrica é confiável, visto que as medições de duração de arco obtidas foram bastante similares às obtidas via simulação, com uma pequena margem de erro ocasionada, provavelmente, por variáveis mecânicas não consideradas nas simulações. Embora as comparações com resultados de simulações sejam uma boa ferramenta de avaliação, outras análises devem ser realizadas para atestar a aplicabilidade dos métodos de monitoramento radiométrico.

A partir da revisão bibliográfica apresentada, verifica-se que a temática na qual se insere a presente tese vem sendo abordada a relativamente pouco tempo, de modo que novos estudos são essenciais para o aperfeiçoamento das técnicas de monitoramento radiométrico já existentes, ou até mesmo para o desenvolvimento de métodos alternativos de medição e processamento de dados, obtendo informações mais completas e precisas

sobre o estado operacional de disjuntores. Além disso, observa-se que o método proposto, baseado na medição de sinais de RF irradiados, acompanha a tendência de evolução do estado da arte sobre o tema.

Ademais, com esta revisão bibliográfica, constata-se que, apesar de existirem diversos métodos de monitoramento *online* para disjuntores em estudo, a maioria são limitados a avaliação de apenas um aspecto do estado operacional. Assim, o método proposto nesta tese se destaca por utilizar um novo tipo de sensor otimizado (PMAs bioinspiradas) e por possibilitar a avaliação simultânea de diversos aspectos do disjuntor, como o sistema mecânico, o material isolante/extintor, o circuito de acionamento e, principalmente, o estado de degradação dos contatos, algo que até então não havia sido realizado via métodos radiométricos.

De modo a sintetizar as principais contribuições dos trabalhos supracitados, na Tabela 2, são apresentados os aspectos do disjuntor avaliados por cada um dos trabalhos, bem como da presente tese de doutorado.

Tabela 2: Resumo dos principais trabalhos e suas respectivas contribuições.

Trabalho	Abordagem de medição	Aspecto avaliado			
		1	2	3	4
Moore (2004)	Antenas discone	X			
Zhensheng <i>et al.</i> (2005)	Sensores piezoelétricos	X			
Chapman (2005)	Sensor de acoplamento capacitivo	X			
Hoidalen <i>et al.</i> (2005)	Acelerômetros	X			
Ramli <i>et al.</i> (2008)	Antena dipolo e antenas passivas	X			
Meier <i>et al.</i> (2011)	Antenas de disco	X		X	
Melli <i>et al.</i> (2011)	Múltiplos sensores	X	X	X	
Andrusca <i>et al.</i> (2012)	Múltiplos sensores	X		X	
Mustafa <i>et al.</i> (2014)	Antenas de acoplamento capacitivo e dipolo	X			
Lopez-Roldan <i>et al.</i> (2014)	Múltiplos sensores	X	X	X	
Li <i>et al.</i> (2015)	Sensores de temperatura				X
Mustafa <i>et al.</i> (2016)	Antenas de acoplamento capacitivo e dipolo	X			
Kuhlmann <i>et al.</i> (2017)	Antenas discone	X			
<b>Este trabalho</b>	PMAs	X	X	X	X

1. Sistema mecânico;
2. Material isolante/extintor;
3. Circuito de acionamento;
4. Nível de degradação dos contatos.

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo, os procedimentos para a realização da presente pesquisa são apresentados. De modo geral, a pesquisa pode ser dividida nas seguintes etapas: projeto do sistema de monitoramento; realização de experimentos em laboratório; desenvolvimento e teste da técnica de classificação; comparação dos resultados obtidos com técnicas de referência; aperfeiçoamento do sistema de medição; realização de experimentos em campo. Nas subseções a seguir, cada etapa da pesquisa, ilustrada no diagrama da Figura 21, será descrita detalhadamente.

Figura 21: Diagrama de blocos representativo da metodologia proposta.



Fonte: Próprio autor.

### 4.1 ARRANJO EXPERIMENTAL

Para realização dos ensaios de medição radiométrica e aplicação da técnica de referência (MRD), um arranjo experimental desenvolvido por SOUZA *et al.* (2014) foi montado em laboratório. Os principais componentes deste arranjo são:

- Disjuntor a pequeno volume de óleo (PVO) de média tensão, modelo 3AC2711-4, fabricado pela Siemens e com tensão e corrente nominal de 15 kV e 800 A, respectivamente;
- Sistema de injeção de corrente composto por uma bateria estacionária (12 V / 220 Ah) associada em série com um resistor ajustável de cromo-alumínio-ferro (0,040 – 1,2  $\Omega$  / 4 kW). Este sistema é capaz de fornecer uma corrente contínua de teste de até 300 A;

- Sistema de medição composto por um *shunt* de corrente (500 A / 60 mV), um transdutor de tensão (60 mV / 5 V) e um osciloscópio digital de 4 canais, modelo MDO4104B, com frequência de amostragem de 2,5 GS/s. Este sistema possibilita a medição de tensão e corrente necessário para aplicação da MRD, bem como a medição de sinais de tensão com alta taxa de amostragem, adequada para a aquisição dos sinais obtidos com as PMAs.

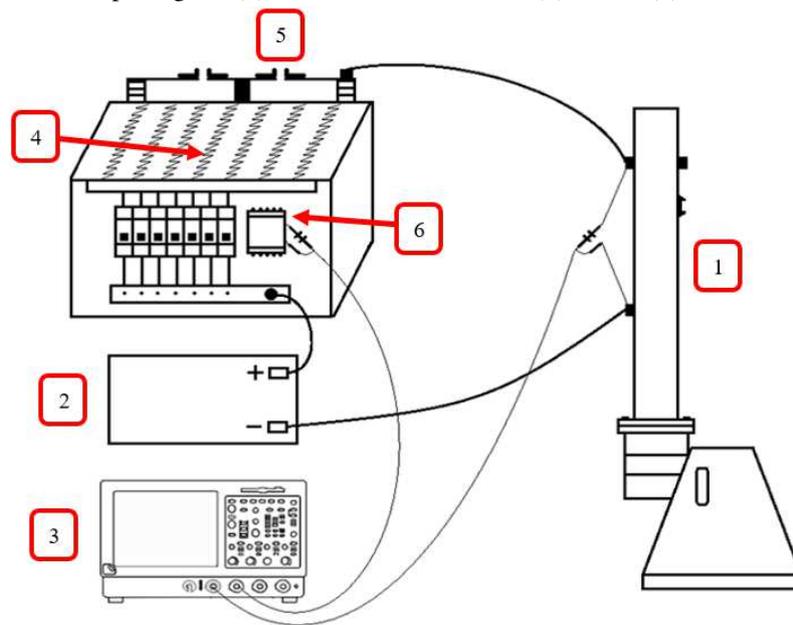
Na Figura 22, uma fotografia do arranjo de ensaio montado em laboratório é apresentada. Para facilitar a identificação dos componentes e suas interconexões, uma ilustração simplificada do arranjo é apresentada na Figura 23.

Figura 22: Arranjo experimental. (1) Disjuntor PVO; (2) Bateria estacionária; (3) Osciloscópio digital; (4) Resistores de Cr-Al-Fe; (5) *Shunt*; (6) Transdutor.



Fonte: Próprio autor.

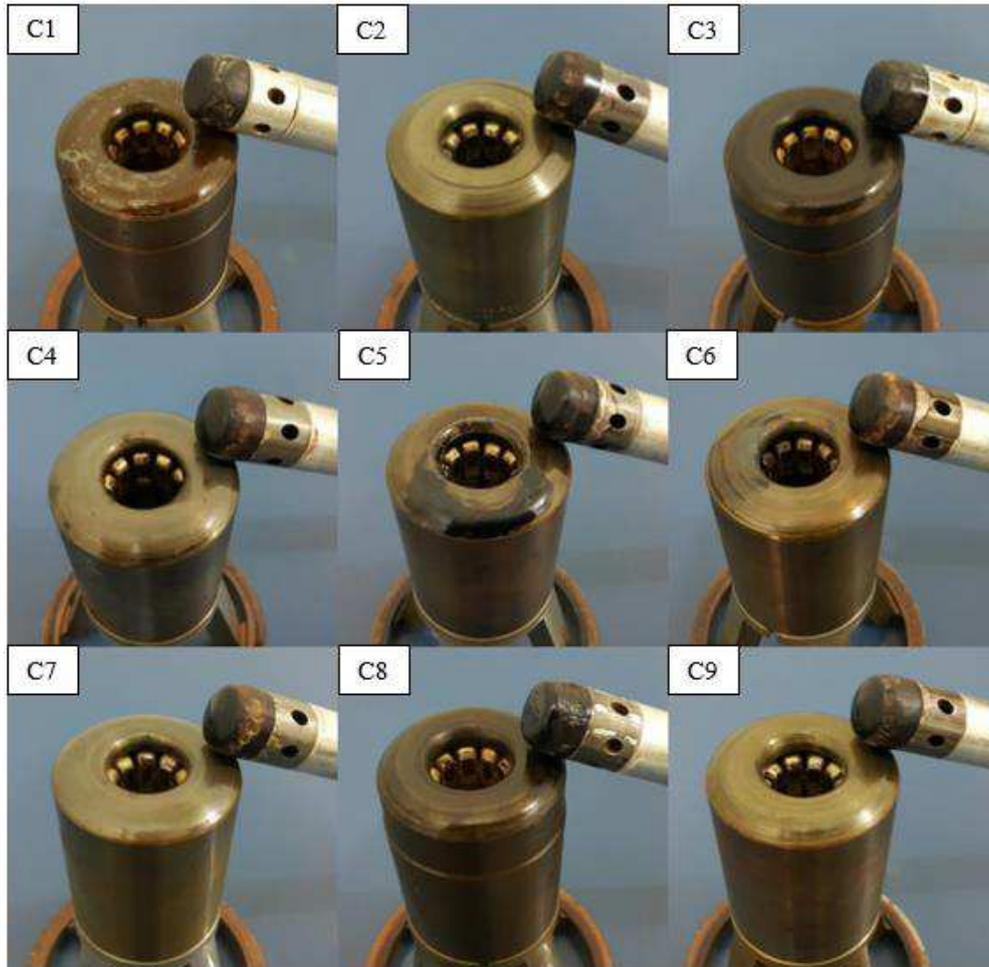
Figura 23: Ilustração do arranjo experimental. (1) Disjuntor PVO; (2) Bateria estacionária; (3) Osciloscópio digital; (4) Resistores de Cr-Al-Fe; (5) *Shunt*; (6) Transdutor.



Fonte: Próprio autor.

Um dos objetivos desta pesquisa é desenvolver uma técnica de monitoramento capaz de avaliar o nível de degradação dos contatos de disjuntores. Sendo assim, o uso de diversas amostras de contatos se fez necessário para fins de comparação. Na Figura 24, fotografias das nove amostras de contatos utilizadas nesta pesquisa são apresentadas. Entre estas, existem amostras relativamente novas (com baixo nível de degradação), amostras extremamente degradadas e amostras com níveis intermediários de degradação. Os desgastes das amostras de contato foram provocados naturalmente durante o seu tempo de uso em campo, ou seja, devido à ação da corrente de carga, de esforços mecânicos (atrito) e, principalmente, à ação de arcos elétricos. Na seção de resultados, é apresentada a classificação destes contatos quanto ao nível de degradação.

Figura 24: Amostras de contatos com diferentes níveis de degradação.



Fonte: Próprio autor.

## 4.2 PROJETO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

Para projetar o sistema de medição da técnica proposta, uma análise prévia dos sinais irradiados por arcos elétricos na câmara de extinção de disjuntores se fez necessária. Para tanto, utilizando o arranjo descrito na seção 4.1, arcos elétricos foram produzidos durante a interrupção de correntes elétricas de aproximadamente 300 A. Para analisar as características espectrais dos sinais irradiados, uma antena direcional log-periódica de banda larga (10 – 1000 MHz) foi utilizada (Figura 25), sendo posicionada de modo a operar na região de campo distante, de acordo com a equação 2.3. Os sinais medidos com a antena e armazenados no osciloscópio foram exportados para um computador pessoal, no qual os sinais foram analisados. A faixa de frequência predominante dos sinais irradiados durante operações do disjuntor é uma informação essencial para o projeto do sistema de medição.

Figura 25: Antena direcional log-periódica.



Fonte: Próprio autor.

O sistema de medição do método proposto nesta pesquisa consiste em PMAs. O projeto destas antenas foi feito com o auxílio do *software* ANSYS HFSS (do inglês: *High Frequency Structure Simulator*). O HFSS foi escolhido devido a sua múltipla funcionalidade, facilidade de uso e amplo destaque na literatura, sendo aplicado em diversos trabalhos relacionados à simulação de antenas, tais como os de trabalhos de Ju *et al.* (2007), Hwang *et al.* (2011) e Luo *et al.* (2016).

A partir de simulações utilizando o método dos elementos finitos, o HFSS é capaz de fornecer informações referentes aos parâmetros descritos na seção 2.6 na forma de gráficos (em escala polar ou retangular), mapas de cores, linhas equipotenciais e animações.

As simulações no HFSS foram realizadas de acordo com as seguintes etapas:

- **Definição da estrutura da antena:** Os parâmetros dimensionais da antena, tais como largura e comprimento do *patch*, comprimento da linha de alimentação e altura do substrato são definidos de acordo com a teoria apresentada nas seções 2.7.3, 2.7.4 e 2.7.5. Considerando que os resultados obtidos via simulação dificilmente coincidem com os valores teóricos, os parâmetros dimensionais foram definidos no HFSS como variáveis, de modo a facilitar os ajustes para se obter um comportamento da antena o mais próximo possível do desejado;
- **Definição dos materiais:** Atribui-se um material para todos os elementos da antena, projetados na etapa anterior. Todos os tipos de materiais necessários

para o projeto, tais como fibra de vidro (FR4) e cobre, foram encontrados no banco de dados do HFSS;

- **Definição das condições de contorno:** Uma região ao redor da antena, chamada de caixa de irradiação, é definida, de modo que a irradiação incidente sobre a antena seja absorvida e não ocorram reflexões de retorno. Nesta pesquisa, implementou-se uma caixa de irradiação com um espaçamento de  $\lambda/4$  (da frequência central) das extremidades da antena;
- **Definição da excitação da antena:** Uma fonte de excitação, denominada *lumped port*, é definida para excitar toda a estrutura projetada. Este elemento da simulação também deve ter sua impedância selecionada adequadamente de modo a proporcionar um resultado preciso e confiável;
- **Configuração do processo de análise:** São definidas as configurações do HFSS para a etapa de solução do sistema de equações diferenciais associada à aplicação do método dos elementos finitos para a estrutura criada. Dentre as configurações definidas, encontram-se a frequência de solução, número de passos, faixa de frequência e o tipo de varredura.

Uma vez obtidos resultados satisfatórios na etapa de simulação, as antenas foram fabricadas utilizando placas de circuito impresso dupla face de fibra de vidro (FR4), com espessura de aproximadamente 1,58 mm. Como o formato do *patch* e do plano de terra da antena proposta são relativamente simples, as PMAs foram fabricadas por meio de um processo de corrosão com percloro de ferro, protegendo os elementos condutores com uma máscara adesiva. Por fim, um conector SMA foi soldado na extremidade de linha de alimentação (linha de microfita) para possibilitar a conexão da antena com cabos coaxiais.

Para verificar a validade dos resultados obtidos via simulação, um analisador de rede, tal como o apresentado na Figura 26, foi utilizado para medir os valores de coeficiente de reflexão e largura de banda das antenas fabricadas. E para realizar um estudo referente ao posicionamento das antenas ao redor do disjuntor, duas antenas com características idênticas foram fabricadas.

Figura 26: Analisador de rede.



Fonte: Keysight Technologies.

Para garantir a aplicabilidade das antenas, um processo de calibração por campo uniforme se fez necessário. A relação quantitativa entre a intensidade de campo elétrico e a saída de tensão nos terminais da antena pode ser expressa a partir do fator de antena ou AF (do inglês: *antenna factor*), que é matematicamente definido por (PAUL, 1992):

$$AF = \frac{E_{incidente}}{V_a}. \quad (4.1)$$

O AF representa a proporção entre a tensão induzida nos terminais da antena ( $V_a$ ) e o campo elétrico incidente ( $E_{incidente}$ ). Portanto, valores menores de AF, bem como menores flutuações deste valor ao longo da faixa de operação da antena são desejáveis.

Neste trabalho, a calibração da antena foi realizada com um campo elétrico gerado dentro de uma câmara anecoica. O campo gerado possui grande uniformidade e reprodutibilidade na região desejada. Assim, experimentos foram conduzidos para se medir o AF em diferentes frequências.

O arranjo experimental utilizado para a determinação do AF é apresentado na Figura 27. O gerador de sinais (R&S SMB 100A), conectado à câmara anecoica como fonte de excitação, modulou as frequências necessárias e a intensidade do campo elétrico (1 V/m). A antena foi posicionada no centro da área de teste. Os sinais medidos foram enviados para um receptor R&S ESPI através de um cabo coaxial de 50  $\Omega$ . Durante o experimento, os sinais de saída foram medidos nas frequências de 200 MHz a 600 MHz (com passo de 0,8 MHz).

Figura 27: Arranjo experimental para medição do AF em uma câmara anecoica.



Fonte: Próprio autor.

## 4.3 TÉCNICAS DE MINIATURIZAÇÃO

### 4.3.1. GEOMETRIA BIOINSPIRADA

A frequência de operação das PMAs está diretamente relacionada com o perímetro do *patch*. Quanto maior o perímetro, menor a frequência de operação. Portanto, técnicas de miniaturização aplicadas às PMAs têm como principal objetivo a otimização da geometria do *patch*, de modo que a relação perímetro/área seja maximizada. As geometrias otimizadas podem ser observadas nas formas de diversos seres vivos encontrados na natureza, cujo desenvolvimento proporcionou uma maior eficiência quanto suas capacidades de sobreviver. Assim, com o objetivo de obter uma melhor eficiência de irradiação, antenas bioinspiradas utilizam as formas de plantas ou animais como base para seu projeto.

Uma vez projetada, fabricada e testada, a PMA retangular apresentada nas seções anteriores teve o *patch* adaptado de modo a apresentar uma geometria otimizada baseada na folha *Acer Macrophyllum* (Figura 28), comumente conhecida como *Maple Leaf*, representada na bandeira do Canadá. Para esta geometria, parâmetros de simulação no HFSS foram criados para representar as dimensões de partes do *patch*, como a largura, comprimento e angulação de cada parte da folha. Desta forma, a alteração do formato do *patch* é facilitada, permitindo a análise da influência de cada parâmetro no desempenho da antena.

Figura 28: Folha da *Acer Macrophyllum*.



Fonte: (MESSENGER, 2018).

#### 4.3.2. GEOMETRIA FRACTAL

Alternativamente às geometrias bioinspiradas, a miniaturização das PMAs também foi obtida neste trabalho a partir da utilização de geometrias fractais no *patch*. Geometrias fractais referem-se a objetos construídos recursivamente, em que um aspecto do objeto limite é infinito enquanto outro é finito, e onde em qualquer iteração, alguma parte do objeto é uma versão em escala reduzida do objeto na iteração anterior (MANDELBROT, 1991).

As características de preenchimento de espaço tornam as geometrias fractais ideais para a aplicação nas PMAs desenvolvidas, visto que essa propriedade proporciona a miniaturização das dimensões da antena (PUENTE *et al.*, 1998).

A dimensão fractal ( $D$ ) é um parâmetro característico de um elemento fractal, que representa o quão densamente este elemento ocupa o espaço em que ele existe. De acordo com a propriedade da auto-similaridade, a dimensão fractal é definida por:

$$D = \frac{\log(N)}{\log(1/r)}, \quad (4.1)$$

em que  $N$  é o número total de cópias distintas do elemento original e  $1/r$  é o fator de escala da redução.

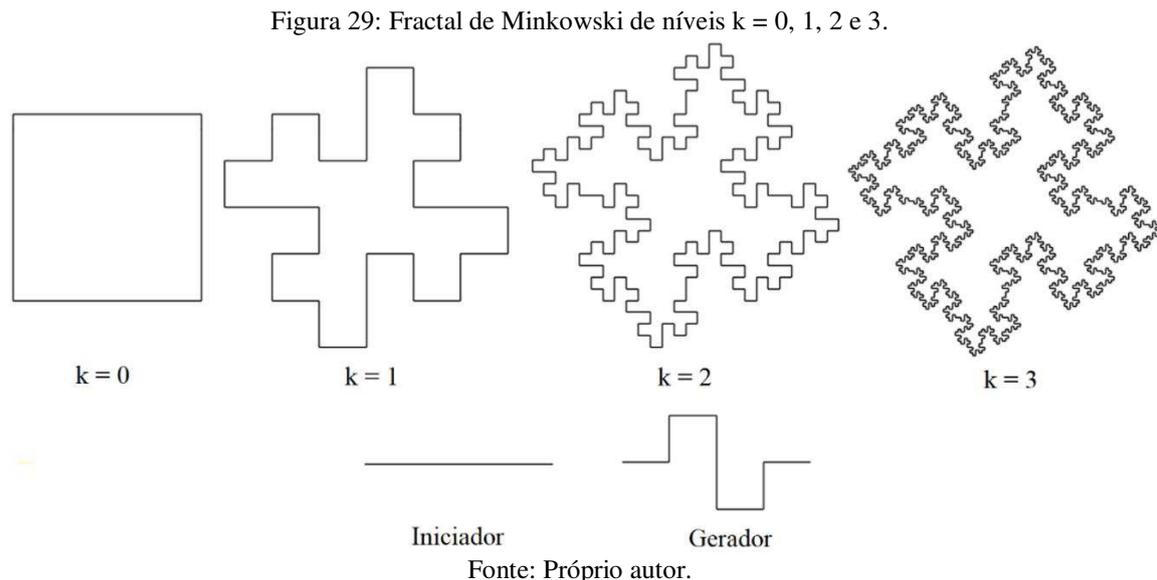
Neste trabalho a geometria fractal baseada na curva de Minkowski foi utilizada para o projeto de uma antena com dimensões reduzidas. Em uma dada iteração, a fractal de Minkowski permite uma duplicação do perímetro mantendo o valor da área. Como  $N = 8$  e  $1/r = 4$ , a dimensão fractal para este tipo de geometria é  $D = 1,5$ . Conforme apresentado na Figura 29, a obtenção da curva de Minkowski se dá pelo método IFS (do

inglês *iterative function system*) a partir de oito transformações afins  $q_i : R^2 \rightarrow R^2$  dadas por (MANDELBROT, 1991):

$$q_i(x, y) = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\text{sen}(\theta_i) \\ \text{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_i \\ f_i \end{pmatrix}. \quad (4.1)$$

As oito transformações fazem a contração de  $1/4$ ; a segunda transformação ( $q_2$ ) faz uma rotação de  $\pi/2$  rad e uma translação de 1 unidade para a direita;  $q_3$  realiza uma translação de 1 unidade para a direita e 1 unidade para cima;  $q_4$  faz uma rotação de  $\pi/2$  rad e uma translação de 2 unidade para a direita;  $q_5$  realiza uma rotação de  $-\pi/2$  rad e uma translação de 2 unidades para a direita;  $q_6$  faz uma translação de 2 unidades para a direita e um deslocamento de 1 unidade para baixo;  $q_7$  faz uma rotação de  $-\pi/2$  rad e uma translação de 3 unidade para a direita; por fim,  $q_8$  realiza uma translação de 3 unidades para a direita.

Na Figura 29, uma ilustração da alteração que será realizada no *patch* da PMA é apresentada. Contudo, para evitar problemas de casamento de impedância entre a linha de alimentação e o *patch*, a lateral do *patch* que se conecta a linha de microfita não será modificada.



Além das técnicas de miniaturização utilizando geometrias bioinspiradas e fractais, uma nova técnica destinada a otimização da geometria de PMA é proposta neste trabalho e apresentada na próxima seção, a qual foi utilizada durante as etapas de projeto do sistema de medição.

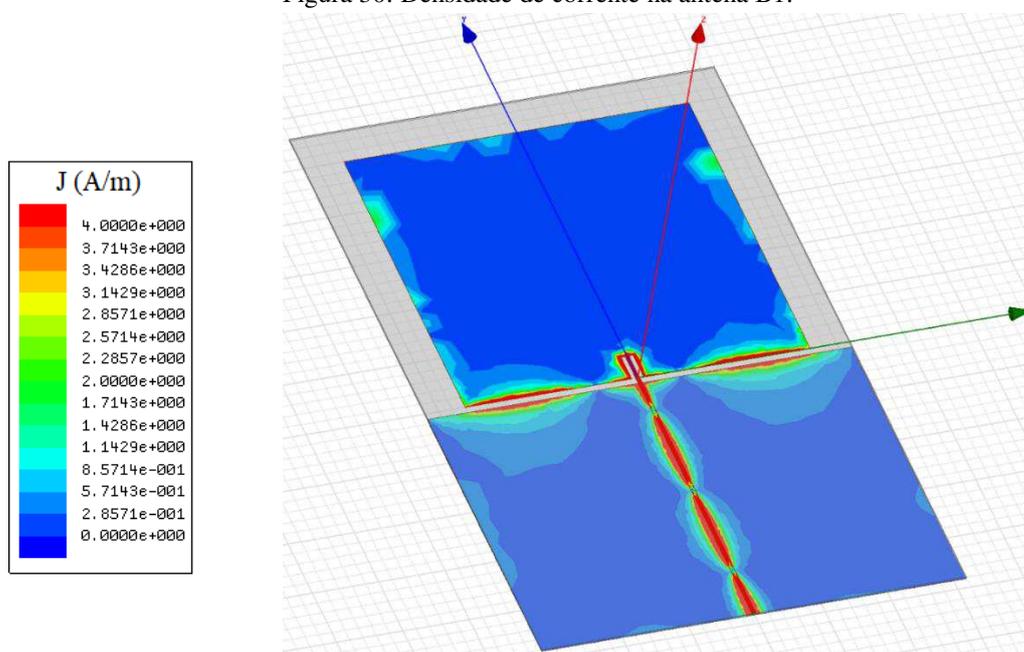
#### 4.4 TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO POR ANÁLISE DA DENSIDADE DE CORRENTE

Considerando a necessidade de se otimizar a PMA para obter uma maior sensibilidade na medição dos sinais de RF, neste trabalho, uma nova técnica de otimização da geometria de PMAs é proposta. Esta técnica é aplicada mediante a análise da densidade de corrente nas partes condutoras das antenas, e é baseada no fato de que densidades de corrente mais elevadas fora da linha de transmissão representam perdas, que comprometem a eficiência de irradiação da antena.

A partir de várias simulações no HFSS, observou-se que as antenas simuladas apresentaram desempenho melhor quando a densidade de corrente só é maior na linha de alimentação e no seu ponto de conexão com *patch*. Desse modo, quando uma densidade de corrente anormal for detectada em outros pontos da antena, um ajuste da geometria das partes condutoras neste respectivo local é recomendada para melhorar suas características.

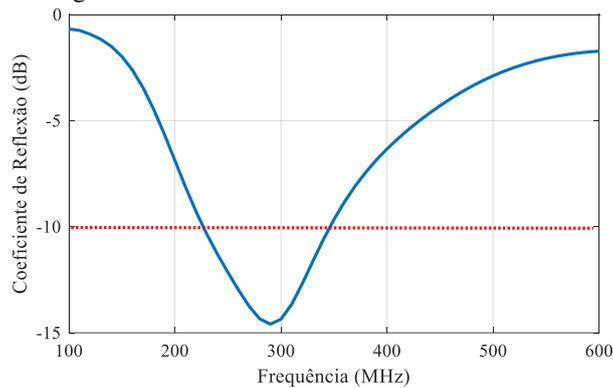
Assim, para facilitar a etapa de projeto das PMAs utilizadas nesta pesquisa, a técnica de otimização proposta foi aplicada tal como o exemplo a seguir. Na Figura 30 uma típica PMA retangular (antena B1) é apresentada, na qual os valores simulados de densidade de corrente ( $J$ ) são apresentados. Em seguida, na Figura 31 encontra-se o respectivo coeficiente de reflexão.

Figura 30: Densidade de corrente na antena B1.



Fonte: Próprio autor.

Figura 31: Coeficiente de reflexão da antena B1.

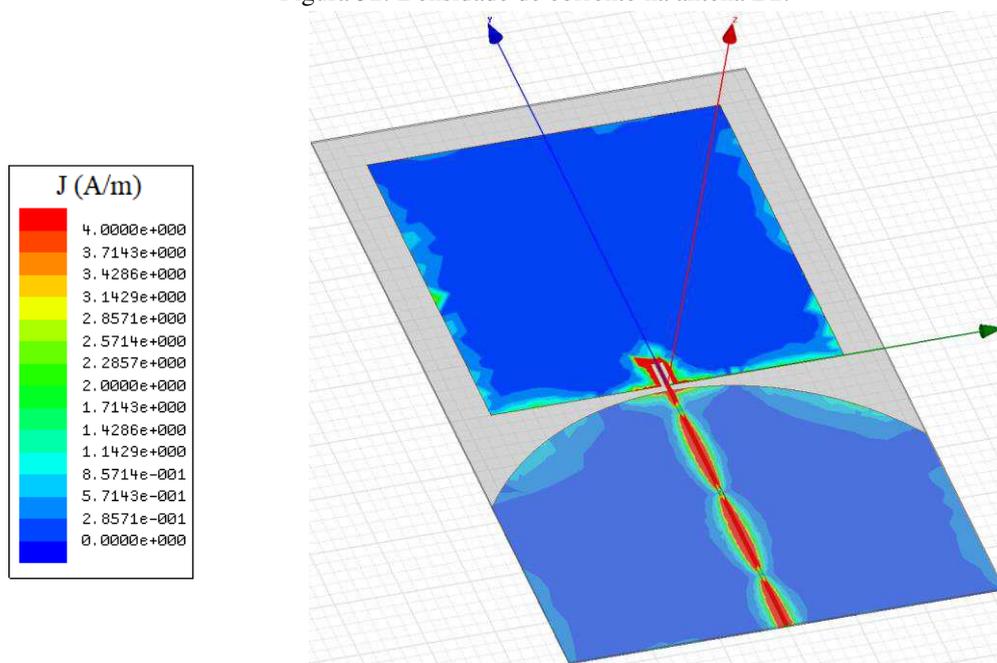


Fonte: Próprio autor.

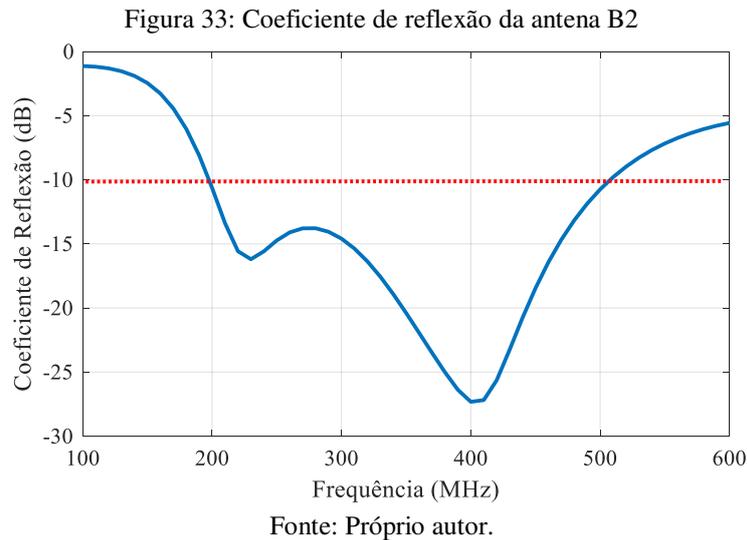
A partir da Figura 30, observa-se uma grande densidade de corrente na linha de alimentação e no ponto de conexão da mesma com o *patch* (reentrâncias). Porém, além destes pontos, este efeito também acontece na parte inferior do *patch* e na parte superior do plano de terra truncado. Esta configuração proporcionou uma faixa de operação de 226 – 346 MHz, como pode ser visto na Figura 31.

Com o objetivo de manter a densidade de corrente elevada apenas na linha de transmissão e seu ponto de conexão, o plano de terra truncado foi ajustado, tornando-o mais arredondado na parte superior e, conseqüentemente, afastando-o do *patch*. Os efeitos dessa modificação podem ser observados nas Figuras 32 e 33, em que a densidade de corrente e o coeficiente de reflexão são apresentados, respectivamente.

Figura 32: Densidade de corrente na antena B2.



Fonte: Próprio autor.



Na Figura 32, nota-se que o afastamento entre o plano de terra e o *patch* provocou uma redução na densidade de corrente vista na Figura 30. O efeito desta modificação no desempenho da antena pode ser observado a partir do aumento da largura de banda. Como pode ser visto na Figura 33, houve um aumento significativo na faixa de operação, passando a ser de 197 – 508 MHz.

Assim, considerando os bons resultados apresentados no exemplo acima, a técnica de otimização por análise da densidade de corrente será adotada no desenvolvimento do sistema de medição proposto nesta pesquisa. Desta forma, uma vez determinadas os modelos iniciais das antenas, os ajustes que quase sempre são necessários na geometria da antena serão aplicados de uma forma mais objetiva.

Para análise dos sinais medidos com as antenas projetadas, a técnica de classificação descrita na próxima seção será utilizada.

#### 4.5 TÉCNICA DE CLASSIFICAÇÃO

Com o objetivo de montar um amplo banco de dados dos sinais obtidos com o sistema de medição desenvolvido, 30 medições foram realizadas para cada amostra de contato, totalizando 270 medições.

A formação de arcos elétricos no interior da câmara de extinção de disjuntores é um fenômeno influenciado por diversos fatores, tais como: velocidade de abertura dos contatos; propriedades isolantes do meio extintor; temperatura do meio extintor; presença de impurezas; nível de degradação dos contatos. Sendo assim, como um dos objetivos da pesquisa é verificar se existe uma correlação entre o nível de degradação dos contatos e o comportamento dos sinais irradiados, os ensaios foram realizados de modo a tentar

eliminar a maior parte destes fatores. Para tanto, os ensaios foram realizados no mesmo polo do mesmo disjuntor, assim, a velocidade de abertura foi praticamente idêntica em todos os ensaios. Ademais, este polo foi preenchido com uma amostra de óleo retirada de um mesmo recipiente todas as vezes que os contatos foram trocados.

Todas as medições foram processadas com uma rotina computacional criada no Matlab®, que executa as seguintes tarefas:

- Determinação do valor máximo do sinal captado pela antena durante a medição de ruído ambiente ( $V_{rmax}$ ). Os sinais provenientes dos arcos elétricos são identificados a partir de comparações com este valor de referência;
- Estimação da duração do arco elétrico a partir da identificação do primeiro e último instante em que o sinal medido ultrapassa o valor  $V_{rmax}$ ;
- Estimação da energia do sinal medido durante o arco elétrico a partir de:

$$E_{i,j} = \sum_{n=1}^{k_{i,j}} |x(n)|^2, \quad (4.1)$$

em que os índices  $i$  e  $j$  representam, respectivamente, a amostra de contato sob análise e o número da medição.  $x(n)$  são as amostras do sinal medido e  $k_{i,j}$  é o número total de amostras do respectivo sinal medido;

- Inserção no banco de dados de parâmetros como mediana, intervalo interquartil e presença de *outliers*, referentes aos valores calculados de energia e duração de arco para cada amostra de contato;
- Exibição do gráfico de *boxplot* para cada amostra de contato, tanto para o banco de dados com os valores de energia de sinal como para os de duração de arco.

Considerando que quanto maior o nível de degradação dos contatos, maior a intensidade e instabilidade dos arcos elétricos, os valores de mediana e intervalo interquartil são, teoricamente, diretamente proporcionais à degradação dos contatos. Portanto, estes parâmetros foram utilizados como parâmetros de avaliação para a técnica de classificação proposta.

#### 4.6 COMPARAÇÕES COM A TÉCNICA DE REFERÊNCIA

Os ensaios de MRD também foram realizados utilizando o arranjo apresentado na seção 4.1. Para cada amostra de contato, 30 ensaios foram realizados. Para evitar que

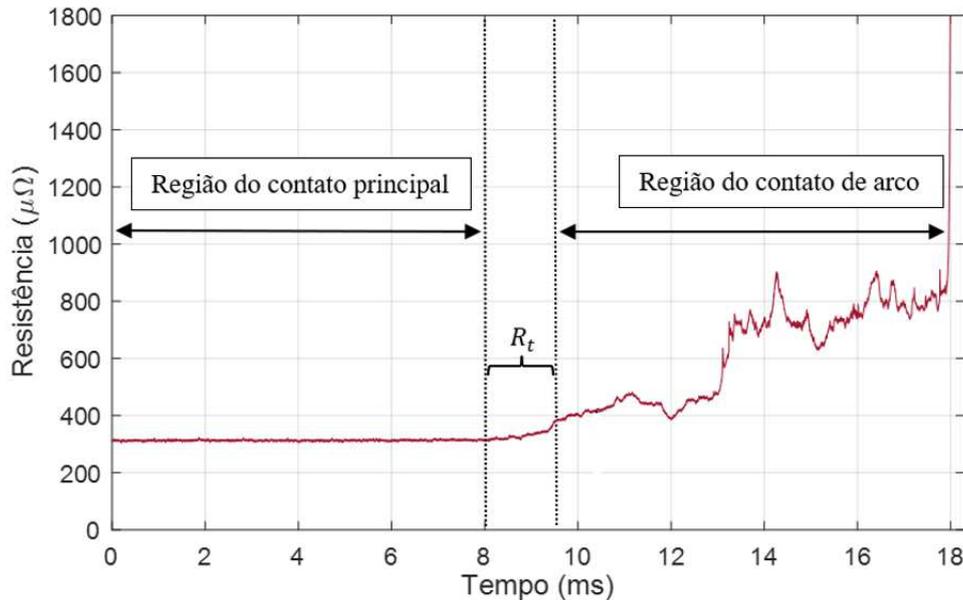
fatores como velocidade de abertura e qualidade do óleo isolante interfiram nos resultados, todos os ensaios de MRD foram realizados no mesmo polo do mesmo disjuntor e utilizando óleo mineral isolante retirado do mesmo recipiente para preencher o polo em todas as trocas de contato. Todos os sinais medidos foram submetidos a uma rotina computacional desenvolvida no *software* Matlab®, no qual os seguintes passos são executados:

- Identificação do instante de separação dos contatos de arco (fim do contato galvânico);
- Identificação do instante de separação dos contatos principais;
- Cálculo do valor médio de resistência na região referente ao contato de arco ( $R_a$ );
- Cálculo do desvio padrão da resistência na região do contato de arco ( $R_d$ );
- Classificação dos contatos quanto ao nível de degradação a partir da comparação dos valores de  $R_a$  e  $R_d$  com os valores de limiar.

Tal como foi apresentado na seção 2.5, a maioria das metodologias utilizadas para correlacionar as curvas de MRD com o nível de degradação dos contatos são baseadas no valor de  $R_a$ . No entanto, observou-se que este valor, por si só, não é suficiente para fornecer um diagnóstico totalmente confiável, uma vez que, em alguns casos, a degradação do contato pode acontecer de forma não uniforme, gerando altos valores de resistência apenas em alguns pontos da curva de resistência. Sendo assim, o parâmetro  $R_d$  foi introduzido no algoritmo de classificação para que, em conjunto com o parâmetro  $R_a$ , proporcione uma avaliação mais confiável.

Além da inserção do parâmetro  $R_d$  no procedimento de análise, propõe-se nesta pesquisa um ajuste no cálculo do parâmetro  $R_a$ . Em alguns casos, a transição entre a região do contato principal e a região de contato de arco não é facilmente identificada em curvas de resistência dinâmica, tal como é ilustrado na Figura 34. Assim, propõe-se que a resistência referente a esta região de transição, denominada  $R_t$ , seja desconsiderada no cálculo de  $R_a$ . Esta região foi determinada de acordo com o intervalo da curva de resistência referente ao contato de arco, abrangendo 10% do início deste intervalo.

Figura 34: Curva de resistência dinâmica com indicação da região de transição.



Fonte: Próprio autor.

Por fim, para fins de validação, os resultados obtidos por meio da técnica proposta nesta pesquisa foram comparados com a classificação dos contatos baseada na MRD.

Neste capítulo, os principais procedimentos utilizados durante o desenvolvimento do método proposto foram apresentados. Dentre as técnicas utilizadas, destaca-se a de otimização por análise da densidade de corrente, proposta nesta tese, que proporciona um ajuste mais rápido e objetivo da geometria de antenas na sua fase de projeto, evitando que esse processo seja feito por tentativa e erro. No próximo capítulo, os resultados obtidos durante a pesquisa são apresentados, bem como suas respectivas análises.

## 5 RESULTADOS

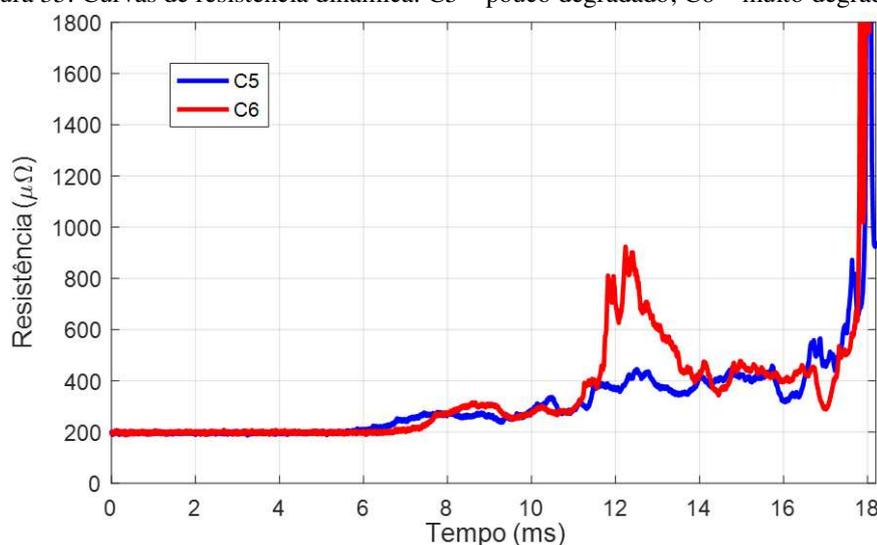
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o método de monitoramento radiométrico proposto para disjuntores de alta tensão. Estas análises têm como objetivo identificar padrões de irradiação de acordo com o estado operacional do disjuntor. A apresentação dos resultados foi dividida em seis seções: classificação via MRD; análise de desempenho da antena projetada; classificação via identificação de padrão de irradiação; aperfeiçoamento do sistema de medição; testes em laboratório da PMA aperfeiçoada; experimentos em campo.

### 5.1 CLASSIFICAÇÃO VIA MRD

A primeira atividade realizada em laboratório foram os ensaios de MRD, cujos resultados serviram como referência para comparações com os resultados obtidos por meio da técnica proposta.

De acordo com o procedimento descrito na seção 4.6, a estimativa do nível de degradação dos contatos foi realizada não só pelo parâmetro  $R_a$  como também pelo parâmetro  $R_d$ , uma vez que o uso exclusivo de  $R_a$  pode não ser suficiente para detectar contatos com uma degradação elevada, porém concentrada em algum ponto. Isto pode ser explicado mediante a análise do gráfico apresentado na Figura 35.

Figura 35: Curvas de resistência dinâmica. C5 – pouco degradado; C6 – muito degradado.

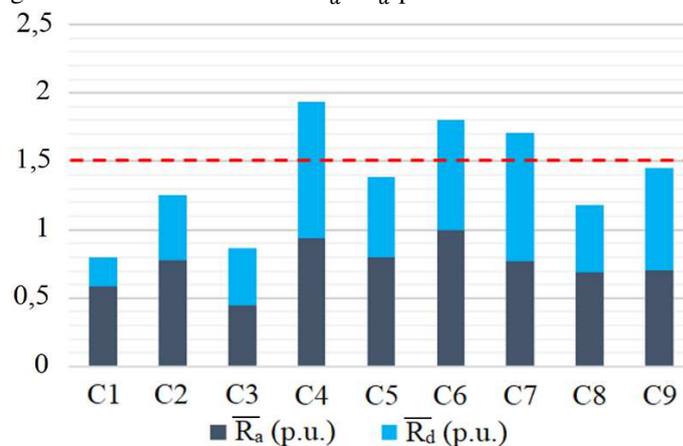


Fonte: Próprio autor.

No gráfico da Figura 35 são apresentadas duas curvas de resistência dinâmica, uma referente ao contato C5 e outra ao contato C6. A partir de inspeções visuais e medições anteriores (OLIVEIRA, 2015), sabe-se que o contato C5 possui um nível de degradação baixo/mediano, enquanto que o contato C6 possui um alto nível de degradação. No entanto, os valores de  $R_a$  destes dois contatos são bastante próximos, uma vez que os altos valores de resistência de C6 encontram-se apenas em uma pequena região (aproximadamente entre 11,5 – 13,5 ms). Portanto, a identificação desta variação brusca de resistência de C6 neste intervalo pode ser obtida introduzindo o parâmetro  $R_d$  na etapa de classificação.

Após os ensaios de MRD, os sinais medidos foram exportados para um computador, no qual 30 valores de  $R_a$  e  $R_d$  foram calculados para cada contato utilizando uma rotina no Matlab®. Os valores médios destes parâmetros são apresentados na Figura 36.

Figura 36: Valores médios de  $R_a$  e  $R_d$  para cada amostra de contato.



Fonte: Próprio autor.

Uma vez que o comportamento do arco elétrico depende principalmente do estado dos contatos de arco, os valores de resistência referentes aos contatos principais ( $R_p$ ) não foram utilizados.

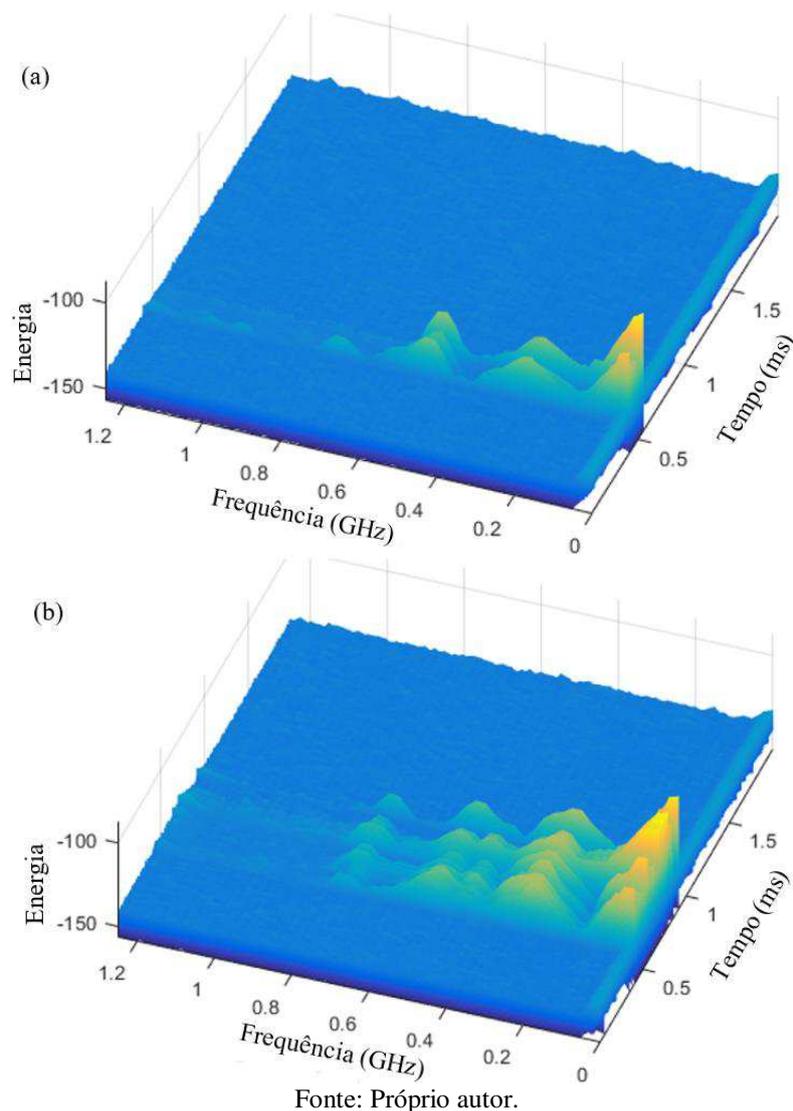
De acordo com as recomendações do fabricante, os contatos do modelo de disjuntor PVO analisado devem ser trocados caso sua resistência esteja acima de  $600 \mu\Omega$ . Portanto, considerando os contatos que apresentaram valores de  $R_a$  próximos a este limite e também considerando aqueles que apresentaram valores de  $R_d$  significativamente superiores aos demais, um valor de limiar (apresentado na figura 36) foi estabelecido empiricamente e o algoritmo desenvolvido no Matlab® classificou os contatos C4, C6 e

C7 como contatos com alto nível de degradação. Esta informação será considerada como referência para comparações com os resultados mostrados nas próximas seções.

## 5.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO DA ANTENA PROJETADA

De acordo com o procedimento descrito na seção 4.2, o primeiro passo para projetar as antenas do sistema de medição foi a caracterização dos sinais de RF irradiados por arcos elétricos durante operações do disjuntor. Os sinais medidos com a antena log-periódica de banda larga foram exportados para um computador, no qual foi feita a análise espectral. Nas figuras 37(a) e 37(b) são apresentados espectrogramas de sinais captados utilizando as amostras de contato C1 (pouco degradado) e C6 (muito degradado), respectivamente.

Figura 37: Espectrograma do sinal de RF captado por uma antena log-periódica de banda larga. (a) amostra de contato C1; (b) amostra de contato C6.



A partir dos resultados apresentados na Figura 37, observa-se que, independentemente do nível de degradação dos contatos, a maior parte da energia do sinal irradiado encontra-se em frequências de até 150 MHz. No entanto, deve-se levar em consideração que existem portadoras de rádio FM em frequências de até 110 MHz. Ademais, nota-se que, mesmo em menores intensidades, existem componentes do sinal com energia significativa em até aproximadamente 800 MHz. Assim, decidiu-se projetar uma antena com frequência de ressonância de 300 MHz e aplicar técnicas de otimização de largura de banda de modo a abranger a maior parte da faixa de frequência de interesse.

Para avaliar o melhor posicionamento das antenas durante o monitoramento dos disjuntores, medições foram realizadas variando a posição das antenas. Devido à natureza aleatória dos arcos elétricos, obter dois arcos idênticos em diferentes ensaios seria quase impossível. Portanto, duas antenas idênticas foram fabricadas e utilizadas para realizar medições simultâneas.

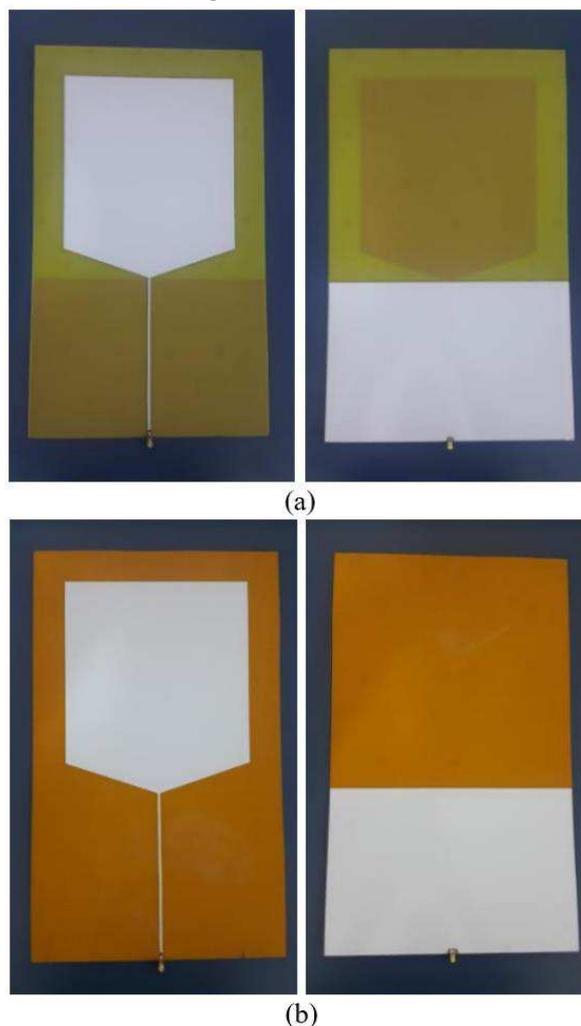
Seguindo o procedimento descrito nas seções 2.7.3, 2.7.4 e 2.7.5, uma PMA retangular de banda larga foi projetada utilizando uma placa de circuito impresso dupl-face, com substrato de fibra de vidro (FR4), cuja constante dielétrica  $\epsilon_r = 4,4$ , espessura  $h = 1,6 \text{ mm}$  e tangente de perdas  $\delta = 0,02$ . Os valores calculados para a largura ( $W$ ) e comprimento ( $L$ ) do *patch* foram de 260 mm e 250 mm, respectivamente.

Para obter uma impedância de entrada de  $50 \Omega$ , a largura da linha de alimentação ( $W_0$ ) foi calculada por meio da equação 2.17, obtendo-se ao valor de 3 mm. O comprimento da linha de alimentação ( $L_0$ ) foi de aproximadamente 250 mm, equivalente à  $\lambda/4$  da frequência de ressonância.

A antena projetada com estas características se mostrou inadequada para a aplicação proposta, tanto em relação à faixa de operação quanto ao ganho. Assim, as técnicas de otimização de largura de banda via truncamento do plano de terra e de inserção de um circuito (tipo cone) de casamento de impedância foram aplicadas.

Na figura 38, fotografias da parte frontal e posterior das antenas projetadas são apresentadas. As antenas foram nomeadas de A1 e A2.

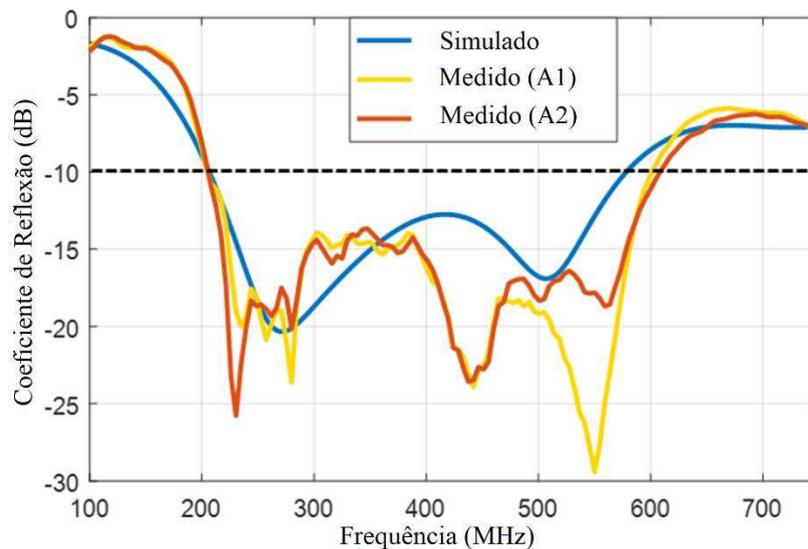
Figura 38: PMA's retangulares com 32 x 53 cm. (a) A1; (b) A2.



Fonte: Próprio autor.

Para analisar o comportamento destas antenas, simulações foram realizadas no *software* HFSS de acordo com o procedimento descrito na seção 4.2. A análise inicial foi em relação à frequência de ressonância e à faixa de operação da antena. Estes parâmetros podem ser obtidos a partir do gráfico de coeficiente de reflexão, apresentado na Figura 39. Além da simulação, valores de coeficiente de reflexão medidos com um analisador de rede portátil também são apresentados.

Figura 39: Valores medidos e simulados de coeficiente de reflexão.



Fonte: Próprio autor.

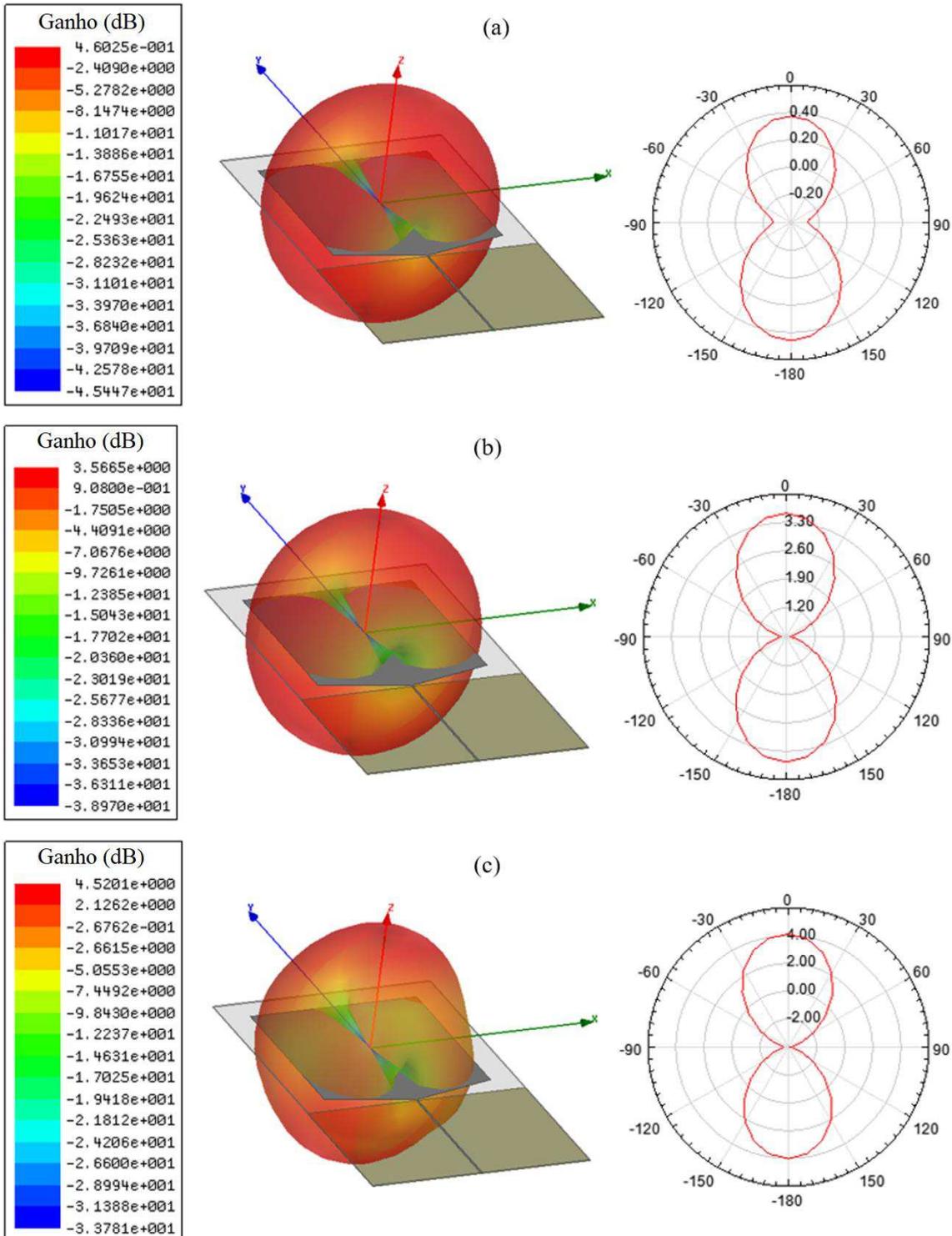
De modo geral, os valores medidos para ambas as antenas foram relativamente próximos aos simulados, evidenciando a validade da técnica de projeto adotada. A partir da Figura 39, observa-se que tanto o coeficiente de reflexão simulado como os medidos apresentaram um pico logo abaixo de 300 MHz e outro em torno de 500 MHz.

A banda de operação simulada (206 – 579 MHz), bem como a banda medida para a antena A1 (205 – 601 MHz) e A2 (206 – 608 MHz), que correspondem a faixa de frequência nos quais o coeficiente de reflexão se mantém abaixo de -10 dB, mostraram-se satisfatórias, uma vez que abrangem a maior parte da faixa em que os componentes espectrais dos sinais irradiados se apresentam.

As diferenças entre os valores medidos para a antena A1 e a antena A2 podem ser justificadas pela possível diferença de permissividade dos substratos, uma vez que as placas de circuito impresso utilizadas não são do mesmo fabricante. Ademais, os conectores SMA (que não foram simulados) podem ter contribuído para as divergências nos resultados.

Para avaliar o melhor posicionamento das antenas ao redor do disjuntor durante as medições, os padrões de irradiação para as frequências central (392 MHz), máxima (579 MHz) e mínima (206 MHz) foram obtidos via simulação, sendo estes apresentados na Figura 40.

Figura 40: Padrões de irradiação. (a) frequência mínima; (b) frequência central; (c) frequência máxima.



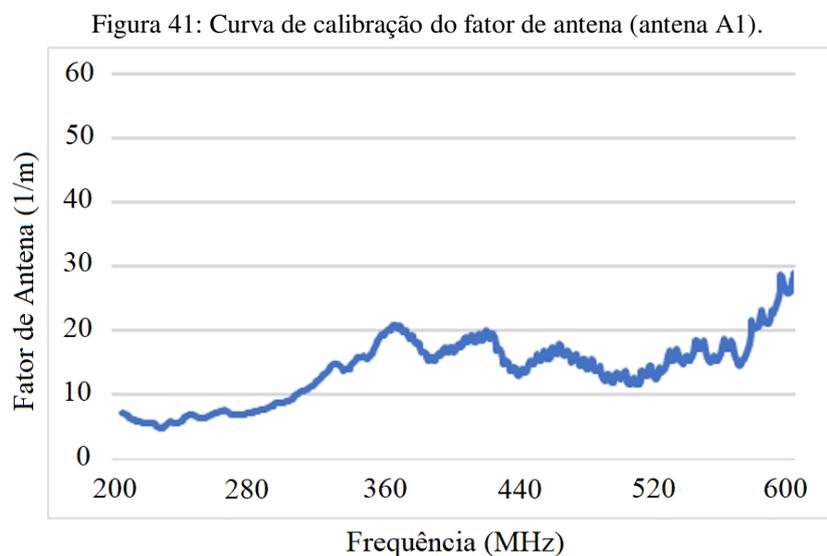
Fonte: Próprio autor.

Levando em consideração os resultados apresentados na Figura 40, decidiu-se que, como a antena apresenta um padrão de ganho praticamente omnidirecional, com um ganho reduzido apenas no vetor da linha de alimentação, a mesma deve ser posicionada de modo que o vetor normal à superfície do *patch* aponte para a câmara de extinção do disjuntor. Esta decisão também foi baseada nas comparações realizadas entre os sinais

medidos com as antenas A1 e A2, instaladas em diferentes posições ao redor do disjuntor. Após uma análise comparativa entre a amplitude de sinais medidos simultaneamente, foi constatado que a orientação da antena não exerce uma influência significativa nos resultados.

Padrões de irradiação, tais como os apresentados na Figura 40, foram simulados para toda a faixa de operação da antena (206 – 579 MHz), com um intervalo de 10 MHz, e o valor médio do ganho máximo ( $G_{med}$ ) foi de 3,25 dB. Embora não existam referências que determinem um valor mínimo aceitável de ganho médio para esta aplicação, segundo Luo *et al.* (2016), antenas aplicadas na medição de descargas parciais (DP) devem apresentar valores de  $G_{med}$  superiores a 2 dB sobre a faixa de interesse. Portanto, como a intensidade dos sinais irradiados por arcos elétricos em disjuntores é muito maior que a de DPs, o valor de 3,25 dB foi considerado adequado para esta aplicação.

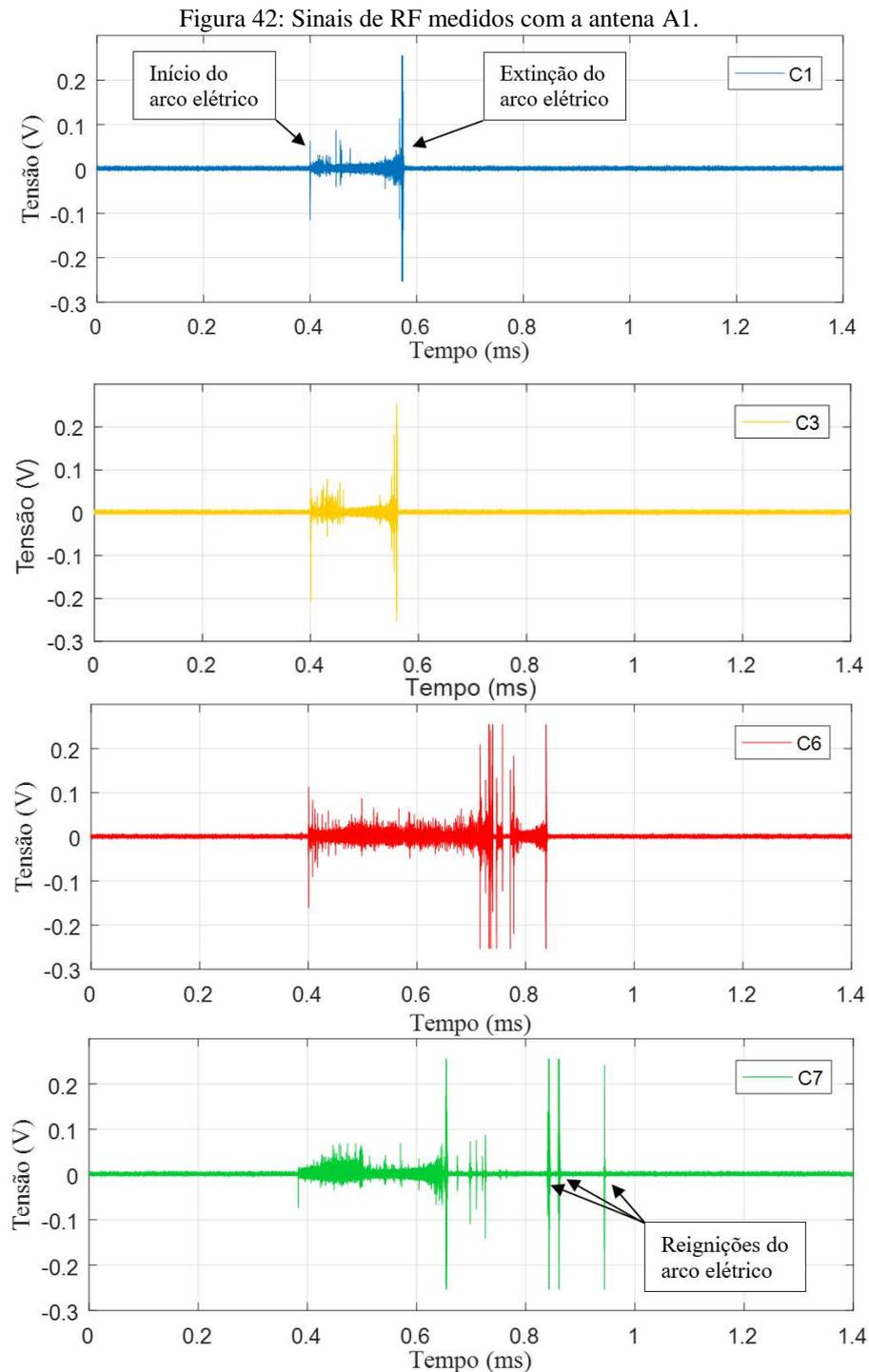
Para garantir a aplicabilidade das antenas fabricadas, o processo de calibração por campo uniforme descrito na seção 4.2 foi aplicado, resultando no gráfico com os valores de AF apresentado na Figura 41.



Como pode ser observado na Figura 41, os valores obtidos de AF para a antena A1 são relativamente baixos, com um valor médio de 13,97 1/m e uma flutuação similar ao apresentado por Ghosh e Chakrabarty (2008) e Ishigami *et al.* (2017), que se referem, respectivamente, às antenas aplicadas na medição de DP e sensores de interferência eletromagnética. Portanto, como estas aplicações tratam se sinais com intensidade bem menor que a dos sinais gerados por arcos em disjuntores, conclui-se que a antena fabricada é adequada para a aplicação proposta.

### 5.3 CLASSIFICAÇÃO VIA IDENTIFICAÇÃO DE PADRÃO DE IRRADIAÇÃO

De acordo com o procedimento descrito na seção 4.3, trinta medições foram realizadas usando a antena A1 (para cada amostra de contato). Na Figura 42, alguns dos sinais medidos são apresentados.



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados apresentados na Figura 42, observa-se que os sinais medidos com a antena projetada apresentam uma boa relação sinal ruído (RSR), facilitando a identificação dos instantes de início e fim do arco elétrico (e com isso a duração do arco), tal como é apontado no sinal captado utilizando a amostra de contato C1.

Os sinais irradiados se apresentam como uma sequência de pulsos, com a energia variando entre altas e baixas intensidades. Os maiores níveis de energia dos sinais estão presentes nos instantes de maior instabilidade do arco, ou seja, durante a ignição, extinção e reignições. Durante instantes de relativa estabilidade do arco, observa-se um sinal consistente, porém com energia significativamente menor.

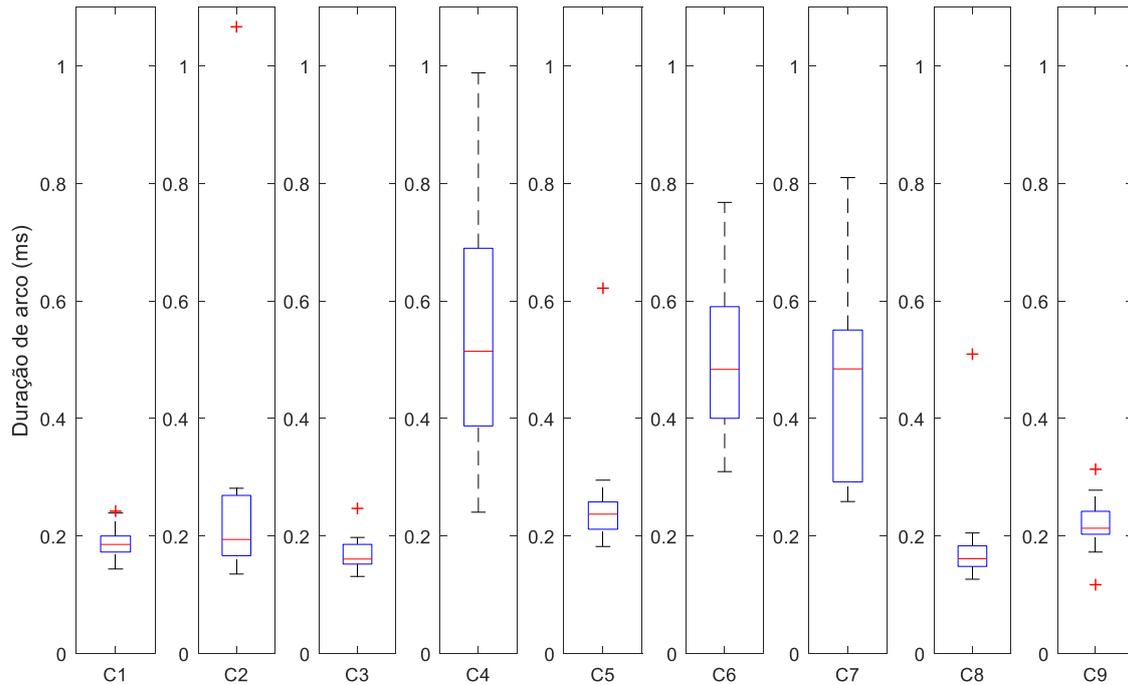
Além das características supracitadas, a partir da análise do banco de dados com sinais de RF medidos, observou-se que os mesmos apresentam um padrão de acordo com o nível de degradação dos contatos. Identifica-se claramente uma diferença entre sinais referentes a contatos com baixo nível de degradação (C1 e C3) e contatos com alto nível de degradação (C6 e C7). Quanto maior a degradação do contato, maior a duração do arco elétrico e maior a energia do sinal. Sendo assim, estes resultados servem de prova de conceito para o que foi apresentado na seção 2.10, bem como uma base para o método de classificação do nível de degradação dos contatos via radiometria apresentado neste trabalho.

Ademais, em alguns casos, tal como o sinal apresentado na Figura 42, referente ao contato C7, observa-se que ocorrem reignições de arco elétrico, que também são um indicativo de redução da capacidade de interrupção de corrente do disjuntor. Reignições de arco elétrico podem ser causadas por problemas nos contatos, no meio isolante/extintor e no sistema mecânico.

Após a análise do banco de dados criado, observou-se que, dentre as medições realizadas com contatos com alto nível de degradação, existe uma variação significativa no comportamento dos sinais. Assim, o intervalo interquartil (IIQ), que representa a dispersão ou a variação dos dados, foi tomado como parâmetro avaliativo no algoritmo de classificação.

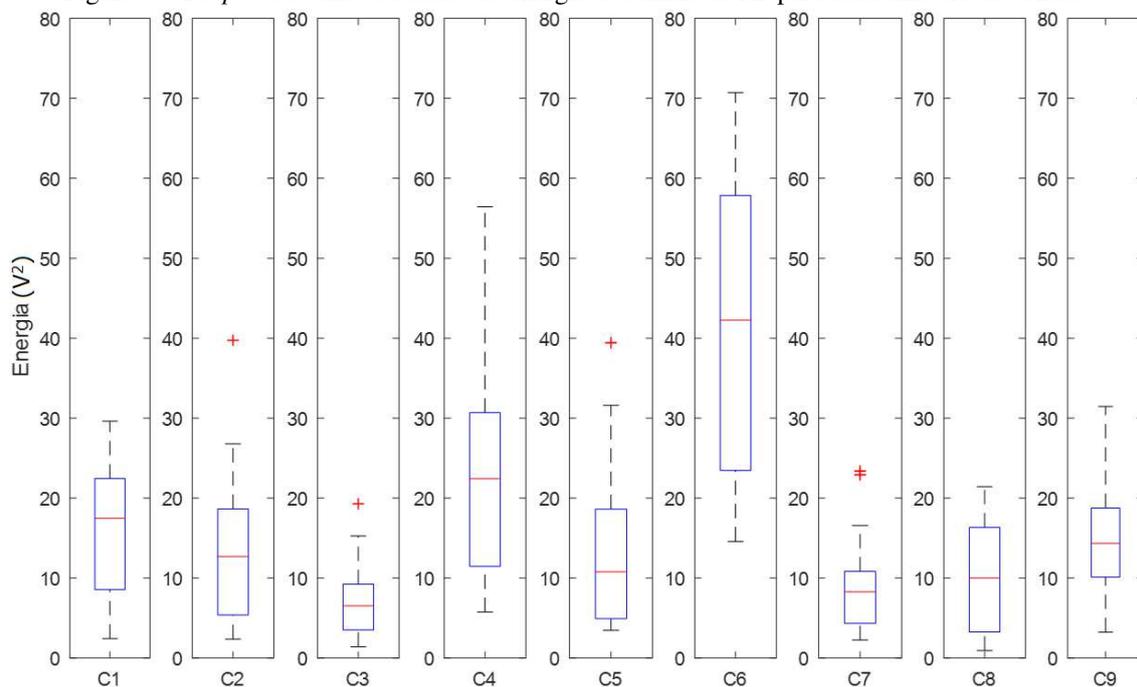
Todos os sinais medidos foram exportados para um computador e submetidos a uma rotina computacional descrita na seção 4.5. Os gráficos de *boxplot* gerados com esta rotina, referentes à duração de arco e à energia, são apresentados nas Figuras 43 e 44, respectivamente.

Figura 43: *Boxplot* do banco de dados de duração de arco obtidos para cada amostra de contato.



Fonte: Próprio autor.

Figura 44: *Boxplot* do banco de dados de energia dos sinais de RF para cada amostra de contato.



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados apresentados na Figura 43, observa-se uma duração de arco para os contatos C4, C6 e C7 significativamente maior que para os demais contatos. O valor de mediana (ou segundo quartil), representado pelas linhas em vermelho, é uma boa opção para parâmetro avaliativo, uma vez que indica o comportamento geral dos dados,

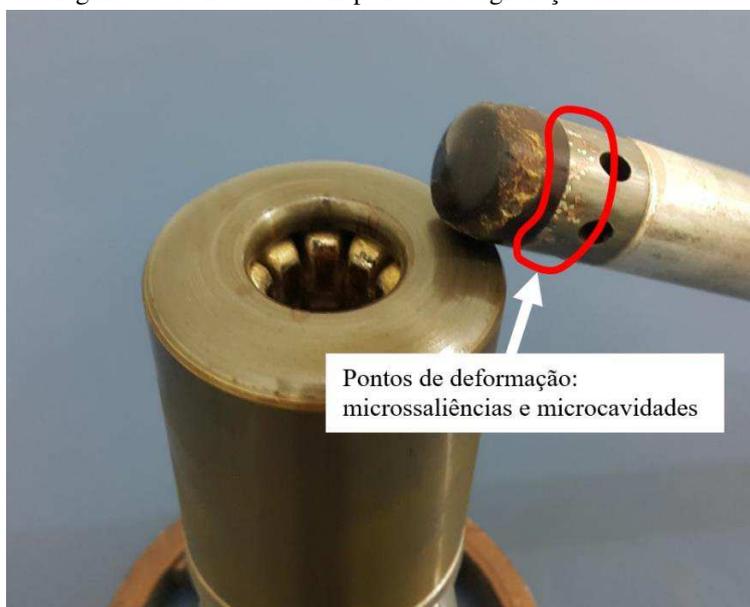
sem a influência de valores atípicos (*outliers*). Assim, a mediana foi tomada como um parâmetro de entrada para o algoritmo de classificação.

Além disso, para os contatos C4, C6 e C7 também foram observadas dispersões entre as amostras significativamente maiores que para os outros contatos, o que é indicado nos gráficos pelo IIQ. Assim, o IIQ também foi tomado como um parâmetro de entrada para o algoritmo de classificação.

Estes resultados reforçam a ideia de que a duração de arco e seus parâmetros estatísticos podem ser utilizados para a classificação dos contatos, especialmente a mediana e o IIQ, uma vez que ambos apontaram os mesmos contatos que a MRD como sendo contatos muito degradados.

Em relação aos gráficos de *boxplot* da energia dos sinais (Figura 44), nota-se que apenas para o contato C6 existe um valor de mediana e IIQ significativamente maior que os demais contatos. Contudo, para o contato C4, estes valores também são um pouco maiores que o dos demais. Comparando estes resultados com os resultados apresentados na Figura 36, nota-se que a mediana e o IIQ da energia estão mais correlacionados com os valores de  $R_a$  que com os valores de  $R_d$ . Isto ocorre, provavelmente, porque alguns contatos, como o C7, apesar de não serem tão degradados como o contato C6, possuem pontos de degradação concentrados que, muitas vezes, resultam na deformação do contato (criando microssaliências ou microcavidades) que favorecem a formação de arcos elétricos, tal como destacado na Figura 45. Assim, os sinais medidos possuem uma maior duração, mas pouca energia.

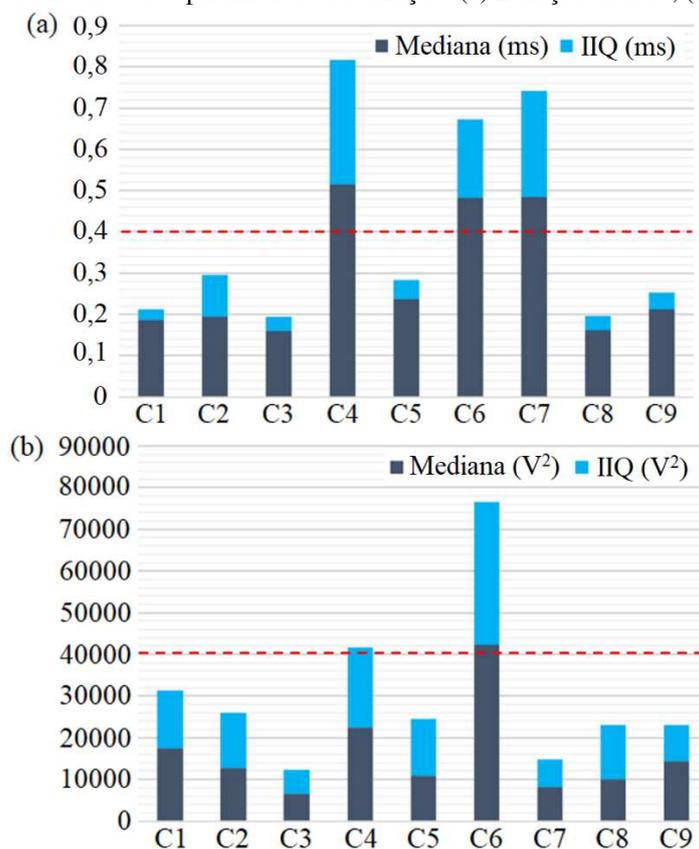
Figura 45: Contato C7 com pontos de degradação destacados.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 46, os valores dos parâmetros de avaliação para cada contato são apresentados de forma sintetizada, facilitando a interpretação dos resultados com a representação do peso de cada parâmetro. Os valores de limiar, definidos empiricamente, utilizados na rotina computacional para diferenciação entre os contatos muito degradados e os pouco degradados são destacados com as linhas tracejadas em vermelho.

Figura 46: Gráficos sintéticos dos parâmetros de avaliação. (a) Duração de arco; (b) Energia do sinal.



Fonte: Próprio autor.

Como apresentado na Figura 46, apesar dos valores de mediana da duração de arco e energia dos sinais proporcionarem um bom indicativo quanto ao nível de degradação dos contatos, a avaliação por meio da análise combinada da mediana e do IIQ proporciona uma avaliação mais confiável, visto que, desse modo, existe uma diferenciação mais clara entre contatos muito degradados e pouco degradados.

Diante do exposto, concluiu-se que, em comparação com a análise baseada na energia, a técnica de classificação baseada nos parâmetros estatísticos extraídos do *boxplot* (mediana e IIQ) da duração de arco se mostrou a abordagem mais confiável para a avaliação do estado de degradação dos contatos. Contudo, a análise conjunta dos bancos de dados de duração de arco e energia proporciona um diagnóstico mais completo, visto que assim é possível se obter uma indicação do tipo de defeito presente.

Assim, uma das principais contribuições do trabalho foi obtida a partir da apresentação de uma nova prova de conceito, mostrando que uma avaliação do nível de degradação dos contatos pode ser realizada de modo eficiente e não invasivo, a partir de medições radiométricas e o processamento de sinais com técnicas estatísticas.

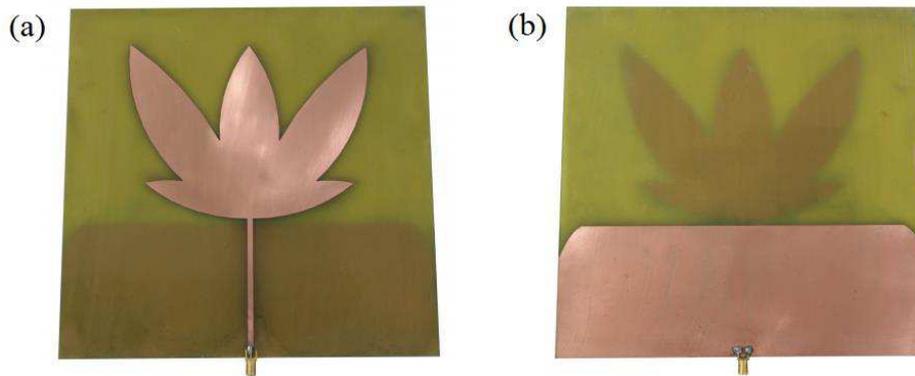
#### 5.4 APERFEIÇOAMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Considerando que a duração do arco elétrico é o principal parâmetro necessário para a aplicação do método proposto, caso o sistema de monitoramento seja capaz de proporcionar a aferição deste parâmetro, o mesmo pode ser considerado adequado para a aplicação no diagnóstico de disjuntores.

Segundo a teoria de antenas, quanto menor a frequência de operação, maiores serão as dimensões da antena. Por este motivo, as antenas apresentadas na Figura 38 possuem dimensões relativamente grandes, de aproximadamente 32 x 53 cm, tornando seu uso inadequado em subestações com espaço limitado, como subestações abrigadas ou subestações em níveis de tensão mais baixos, onde os equipamentos encontram-se mais próximos um do outro. Antenas grandes podem pôr em risco a isolação do sistema elétrico. Portanto, uma investigação foi realizada para verificar se antenas com frequências de operação maiores, e conseqüentemente de dimensões menores, também são suficientes para medir os sinais de interesse, possibilitando a obtenção da duração dos arcos elétricos.

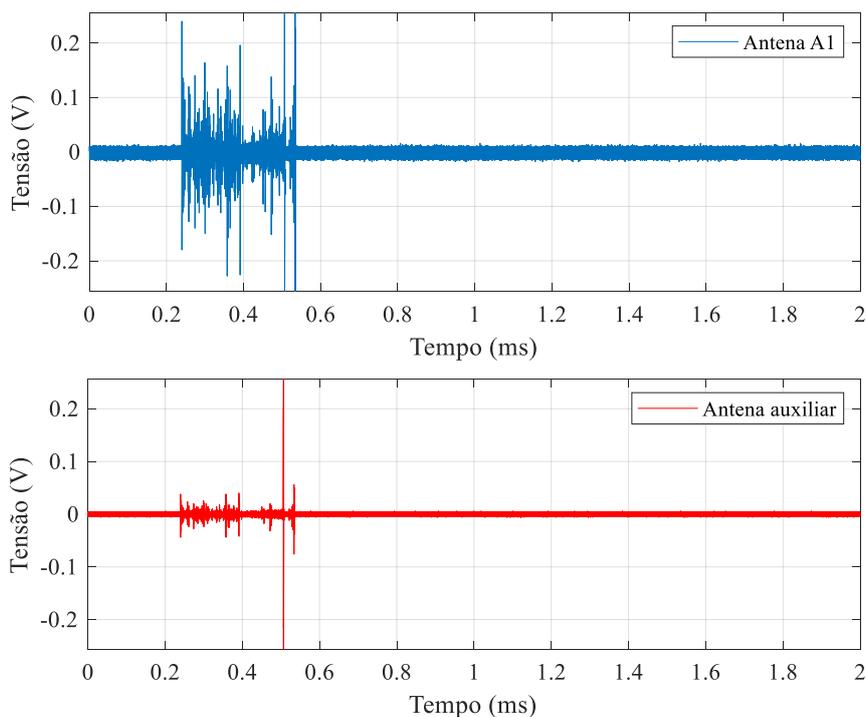
A partir da Figura 37, observa-se que os sinais provenientes de arcos elétricos possuem componentes espectrais em até frequências pouco superiores a 800 MHz. Deste modo, medições simultâneas foram realizadas com a antena projetada (antena A1) e uma antena auxiliar, com frequência de operação de 487 – 1145 MHz, com o intuito de verificar se as componentes de frequência superiores também são suficientes para fornecer a informação necessária para avaliar o disjuntor. Nas Figuras 47 e 48 são apresentados, respectivamente, a antena auxiliar utilizada e os sinais medidos (NOBREGA *et al.*, 2019).

Figura 47: Antena auxiliar. (a) frente; (b) verso (NOBREGA *et al*, 2019).



Fonte: Próprio autor.

Figura 48: Sinais de RF medidos com a antena A1 e a antena auxiliar.

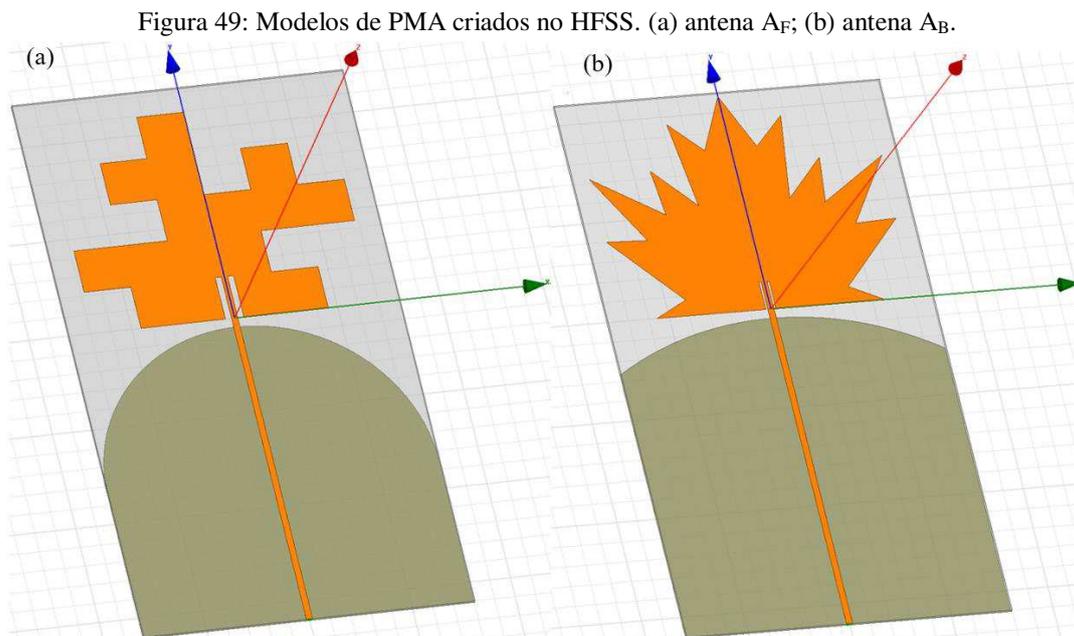


Fonte: Próprio autor.

Baseado no gráfico apresentado na Figura 48, nota-se que, mesmo com uma antena com frequência mínima de operação próximo a 500 MHz, ainda é possível medir os sinais irradiados por arcos elétricos em disjuntores. Os sinais medidos, apesar de possuírem uma intensidade menor do que os obtidos com a antena A1, ainda contêm informações suficientes para que o diagnóstico do disjuntor seja possível.

Deste modo, uma nova PMA foi projetada para as medições em campo com o método proposto. Dois modelos foram investigados, um utilizando a geometria fractal de Minkowski ( $A_F$ ), outro utilizando a geometria bioinspirada na folha *Acer Macrophyllum* ( $A_B$ ). Ambos os modelos foram simulados no *software* HFSS para avaliação da sua faixa

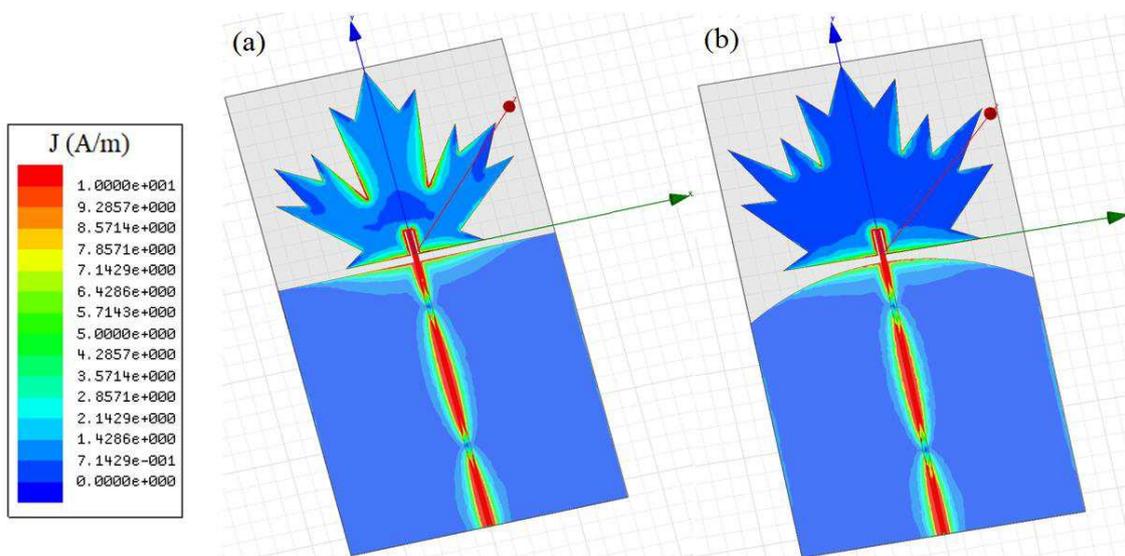
de operação, ganho, diretividade e dimensões. Na figura a seguir são apresentados os modelos criados.



Fonte: Próprio autor.

As dimensões aproximadas das antenas  $A_F$  e  $A_B$  são de 16 x 28 cm e 16 x 27 cm, respectivamente. Para avaliar qual destas PMAs é mais indicada para a aplicação no monitoramento de disjuntores, simulações de coeficiente de reflexão, ganho e padrão de irradiação foram realizadas. Durante o projeto destas antenas, as mesmas foram submetidas à técnica de otimização apresentada na seção 4.4, como pode ser visto na Figura 50.

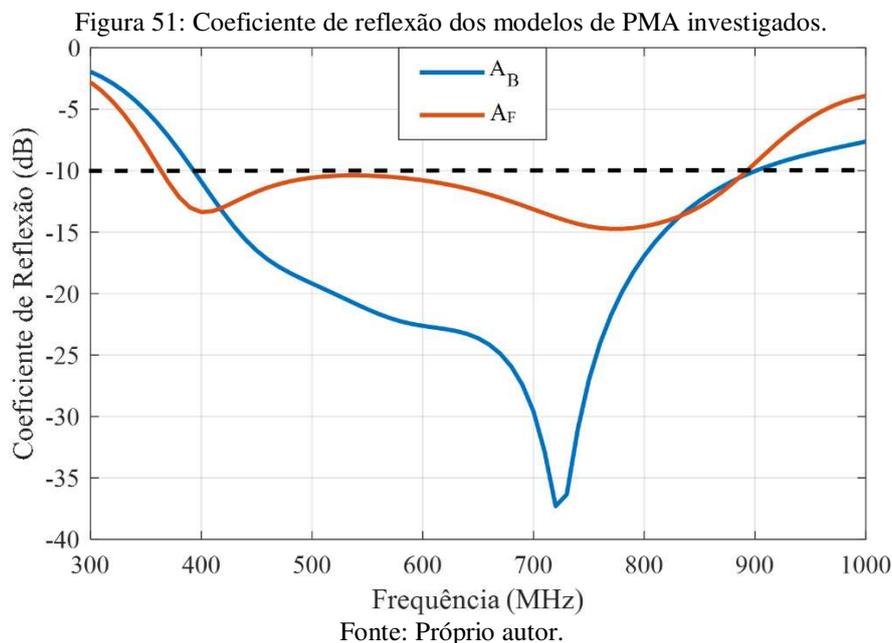
Figura 50: Antena  $A_B$  (a) antes; (b) depois da técnica de otimização proposta.



Fonte: Próprio autor.

A partir das simulações apresentadas na Figura 50, fica evidenciado que com os ajustes realizados no plano de terra e no *patch*, a PMA apresentou uma diminuição da densidade de corrente em pontos fora da linha de alimentação, proporcionando uma melhoria significativa no desempenho da antena, o que pode ser visto nos resultados apresentados a seguir. O mesmo procedimento também foi realizado para a antena  $A_F$ .

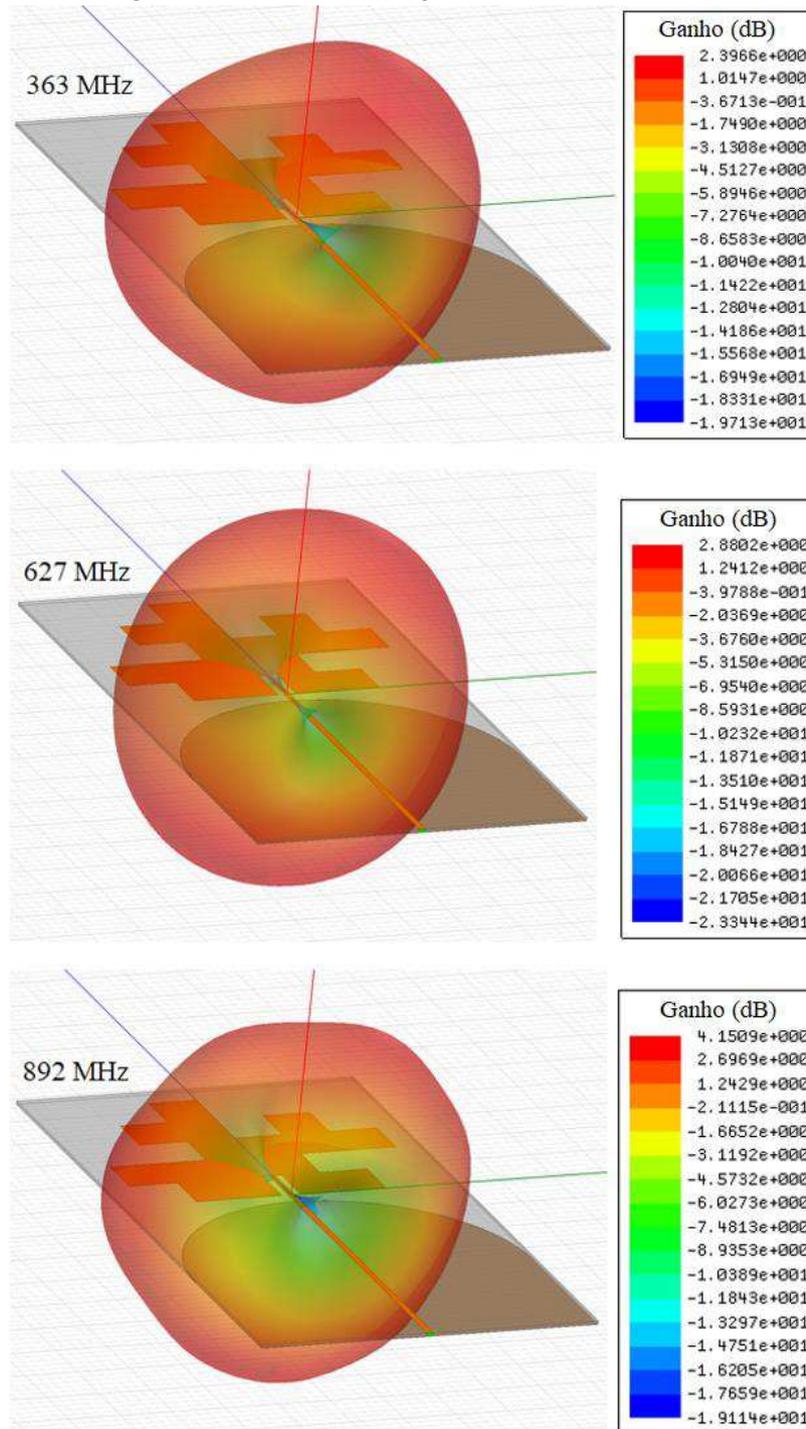
Na Figura 51, os coeficientes de reflexão dos modelos de PMA investigados são apresentados.



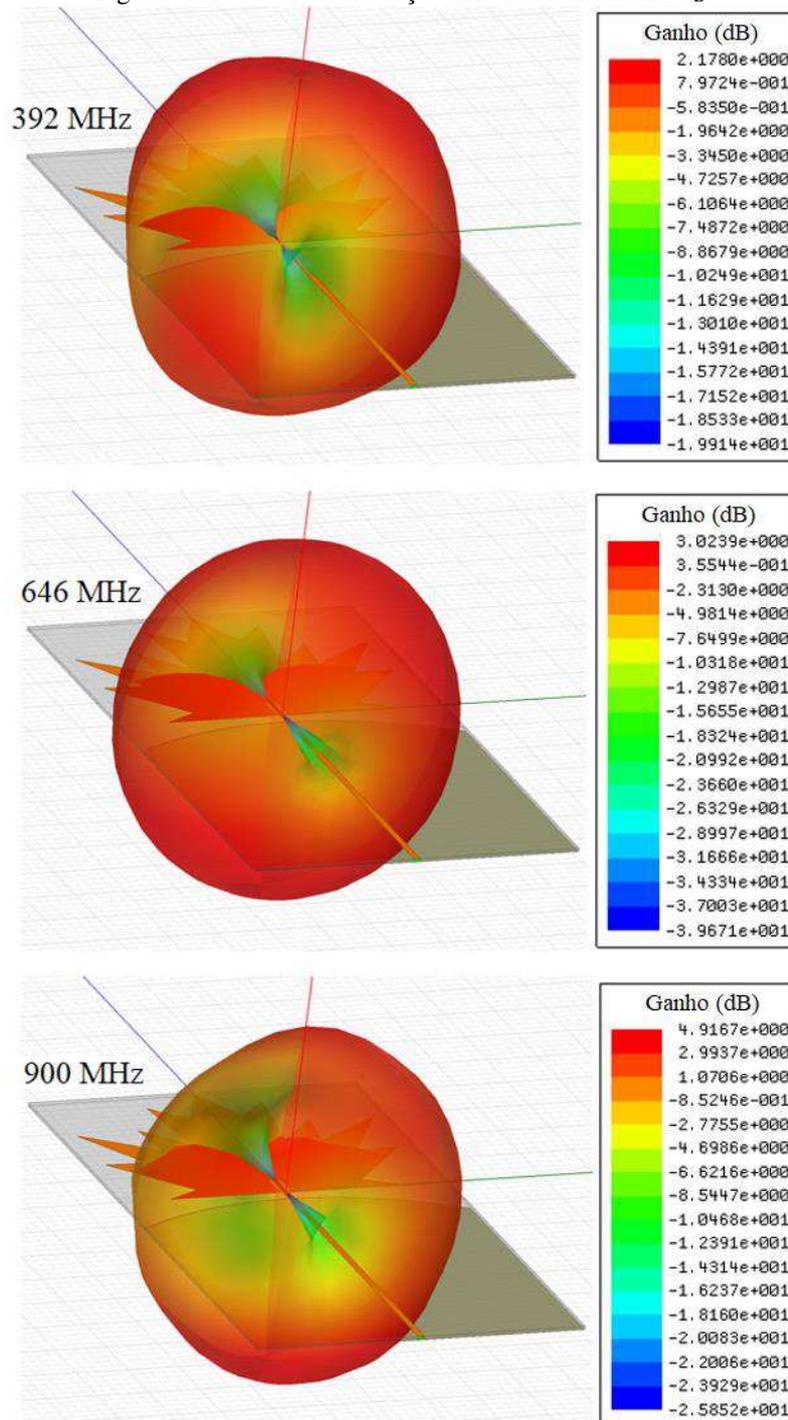
De acordo com os coeficientes de reflexão simulados, a faixa de operação das antenas  $A_F$  e  $A_B$  são de 363 – 892 MHz e 393 – 900 MHz, respectivamente. Apesar de possuir uma faixa de operação um pouco maior, a antena  $A_F$  apresenta um coeficiente de reflexão bem inferior ao da antena  $A_B$ . Portanto, neste aspecto, o uso da antena  $A_B$  é mais indicado para a técnica proposta.

Para a técnica desenvolvida neste trabalho, as antenas devem possuir, idealmente, um padrão de irradiação omnidirecional, uma vez que, desta forma, os sinais de RF provenientes dos três polos do disjuntor poderão ser medidos. Assim, os padrões de irradiação das antenas  $A_F$  e  $A_B$  foram simulados para suas respectivas frequências mínimas, máximas e médias de operação, tal como é apresentado nas Figuras 52 e 53.

Figura 52: Padrões de irradiação simulados da antena  $A_F$ .



Fonte: Próprio autor.

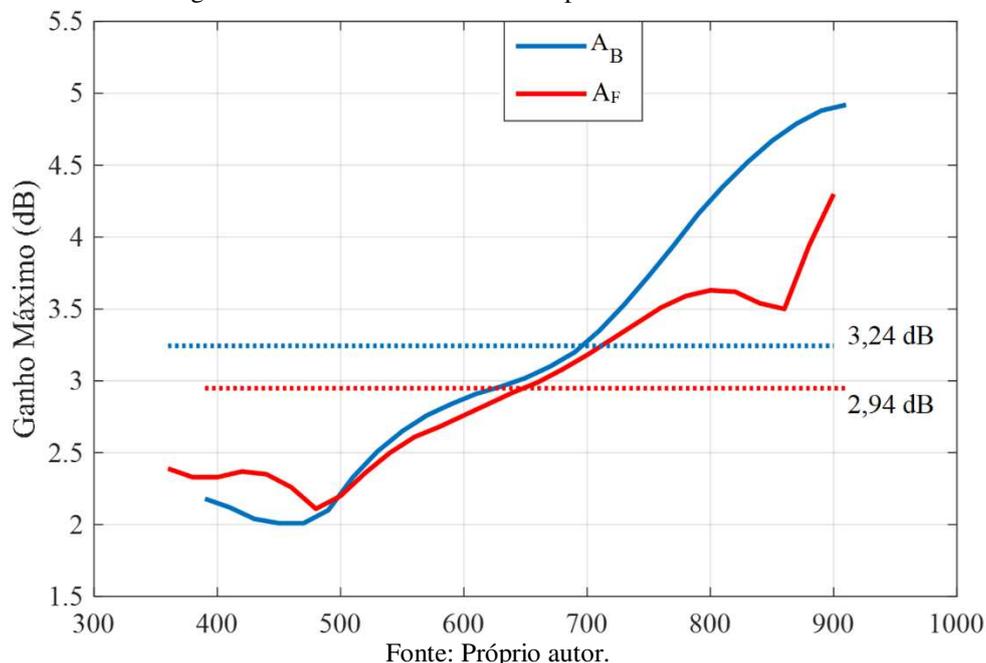
Figura 53: Padrões de irradiação simulados da antena  $A_B$ .

Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 52 e 53, observa-se que tanto a antena  $A_F$  como a  $A_B$  possuem um padrão de irradiação aproximadamente omnidirecional. Além disso, ambas apresentam pouca distorção ao longo da sua faixa de operação. Deste modo, em relação à diretividade, as duas antenas investigadas são adequadas para a utilização na técnica proposta.

Uma das formas de avaliação da sensibilidade de antenas é a partir do seu ganho. Assim, os ganhos máximos para as antenas  $A_F$  e  $A_B$  foram simulados com um intervalo de 20 MHz ao longo de suas respectivas faixas de operação. Estes valores, bem como o valor médio do ganho máximo são apresentados na Figura 54.

Figura 54: Ganho máximo simulado para as antenas  $A_F$  e  $A_B$ .



Considerando os pré-requisitos de ganho citados na seção 5.2, os resultados de ganho simulado obtidos para as antenas  $A_F$  e  $A_B$  são considerados satisfatórios, visto que ambos se mantiveram acima de 2 dB ao longo de suas respectivas faixas de operação. No entanto, a antena  $A_B$  é considerada a melhor opção por possuir um ganho médio superior, de 3,24 dB.

De acordo com as comparações realizadas entre as antenas investigadas, a antena  $A_B$  foi escolhida para a aplicação final em campo, uma vez que seus valores simulados de coeficiente de reflexão, ganho e padrão de irradiação a tornam ideal para o uso na técnica proposta.

Em comparação com outros sistemas de medição apresentados na literatura para o monitoramento radiométrico de disjuntores, as PMAs apresentadas nesta pesquisa se destacam por terem sido cuidadosamente projetadas especificamente para esta aplicação. Desse modo, além da boa sensibilidade aos sinais de RF gerados pelo disjuntor, as antenas possuem dimensões reduzidas, facilitando sua aplicação em diferentes tipos de disjuntores, e sua faixa de operação as tornam imune a interferências tipicamente presentes em subestações, como as provenientes do efeito corona.

## 5.5 TESTES EM LABORATÓRIO DA PMA APERFEIÇOADA

Devido às características mencionadas na seção anterior, a antena  $A_B$  foi escolhida como a mais adequada, dentre os modelos investigados, para utilização na técnica desenvolvida neste trabalho. Assim, quatro cópias praticamente idênticas deste modelo foram fabricadas mediante um processo de corrosão com percloroeto de ferro ( $FeCl_3$ ), e nomeadas como A, B, C e D. Uma das amostras fabricadas é apresentada na Figura 55.

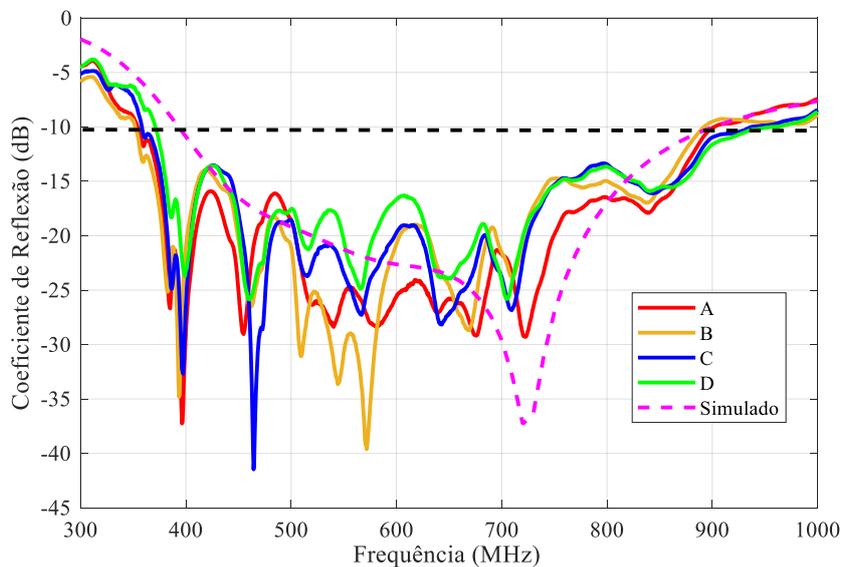
Figura 55: Frente e verso da PMA bioinspirada fabricada.



Fonte: Próprio autor.

Para verificar a validade dos resultados obtidos via simulação, o analisador de rede apresentado na Figura 26 foi utilizado para medir o coeficiente de reflexão das PMAs fabricadas. Os valores medidos e simulados são apresentados na Figura 56.

Figura 56: Coeficiente de reflexão medido e simulado das PMAs bioinspiradas.



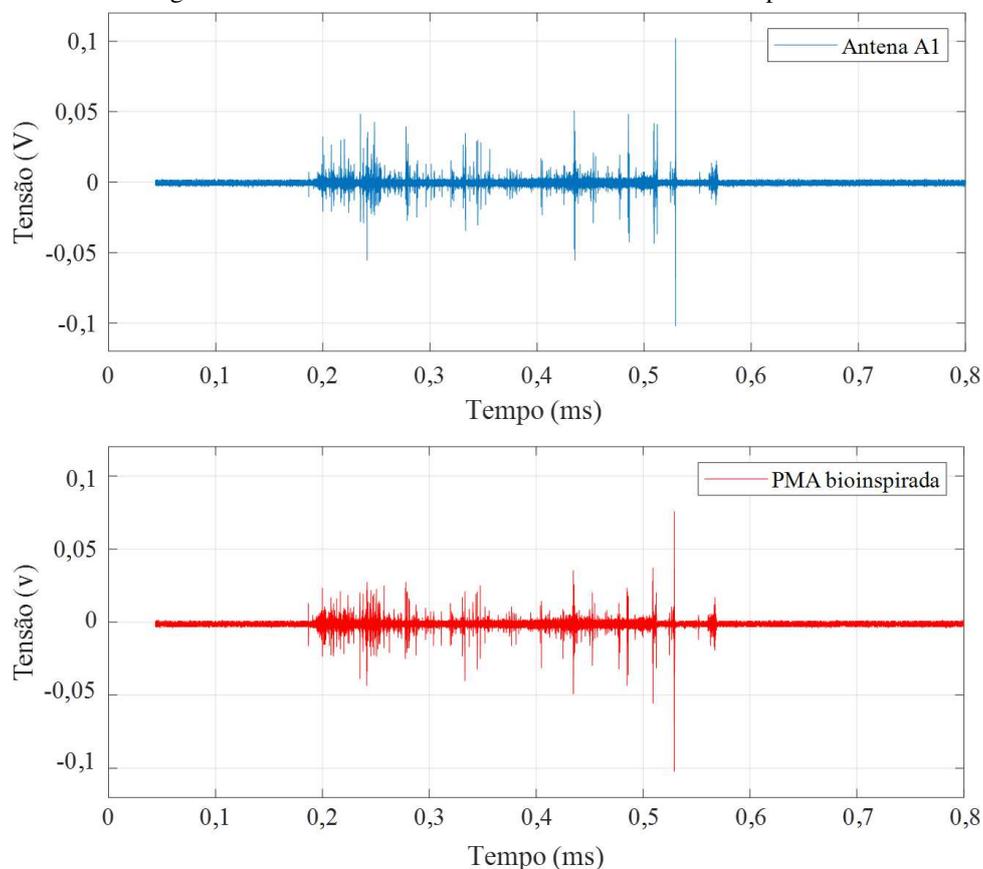
Fonte: Próprio autor.

Assim como no caso da antena A1, os valores de coeficiente de reflexão medidos para as PMAs bioinspiradas foram relativamente próximos aos simulados, indicando faixas de operação de 353 – 902 MHz, 351 – 892 MHz, 358 – 937 MHz e 370 – 956 MHz para as PMAs A, B, C e D, respectivamente.

As diferenças encontradas entre os valores medidos e simulados podem ser atribuídas às simplificações durante o processo de simulação, como a desconsideração dos conectores SMA. Ademais, os cabos e adaptadores utilizados nas medições também podem ter provocado pequenas interferências nos resultados.

Para comparar a sensibilidade das antenas bioinspiradas com o modelo inicial (antena A1), uma medição simultânea foi realizada durante a abertura do disjuntor PVO em laboratório, interrompendo uma corrente de aproximadamente 300 A. Os sinais medidos são apresentados na Figura 57.

Figura 57: Sinais de RF medidos com a PMA A1 e bioinspirada.

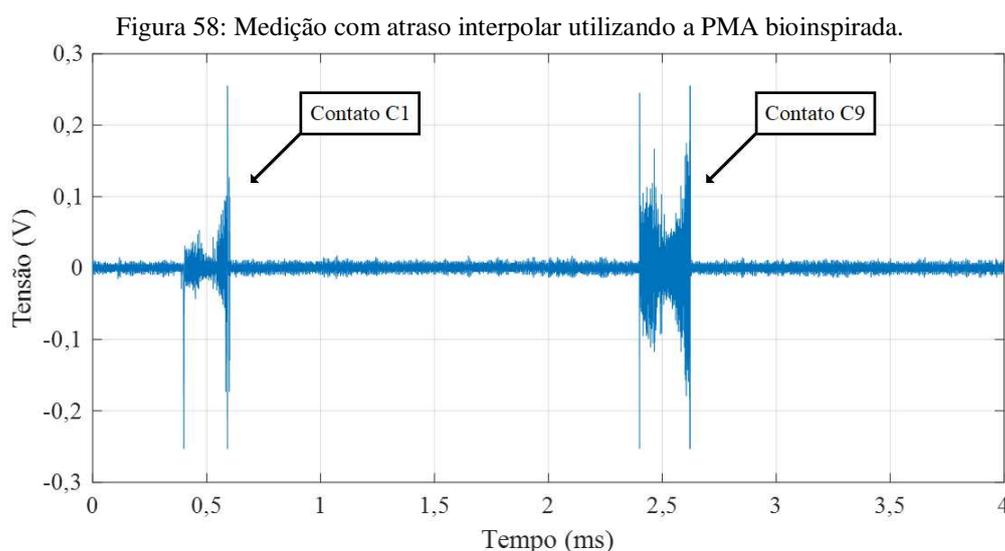


Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados apresentados na Figura 57, observa-se que, embora a PMA bioinspirada possua uma frequência mínima de operação maior que a da antena A1, sua sensibilidade aos sinais de RF irradiados por arcos elétricos em disjuntores é semelhante.

Complementarmente, por possuir uma frequência mínima de operação acima de 350 MHz, a PMA bioinspirada se torna imune a interferências comumente presentes em subestações, como as provenientes de efeito corona, que possui componentes de frequência significativas até cerca de 200 MHz (KOCK, 1996).

Como preparação para as medições em campo, algumas medições em laboratório foram realizadas para avaliar como a identificação do polo de origem dos sinais pode ser realizada. Para tanto, inicialmente foram medidos os sinais de RF gerados durante a abertura simultânea de dois polos do disjuntor PVO. As medições foram realizadas interrompendo uma corrente de aproximadamente 250 A em cada polo. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 58.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados apresentados na Figura 58 evidenciam que, enquanto a duração dos sinais de RF gerados pelos arcos elétricos são, predominantemente, de frações de milissegundos, existe um intervalo recorrente entre os sinais provenientes de cada polo (na faixa de 2 – 3 ms), ocasionado pela falta de sincronia na abertura dos contatos. Embora atrasos interpolares de até 5 ms sejam previstos e aceitáveis, atrasos maiores que isso são indicativos de falha mecânica.

Sendo assim, considerando que a maioria das falhas que ocorrem em disjuntores são de origem mecânica, a avaliação do estado operacional do sistema de acionamento, proporcionada pelo método proposto via análise do sincronismo entre os polos, consiste em outra contribuição significativa do método desenvolvido.

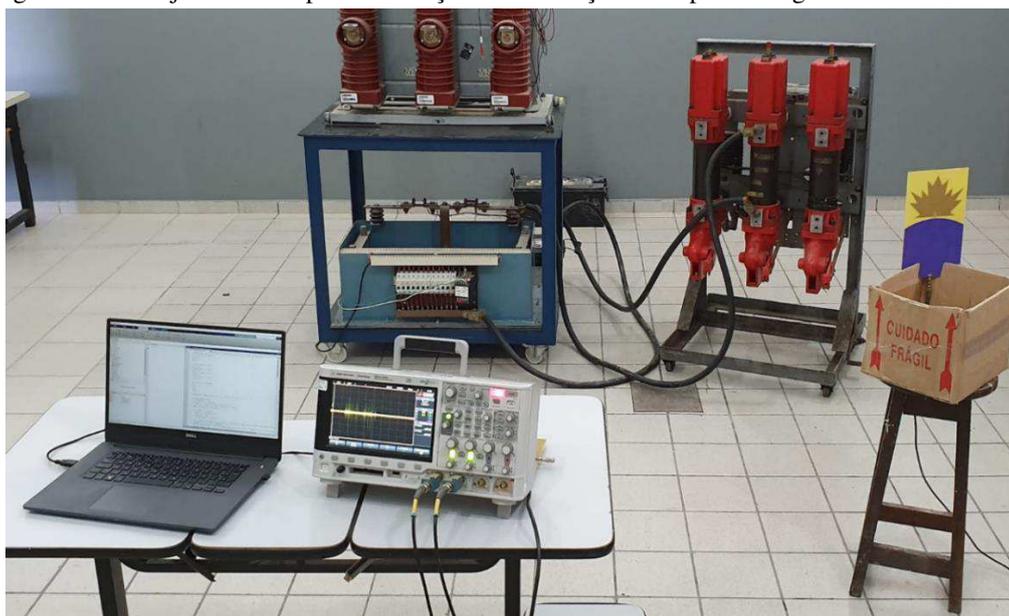
Além da detecção da perda de sincronia na abertura dos contatos, o tempo de abertura ou tempo de interrupção, que é outro parâmetro essencial para avaliação do

sistema mecânico, pode ser obtido a partir da instalação de um sensor auxiliar na bobina de acionamento. O tempo de abertura é definido como o intervalo entre o envio do sinal de gatilho para o circuito de comando do disjuntor e o instante em que a corrente é interrompida (destacado na Figura 42). Assim, calculando o intervalo entre o sinal de gatilho captado pelo sensor auxiliar e o instante de interrupção de corrente, o tempo de abertura pode ser obtido, e mais uma forma de avaliação do estado operacional do disjuntor pode ser agregada ao método proposto.

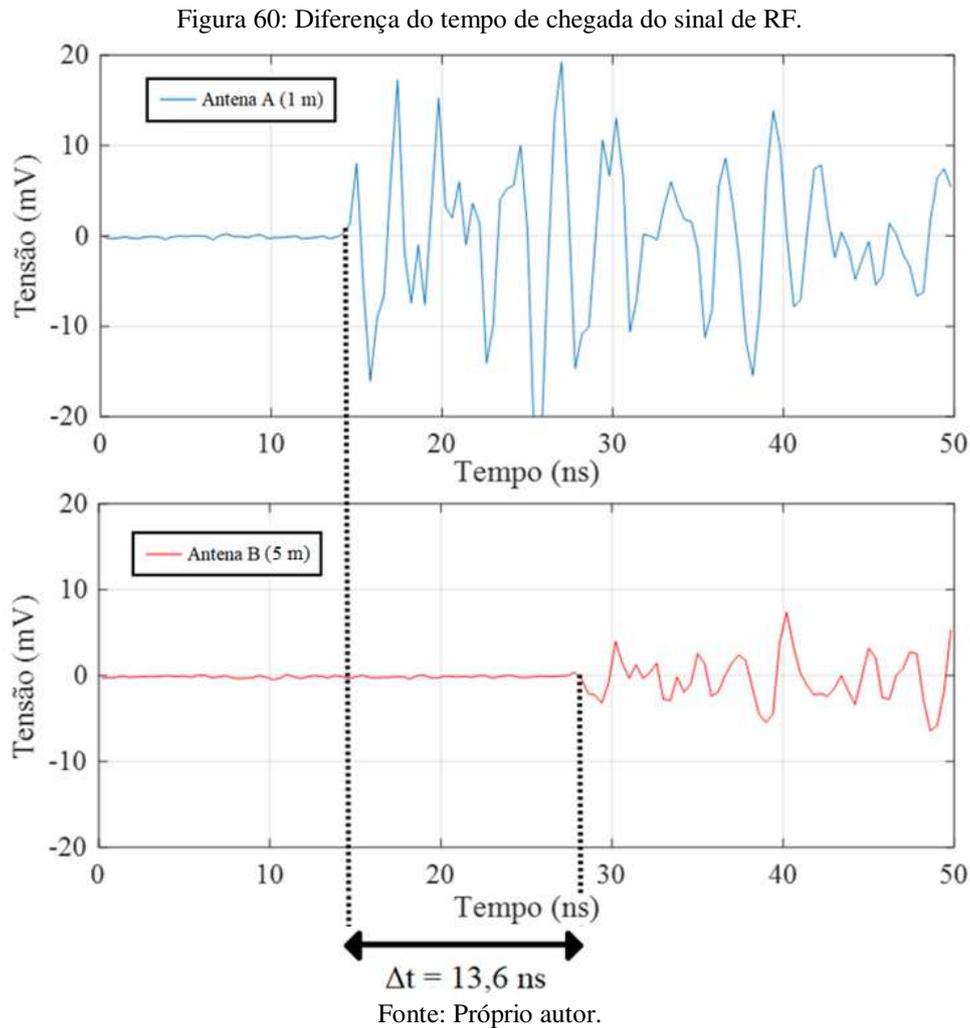
Uma vez detectados os sinais de RF gerados nos três polos, a associação de cada sinal ao seu polo de origem deve ser realizada caso a avaliação individual dos contatos seja necessária. Para este propósito, um algoritmo de identificação baseado na diferença do tempo de chegada dos sinais a cada antena deve ser implementado.

Um ensaio em laboratório foi realizado para verificar se a diferença do tempo de chegada dos sinais de RF nas antenas pode ser detectada. Assim, o arranjo experimental apresentado na Figura 59 foi utilizado. Neste arranjo, as antenas A e B foram instaladas a uma distância aproximada de 1 m e 5 m do disjuntor, respectivamente. Os sinais obtidos em uma das medições com este arranjo são apresentados na Figura 60.

Figura 59: Arranjo de ensaio para a detecção da diferença do tempo de chegada dos sinais de RF.



Fonte: Próprio autor.



A partir dos resultados apresentados na Figura 60, nota-se que, embora as antenas utilizadas sejam praticamente idênticas, e a origem do sinal de RF seja a mesma, os sinais medidos possuem algumas diferenças devido a variação da distância das antenas para o disjuntor. Inicialmente observa-se que a intensidade do sinal captado pela antena B é consideravelmente menor que o captado pela antena A. Isto ocorre devido às atenuações durante a propagação do sinal. Além disso, considerando o sinal da antena A como referência, existe um atraso de aproximadamente 13,6 ns para a chegada do sinal à antena B. Este atraso se mostrou bastante próximo do valor teórico (13,3 ns), portanto, conclui-se que a implementação de um algoritmo de identificação é viável, contanto que a resolução do sinal medido seja suficiente para possibilitar a detecção do tempo de chegada.

De acordo com os resultados obtidos em várias medições, foi constatado que, embora a distância da antena para a fonte do sinal afete significativamente a amplitude

dos sinais medidos, a posição da antena ao redor do disjuntor exerce pouco influência na medição.

Uma vez finalizados os experimentos em laboratório, o método proposto foi adaptado e submetido às aplicações em campo, de modo a atestar sua aplicabilidade. Na próxima seção, os resultados obtidos nas medições em uma subestação de 230 kV são apresentados.

## 5.6 EXPERIMENTOS EM CAMPO

Para avaliar a aplicabilidade da técnica proposta, medições na área de 230 kV da subestação Campina Grande II, da CHESF, foram realizadas. A técnica de medição foi utilizada para obter os sinais de RF produzidos durante a abertura de disjuntores a SF<sub>6</sub>, destinados ao chaveamento de reatores de derivação. Os dados de placa, bem como fotografias destes equipamentos são apresentados a seguir.

Tabela 3: Dados de placa dos reatores chaveados.

Equipamento	Reator X	Reator Y
Fabricante	Areva	Brown Boveri S/A
Número de série	111.344/U	4816
Tipo	STO–NN	TJ
Potência nominal	33 MVar	10 MVar
Frequência nominal	60 Hz	60 Hz
Número de fases	3	3

Fonte: Próprio autor.

Figura 61: Reator de derivação de 33 MVar, denominado reator X.



Fonte: Próprio autor.

Figura 62: Reator de derivação de 10 MVar, denominado reator Y.



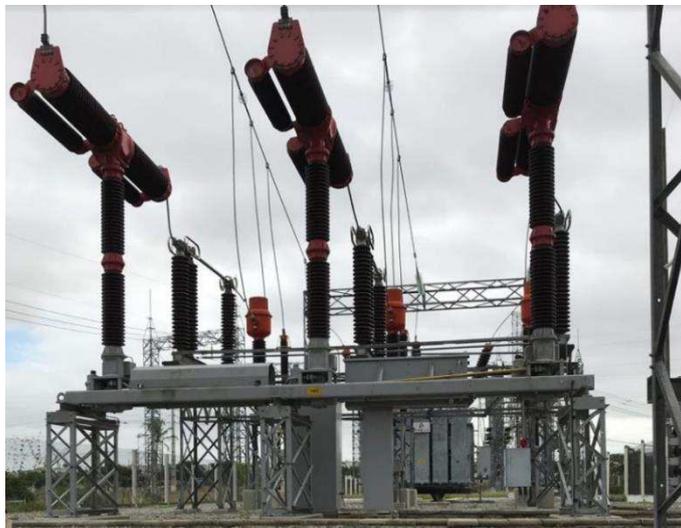
Fonte: Próprio autor.

Tabela 4: Dados de placa dos disjuntores avaliados em campo.

Equipamento	Disjuntor X	Disjuntor Y
<b>Fabricante</b>	Insat	Siemens
<b>Tipo</b>	3AS2	3AS3
<b>Número de série</b>	65.1.019-0/87	S 85/31 236 317
<b>Ano de fabricação</b>	1987	1985
<b>Local de fabricação</b>	Brasil	Alemanha
<b>Tensão nominal máxima</b>	242 kV	245 kV
<b>Corrente nominal em regime contínuo</b>	2 kA ef.	2 kA ef.
<b>Frequência nominal</b>	60 Hz	60 Hz
<b>Corrente de interrupção simétrica máxima</b>	50 kA	40 kA

Fonte: Próprio autor.

Figura 63: Disjuntor de 242 kV, modelo 3AS2, denominado disjuntor X.



Fonte: Próprio autor.

Figura 64: Disjuntor de 245 kV, modelo 3AS2, denominado disjuntor Y.



Fonte: Próprio autor.

Os disjuntores X e Y possuem uma diferença construtiva que afeta significativamente os resultados obtidos com a técnica proposta. Embora ambos possuam duas câmaras de interrupção em série e capacitores de equalização em cada polo, o disjuntor Y é o único que possui resistores de pré-inserção. Com isso, as características do arco elétrico são modificadas.

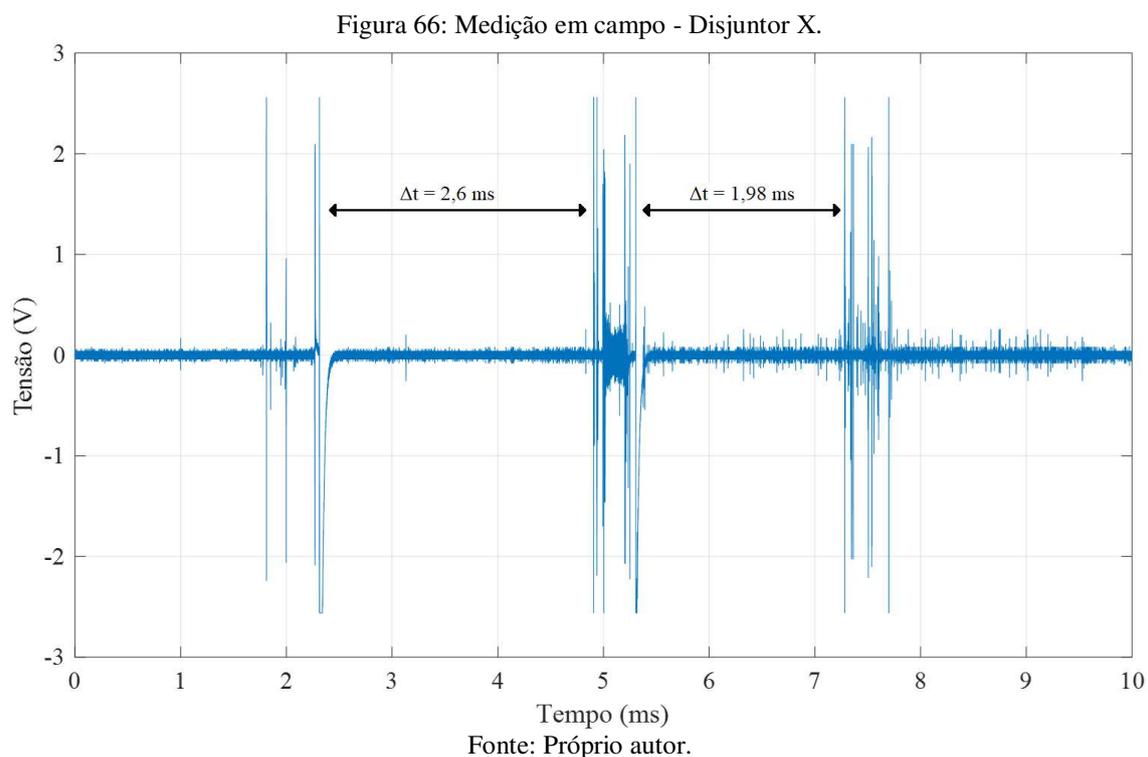
Em todos os ensaios realizados, o sistema de medição, composto pela PMA bioinspirada e um osciloscópio, foram instalados em frente ao disjuntor X, a uma distância de aproximadamente 6 m para respeitar o limite de campo distante da antena, como é apresentado na Figura 65.

Figura 65: Arranjo de medição em campo.



Fonte: Próprio autor.

A primeira medição foi realizada durante a abertura do disjuntor X (chaveando o reator X). O resultado obtido é apresentado na Figura 66.



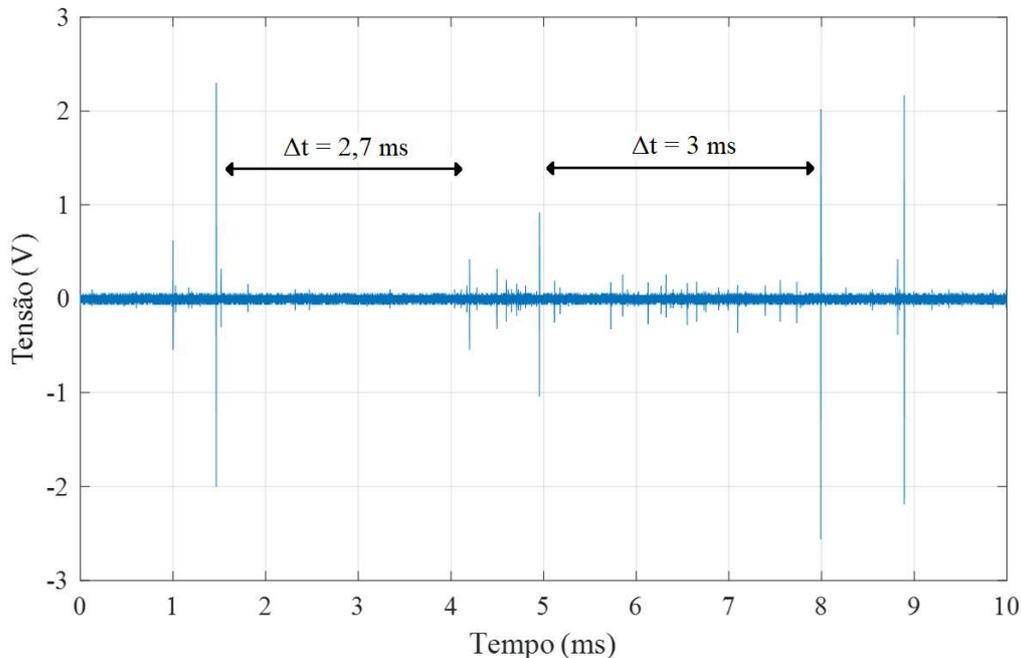
Por apresentar uma boa RSR, os sinais de RF produzidos nos três polos do disjuntor podem ser facilmente identificados. O sinal apresentado na Figura 66 foi submetido a uma rotina computacional, a partir da qual foram calculadas as durações dos três arcos elétricos: 0,5 ms, 0,4 ms e 0,41 ms. Ademais, intervalos de 2,6 ms e 1,98 ms foram detectados entre estes sinais. Além disso, observou-se um nível de ruído acima da média nos instantes após o segundo arco elétrico. Isto se deve, provavelmente, às reflexões dos sinais nas partes metálicas presentes na subestação.

Como são utilizados para o chaveamento de reatores de derivação, os disjuntores X e Y operam praticamente todos os dias. Portanto, tratam-se de casos ideais para aplicação da técnica proposta, uma vez que o monitoramento contínuo destes equipamentos possibilita uma avaliação mais confiável dos seus estados operacionais. A criação de um banco de dados com o histórico de aberturas facilita o acompanhamento dos parâmetros mencionados, permitindo a identificação de possíveis defeitos em sua fase inicial e, conseqüentemente, proporcionando um sistema de gestão de ativos mais eficiente.

Em outra tentativa de medir os sinais provenientes do disjuntor X, houve uma abertura inesperada do disjuntor Y (utilizado para chavear o reator Y), localizado a cerca

de 25 m do disjuntor X. Apesar da distância e do posicionamento inadequado da antena, os sinais gerados no disjuntor Y foram medidos e são apresentados na Figura 67.

Figura 67: Medição em campo - Disjuntor Y.



Fonte: Próprio autor.

Como esperado, o sinal apresentado na Figura 67 possui uma intensidade significativamente menor que o sinal da Figura 66, como esperado devido à distância. Ainda assim, nos instantes de maior instabilidade do arco elétrico (formação e extinção do arco), existe uma irradiação de maior intensidade que permite a detecção da duração do arco e do atraso interpolar. As durações de arco elétrico calculadas para o disjuntor Y foram de 0,47 ms, 0,75 ms e 0,89 ms.

Considerando que a energia dos sinais medidos é consideravelmente maior quando as PMAs estão posicionadas mais próximas ao disjuntor, um algoritmo de seleção pode ser desenvolvido para descartar as medições cuja energia dos sinais estejam abaixo de um limiar pré-definido. Assim, o sistema de monitoramento se tornará dedicado apenas a um disjuntor, pois será imune à interferências provenientes de outros disjuntores.

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento da pesquisa, a partir dos quais constatou-se a aplicabilidade, flexibilidade e eficiência do método proposto. A partir das medições realizadas em laboratório e em campo, constatou-se que o método desenvolvido se destaca em relação aos demais trabalhos da área por proporcionar uma avaliação mais completa do disjuntor, sendo capaz de avaliar o sistema mecânico, o meio isolante/extintor e o estado dos

contatos. Complementarmente, destaca-se que a avaliação do nível de degradação dos contatos via medições radiométricas é algo ainda não abordado na literatura.

No próximo capítulo, as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento desta tese são apresentadas.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um novo método de monitoramento radiométrico para o diagnóstico de disjuntores de alta tensão, baseado na análise de sinais de RF irradiados. O método é capaz de tornar o processo de inspeção e diagnóstico de disjuntores mais eficiente, de modo não invasivo e objetivo, fornecendo, para as equipes de manutenção, alertas quanto a necessidade de intervenção no equipamento. Assim, o método pode ser utilizado para auxiliar na gestão de ativos.

Foi projetado um sistema de medição otimizado, composto por PMAs bioinspiradas na folha *Acer Macrophyllum*, que se destacam por serem de fácil fabricação e instalação. A partir da aplicação de técnicas de otimização, obteve-se uma antena de banda larga, com dimensões reduzidas (16 x 27 cm) e que possui uma faixa de operação que a proporciona boa sensibilidade aos sinais de RF gerados por disjuntores e grande imunidade às interferências presentes em subestações, como as descargas corona.

Uma rotina computacional baseada no uso de técnicas estatísticas foi desenvolvida como ferramenta para processamento de sinais. A partir desta rotina, parâmetros avaliativos foram extraídos dos sinais medidos, permitindo a avaliação do estado operacional do disjuntor. Constatou-se que, dentre os parâmetros avaliados, os valores de mediana e IIQ, retirados do banco de dados contendo os valores de duração de arco, apresentaram uma maior correlação com o nível de degradação dos contatos.

A partir de experimentos em laboratório, evidenciou-se que diversos aspectos do estado operacional do disjuntor podem ser avaliados, tais como o estado do sistema mecânico, o estado do meio isolante/extintor e o nível de degradação dos contatos. A avaliação do estado dos contatos destaca-se por ser um ponto ainda não explorado em outros trabalhos encontrados na literatura, que abordam este aspecto dos disjuntores via técnicas radiométricas.

A partir de análises comparativas com a técnica de referência (MRD), constatou-se que o método radiométrico proposto obteve uma acurácia de 100%. Para tanto, um algoritmo classificador foi utilizado, empregando parâmetros estatísticos extraídos do banco de dados com os valores medidos de duração de arco elétrico.

O método de monitoramento proposto não é limitado a um tipo específico de disjuntor, podendo ser aplicado a disjuntores que utilizam diferentes tipos de tecnologia, como disjuntores a óleo e SF<sub>6</sub>, ambos abordados nesta pesquisa. Além disso, por serem

de dimensões reduzidas, as PMAs projetadas podem ser adaptadas para a instalação em janelas dielétricas de subestações isoladas a gás.

A viabilidade do método proposto foi atestada por meio de ensaios em campo, realizados em disjuntores a SF<sub>6</sub> (230 kV) destinados ao chaveamento de reatores de derivação. A partir de pequenas modificações no que foi desenvolvido em laboratório, o sistema de medição foi capaz de detectar com uma boa RSR os sinais irradiados pelos arcos elétricos. Com uma rotina computacional para a análise destes sinais, foi possível o cálculo da duração dos arcos elétricos e do intervalo interpolar, ambos parâmetros críticos para a avaliação do estado dos contatos e do estado do sistema mecânico do disjuntor.

Como trabalhos futuros, pretende-se dar continuidade à pesquisa apresentada neste trabalho, aprimorando-a com o objetivo de desenvolver um sistema de monitoramento completamente aplicável em campo. Para tanto, um sistema de aquisição, processamento e transmissão remota de dados deve ser projetado. Um *software* dedicado deve ser desenvolvido para a aplicação do método de forma mais eficiente e objetiva, diminuindo a subjetividade na análise dos sinais medidos. O posicionamento do sistema de medição deve ser otimizado, definindo um ponto ótimo para a instalação das antenas, bem como projetando um suporte mecânico que não interfira no desempenho das mesmas. Em suma, pretende-se desenvolver um método de monitoramento de disjuntores que alcance o estado da arte na área de radiometria.

# PUBLICAÇÕES

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>Evento/Periódico</b>	<b>Ano</b>
SOUZA, R. T. COSTA, E. G. <b>OLIVEIRA, A. C.</b> SOUSA, W. V. MORAIS, T. C. M.	Characterization of contacts degradation in circuit breakers through the dynamic contact resistance	PES T&DLA	2014
SOUZA, R. T. COSTA, E. G. <b>OLIVEIRA, A. C.</b> MORAIS, T. C. M.	Avaliação das Técnicas de Medição da Resistência de Contato em Disjuntores de Média e Alta Tensão	CLAGTEE	2015
<b>OLIVEIRA, A. C.</b> SOUZA, R. T. COSTA, E. G. SOUSA, W. V.	Analysis of test current and contacts' opening speed influences on dynamic resistance tests in circuit breakers	CLAGTEE	2015
SOUZA, R. T. COSTA, E. G. <b>OLIVEIRA, A. C.</b>	Circuit Breaker Contact Diagnostics Based on Dynamic Resistance and Fuzzy Logic	ISH	2015
<b>OLIVEIRA, A. C.</b> SOUZA, R. T. SOUSA, W. V. COSTA, E. G.	Analysis of Test Current and Contact Opening Speed Influence on Dynamic Resistance Tests on Circuit Breakers	ISH	2015
SOUSA, W. V. ASSIS, F. M. FERREIRA, T. V. <b>OLIVEIRA, A. C.</b>	Aplicação da Transformada Wavelet a Sinais Reais de Resistência Dinâmica de Contato	SBSE	2016
<b>OLIVEIRA, A. C.</b> SANTANA, H. N. COSTA, E. G. SOUZA, R. T.	Monitoramento Online e Diagnóstico de Disjuntores de Alta Tensão a Partir do Sinal Eletromagnético Irradiado	SBSE	2016
XAVIER, G. V. R. COSTA, E. G. SERRES, A. J. R. <b>OLIVEIRA, A. C.</b> NOBREGA, L. A. M. M.	Study on the Applicability of Microstrip Circular Antennas in Partial Discharges Detection in Power Transformers	SBSE	2018
XAVIER, G. V. R. COSTA, E. G. SERRES, A. J. R. SOUSA, H. F. S. <b>OLIVEIRA, A. C.</b> NOBREGA, L. A. M. M.	Design and Application of an UHF Microstrip Circular Antenna for Partial Discharges Detection in Power Transformers	ICHVE	2018

Autores	Título	Evento/Periódico	Ano
PRISCO, R. K. ALMEIDA, A. C. A. GUEDES, W. B. <b>OLIVEIRA, A. C.</b> COSTA, E. G. SANTANA, H. N. SOUSA, H. F. S. SOUZA, V. C.	Magnetic Coupling Sensor Applied to the Monitoring of High Voltage Circuit Breakers	IWADA	2019
CRUZ, J. SERRES, A. J. R. <b>OLIVEIRA, A. C.</b> XAVIER, G. V. R. ALBUQUERQUE, C. C. R. COSTA, E. G. FREIRE, R. C. S.	Bio-inspired Printed Monopole Antenna Applied to Partial Discharge Detection	MDPI Sensors	2019
XAVIER, G. V. R. COSTA, E. G. SERRES, A. J. R. NOBREGA, L. A. M. M. <b>OLIVEIRA, A. C.</b> SOUSA, H. F. S.	Design and Application of a Circular Printed Monopole Antenna in Partial Discharge Detection	IEEE Sensors Journal	2019
<b>OLIVEIRA, A. C.</b> COSTA, E. G. SERRES, A. J. R. SOUSA, H. F. S. SANTANA, H. N. FERREIRA, T. V.	Radiometric Monitoring Technique for High Voltage Circuit Breakers	IEEE Transactions on Power Delivery	2019

## REFERÊNCIAS

ABB. *Live Tank Circuit Breakers - Buyer's Guide*. Suécia, 2009.

ADAM, M.; BARABOI, A.; PANCU, C. *Monitoring and diagnostic system for high voltage circuit breakers*. International Conference on Electromechanical and Power Systems, p. 55-60, 2007.

ANDRUSCA, M.; ADAM, M.; IRIMIA, F. D.; BARABOI, A. *Embedded system and software application for monitoring and diagnosis of high voltage circuit breakers*. International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, Romênia, 2012.

ANSI STF C37.100: Definitions for Power Switchgear, 1999.

ANSI/IEEE STD C37: Test procedure for ac high-voltage circuit breakers, 1999.

ARAÚJO, R. L. *Disjuntores*. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Paraná, 2001.

BAGHERPOOR, A.; RAHIMI, S.; RAZI-KAZEMI, A. A.; NIAYESH, K. *Online Condition Assessment of Interruption Chamber of Gas Circuit Breakers Using Arc Voltage Measurement*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017.

BALANIS, C. A. *Antenna Theory - Analysis and Design*. New Jersey. John Wiley & Sons Ltd, 2005.

BHEL. *Handbook of switchgears*. McGraw-Hill Professional, New York, 2006.

BIRD, T. S. *Definition and misuse of return loss*. IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 51, n. 2, p. 166 – 167, 2009.

BLACK, R. M.; REYNOLDS, E. H. *Ionisation and Irradiation Effects in High-Voltage Dielectric Materials*. IEEE Conference on Dielectric and Insulating Materials, vol 112, n. 6, 1965.

BRAITHWAITE, N. S. J. *Introduction to gas discharges*. Plasma Sources Sci. Technol. United Kingdom, vol. 9, p. 517 – 527, 2000.

Campanha de Fiscalização das Transmissoras de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas>>. Acesso em: 29 jan. 2018.

CARVALHO, A. C. C. *et al. Disjuntores e chaves: aplicação em sistemas de potência*. Niterói-RJ: EDUFF, 1995.

CARVER, K. R.; MINK, J. W. *Microstrip antenna technology*. IEEE Transactions on Propagation Antennas, vol. 29, n. 1, p. 2 – 24, 1981.

CHAPMAN, M. Radio-frequency-based determination of arcing duration in HVAC circuit breakers. CIRED – 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Itália, 2005.

CHEN Z. N.; CHIA M. Y. W. *Broadband Planar Antennas: Design and Applications*. West Sussex, Inglaterra. John Wiley & Sons Ltd. 2006.

COSTA, E.; FELIX, T.; GERMANO, A.; ALMEIDA, G.; SOUZA, V. *Estudo das características de curvas de resistência dinâmica de disjuntores utilizando redes neurais artificiais*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), pp. 1 – 6, 2010.

COURANT, R. *Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations*. Bull. Am. Math. Soc., v. 49, 1943.

D'AJUZ, A.; RESENDE, F. M.; CARVALHO, F. M. S.; NUNES, I. G. *Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*. FURNAS/UFF. 1985.

FERREIRA, J. R. R. P. *Principais Tipos de Disjuntores*. 2006.

FLURSCHEIM, C. H. *Power circuit breaker theory and design. V. 1*. The Institution of Engineering and Technology. London, 2008.

FREDRICKSON, A. R. *Progress in High-Energy Electron and X-Irradiation of Insulating Dielectrics*. Brazilian Journal of Physics, vol. 29, n. 2, 1999.

FRONTIM, S. O. *Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas*. Brasília: Teixeira, 2013.

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

GILL, P. *Electrical power equipment maintenance and testing*. Boca Raton: CRC Press, 2008.

GHOSH, S.; CHAKRABARTY, A. *Ultrawideband Performance of Dielectric Loaded T-Shaped Monopole Transmit and Receive Antenna/EMI Sensor*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008.

GODECHOT, X.; CHAKRABORTY, S.; GIRODET, A.; VINSON, P. *Design and tests of vacuum interrupters for high voltage circuit breakers*. International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), 2014.

GREMMEL, H. *Switchgear Manual*. Central-Druck Trost GmbH & Co. 10<sup>a</sup> ed, Berlin, 2002.

HARAZ, O.; SEBAK, A. R. *UWB antennas for wireless applications*. Advancement in Microstrip Antenna with Recent Applications, p. 125 – 152, 2013.

HOIDALEN, H. K.; RUNDE, M. *Continuous Monitoring of Circuit Breakers Using Vibration Analysis*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, n. 4, p. 2458 – 2465, 2005.

MESSENGER, S. *How to grow maple trees in Alberta*. Disponível em: <https://www.techlifetoday.ca/articles/2018/how-to-grow-maple-trees-in-alberta>. Acesso em: 18 de julho de 2019.

HUYNH, T.; LEE, K. F. *Single-layer single-patch wideband microstrip antenna*. *Electronics Letters*, vol. 31, n. 16, p. 1310 – 1312, 1995.

HWANG, K. R. *et al. Development of UHF Sensor for Partial Discharge Diagnosis of Power Transformer*. XVII International Symposium on High Voltage Engineering, 2011.

IEEE C37.011 – IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers, 2005.

IS/IEC 62271-1: High-Voltage Switchgear and Controlgear, Part 1: Common Specifications, 2007.

ISHIGAMI, S.; KATO, Y.; KAWAMATA, K. *Antenna Factor Measurement of Folded Rhombic Antenna for Using Microwave Frequency Range*. International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), France, 2017.

JU, T. *et al. GIS Partial Discharge Quantitative Measurements Using UHF Microstrip Antenna Sensors*. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 116 – 119, 2007.

KATEHI, P. B.; ALEXOPOULOS, N. G. *On the modeling of electromagnetically coupled microstrip antennas-the printed strip dipole*. *IEEE Transactions on Propagation Antennas*, vol. 32, n. 11, p. 1179 – 1186, 1984.

KOCK, N.; CORIC, B.; PIETSCH, R. *UHF PD detection in gas-insulated switchgear suitability and sensitivity of the UHF method in comparison with the IEC 270 method*. *IEEE Electr. Insul. Mag.* vol. 12, p. 20 – 26, 1996.

KRAUS, J. D. *Antennas*. New York: McGraw-Hill, 1988.

KUHLMANN, G.; MUSTAFA, T. I.; PITZ, C. A.; ALMAGUER, H. D.; MEYER, L. H.; CABRAL, S. H. L.; FLORES, F. T.; CEREJA, J. E.; PUCHALE, L. T. *An analysis of the performance of power circuit breakers using the modelling of electric arc and a radiometric system*. International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, França, 2017.

LANDRY, M.; MERCIER, A.; OUELLET, G.; RAJOTTE, C.; CARON, J.; ROY, M.; BRIKCI, F. *A New Measurement Method of the Dynamic Contact Resistance of HV Circuit Breakers*. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, p. 1002 – 1009, 2006.

LANDRY, M.; TURCOTTE, O.; BRIKCI, F. *A Complete Strategy for Conducting Dynamic Contact Resistance Measurements on HV Circuit Breaker*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, p. 710 – 716, 2008.

LI, S. Y.; XIAO, X. J.; ZHOU, G. Y. *A High-Voltage Circuit Breaker Contacts temperature monitoring system based on wireless technology*. IEEE International Conference on Information and Automation, China, 2015.

LIRA, M. A. T.; RODRIGUES, L. M.; MARIANO, E. *Impactos ambientais associados à utilização do gás SF<sub>6</sub> nos disjuntores de potência*. 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE), 2017.

LOPEZ-ROLDAN, J.; PATER, R.; POIRIER, S.; BIRTWHISTLE, D.; TANG, T.; DOCHE, R.; BLUNDELL, M. *Development of non-intrusive monitoring for reactive switching of high voltage circuit breaker*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 61, p. 219 – 228, 2014.

LUK, K. M. *et al. Broadband microstrip patch antenna*. Electronics Letters, vol. 34, p. 1442 – 1443, 1998.

LUO, H. *et al.* *Research on the UHF Microstrip Antenna for Partial Discharge Detection in High Voltage Switchgear*. IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), p. 2273 – 2276, 2016.

MANDELBROT, B. B. *Objetos Fractais: forma, acaso e dimensão*. Gradiva Publicações, Lisboa, 1991.

MCDONALD, J. D. *Electric Power Sbstations Engineering*. CRC Press, Florida, 2003.

MEIER, S. D.; MOORE, P. J.; COVENTRY, P. F. *Radiometric Timing of High-Voltage Circuit-Breaker Opening Operations*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, p. 1411 – 1417 , 2011.

MELLI, S. A.; NADIAN, A.; AMINI, B.; ASADI, N. *Design of online circuit breaker condition monitoring hardware*. 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation, Iran, 2011.

MELO, D. R. *Antenas Compactas de Microondas de Banda Larga e Banda Ultra-Larga (UWB)*. 2011.

MOORE, P. J. *Radiometric Measurement of Circuit Breaker Interpole Switching Times*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, p. 987 – 992, 2004.

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*. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Suécia, 2014.

MUSTAFA, T. I.; PITZ, C. A.; ALMAGUER, H. D.; MEYER, L. H.; CABRAL, S. H. L.; FLORES, F. T.; CEREJA, J. E.; PUCHALE, L. B.; SANTOS, J. V. C. *An analysis of the performance of power circuit breakers using a non-invasive system*. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2016.

NAIDU, M. S.; KAMARAJU, V. *High Voltage Engineering*. McGrallHill, 1996.

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

NOBREGA, L. A. M. M.; XAVIER, G. V. R.; AQUINO, M. V. D.; SERRES, A. J. R.; ALBUQUERQUE, C. C. R.; COSTA, E. G. *Design and Development of a Bio-inspired UHF Sensor for Partial Discharge Detection In Power Transformers*. Sensors MDPI, 2019.

NORRIE, D. H.; VRIES, G. *An Introduction to Finite Element Method*. London: Academic Press, 1978.

OLIVEIRA, A. C. *Ensaio de Resistência Dinâmica em Disjuntores: Análise de Sensibilidade da Corrente e da Velocidade de Abertura dos Contatos*. Dissertação de Mestrado. 2015.

OLIVEIRA, A. C.; SANTANA, H. N.; COSTA, E. G. *Monitoramento Online e Diagnóstico de Disjuntores de Alta Tensão a Partir do Sinal Eletromagnético Irrradiado*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). Natal. 2016.

PAUL, C. R. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. New York: Wiley, 1992.

PONS, A.; SABOT, A.; BABUSCI, G. *Electrical Endurance and Reliability of Circuit-Breakers – Common Experience and Practice of two utilities*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, n. 1, p. 168 – 174, 1993.

PORTUGUÉS, I.; MOORE, P. J.; GLOVER, I. A. *Characterisation of Radio Frequency Interference from High Voltage Electricity Supply Equipment*. 12th International Conference on Antennas and Propagation, 2003.

POZAR, D. M. *A microstrip antenna aperture coupled to a microstrip line*. Electronic Letters, vol. 21, p. 49 – 50, 1985.

PUENTE, C. ROMEU, J. POUS, R. CARDAMA, A. *On the Behavior of the Sierpinski Multiband Fractal Antenna*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 46, n. 4, p. 517 – 524, 1998.

RAMILI, S.; BIRTWISTLE, D.; LOPEZ-ROLDAN, J.; TANG, T. *EHV Circuit Breaker Condition Monitoring using Antenna-based Coupling Methods*. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2008.

RIZK, F. A. M.; TRINH, G. N. *High Voltage Engineering*. CRC Press, 2014.

SADIKU, M. N. O. *A simple introduction to finite element analysis of electromagnetic problems*. IEEE Transactions on Education, vol. 32, n. 2, p. 85 – 93, 1989.

SANTOS, D. T. *Sistema inteligente para apoio a programação da manutenção de disjuntores de alta tensão*. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

SFE: Campanha de Fiscalização das Transmissoras de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/>. Acesso em: 25 de julho de 2019.

SILVA, L. G. *Filtrenas: Integração de Antenas e Filtros de RF Reconfiguráveis*. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Telecomunicações. Santa Rita do Sapucaí. 2014.

SILVA, S. E. L. *Falhas Humana em Operação e Manutenção de Subestações*. XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. Belo Horizonte. MG. 2006.

SINDER, D. *Métodos de Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória para Análise da Superação de Disjuntores de Alta Tensão*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2007.

SOUZA, R. T.; ARAUJO, J. F.; COSTA, E. G.; MACEDO, E. *A system for dynamic contact resistance with Arduino platform on MV and HV circuit breaker*. IEEE I2MTC, 2014.

SOUZA, R. T.; COSTA, E. G.; OLIVEIRA, A. C.; SOUSA, W. V.; MORAIS, T. C. M. *Characterization of contacts degradation in circuit breakers through the dynamic contact resistance*. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition Latin America (PES T&DLA), 2014.

STANISIC, Z.; NEIMANIS, R. *A New Ultra Lightweight Method for Static and Dynamic Resistance Measurements*. Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium, p. 1 – 4, 2010.

STANISIC, Z. *Method for static and dynamic resistance measurements of HV circuit breaker*. 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe). Manchester, UK. 2011.

TURCOTTE, O.; GAUTHIER, R. *A thorough examination for circuit breaker health*. Transmission and Distribution World, p. 28 – 32, 2008.

VANGUARD. Data sheet Micro-ohmmeter Accu-Ohm 200 Series 2. Vanguard Instruments Company, 2010.

WALPOLE, R. E.; MYERS, R. H.; MYERS, S. L.; YE, K. *Probability & Statistics for Engineers & Scientists*. 9th ed. Pearson Education, Inc. Boston, 2012.

WEILAND, T. *A discretization method for the solution of maxwell's equations for six component fields*. Electronics and Communications, vol. 31, n. 3, p. 116 – 120, 1977.

YEE, K. S. *Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media*. IEEE Transactions on Antenna Propagation, vol. 14, n. 3, p. 302 – 307, 1966.

ZHENSHENG, W.; WEI, W.; XUECHANG, Y.; ZHENCHONG, C. *A new processing method of mechanical vibration signals from high-voltage circuit breakers' monitoring*. International Conference on Electrical Machines and Systems, China, 2005.