



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

HERBET FILIPE DOS SANTOS SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICA DE DETECÇÃO  
OTIMIZADA DE SINAIS DO ARCO ELÉTRICO PARA O  
MONITORAMENTO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO**

Campina Grande, Paraíba  
Agosto de 2018

HERBET FILIPE DOS SANTOS SOUSA

DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICA DE DETECÇÃO OTIMIZADA DE SINAIS DO ARCO ELÉTRICO  
PARA O MONITORAMENTO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

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

Área de Concentração: Processamento de Energia

Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Orientadores

Campina Grande

Agosto de 2018

S725d

Sousa, Herbet Filipe dos Santos.

Desenvolvimento de técnica de detecção otimizada de sinais do Arco Elétrico para monitoramento de disjuntores de alta tensão / Herbet Filipe dos Santos Sousa. - Campina Grande, 2018.

87 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira".

Referências.

1. Monitoramento de Disjuntores de Alta Tensão. 2. Emissões Eletromagnéticas Transitórias. 3. Sinais do Arco Elétrico. 4. Detector de Envoltória. I. Costa, Edson Guedes da. II. Ferreira, Tarso Vilela. III. Título.

CDU 621.316.577(043)

**"DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICA DE DETECÇÃO OTIMIZADA DE SINAIS DO ARCO ELÉTRICO PARA O MONITORAMENTO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO"**

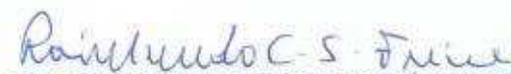
**HERBET FILIPE DOS SANTOS SOUSA**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 24/08/2018**



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

**TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFS**  
Orientador(a)



**RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG**  
Examinador(a)



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

**CAMPINA GRANDE - PB**

Dedico este trabalho à minha família,  
preceptora de minhas habilidades e  
inspiradora de meus sucessos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir a vida e o discernimento, por assistir às necessidades de minha família e por me fortalecer nos momentos difíceis que cunharam este trabalho.

Aos meus pais, Severino Alípio de Sousa Neto e Maria do Socorro Severo dos Santos, que sempre me incentivaram e me aclararam sobre os benefícios do estudo, e que, para tal, não deixaram nada faltar.

Agradeço aos meus irmãos, Ítalo Bruno, Victor Hugo e Raíssa Maria dos Santos Sousa, que me enchem de carinho e orgulho, e que nunca mediram esforços em auxiliar em minhas caminhadas.

À minha namorada Alana Santiago, que me doou muita paz, amor e serenidade para o andamento deste trabalho e que, juntamente aos meus bons, velhos e novos amigos, entenderam todas as minhas deixas e faltas necessárias para a conclusão deste objetivo.

Agradeço aos professores Tarso Vilela Ferreira e Edson Guedes da Costa, por me orientarem neste projeto com bastante paciência, exemplo e dedicação.

Agradeço também aos professores Raimundo Freire, Bruno Albert, Jalberth Fernandes, Antônio Neto e Alex Serres, pelos cuidados pontuais no desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Campina Grande, que me possibilitou, entre tantas outras coisas, a realização de sonhos.

Agradeço fortemente aos amigos companheiros do Laboratório de Alta Tensão, minha segunda casa no decorrer desta jornada. Em especial, agradeço aos demais membros do Grupo de Pesquisa em Disjuntores, Adriano Oliveira, Henrique Santana e ao associado George Xavier.

Agradeço ao coração da cidade de Campina Grande, que me acolheu como seu filho, e ao entendimento disto, por parte de minha querida Pombal.

Por fim, gostaria de agradecer e prestar o devido reconhecimento à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (COPELE) da UFCG pelo provimento da bolsa de estudos, essencial para o desenvolvimento do mestrado.

*“Tudo que parece impossível é, na verdade, uma progressão”.*

Steven Kotler

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de uma técnica de detecção dos sinais do arco elétrico para o monitoramento de disjuntores de alta tensão, com redução efetiva das taxas de amostragem dos sinais em alta frequência. Com esta finalidade, a técnica de detecção de envoltória foi aplicada e avaliada. Outrossim, com o objetivo de apresentar o desenvolvimento da técnica em si, foram realizadas simulações do circuito detector no domínio do tempo e da frequência. Para avaliar se a técnica proposta é capaz de estimar os parâmetros avaliativos de disjuntores, emissões eletromagnéticas transitórias, provenientes do processo de abertura de um disjuntor de 15 kV, foram adquiridas no Laboratório de Alta Tensão da UFCG. A análise de sensibilidade da extração dos parâmetros duração de arco elétrico e energia do sinal, a partir da envoltória do sinal de arco, foi feita. Para tanto, as envoltórias dos sinais de arco medidos foram obtidas por meio de simulação da detecção de envoltória. A técnica de detecção de envoltória desenvolvida apresentou acurácia no cálculo do parâmetro duração do arco elétrico, registrando erros inferiores a 2%, em relação ao sinal original. O parâmetro energia do sinal de arco foi possível de ser detectado com a aplicação da técnica, no entanto, foi observado que uma calibração do sistema deve ser feita para que seja atingido o melhor desempenho. Ademais, foram apresentados os procedimentos de dimensionamento e avaliação do circuito detector de envoltória, voltado para aplicação dos sinais de arco analisados neste trabalho. Os resultados obtidos neste trabalho evidenciaram a potencialidade da técnica de detecção de envoltória para a redução das taxas de amostragem dos sinais de arco. Portanto, comprova-se que o circuito detector de envoltória pode ser aplicado como entrada de um dispositivo de monitoramento de disjuntores em serviço, demandando um sistema de aquisição, transmissão e processamento de sinais menos complexo e mais acessível.

**Palavras-chave:** Monitoramento de disjuntores de alta tensão, emissões eletromagnéticas transitórias, sinais do arco elétrico, detector de envoltória.

## ABSTRACT

In this work the development of a technique to detect electric arc signals for the monitoring of high voltage circuit breakers is presented, with effective reduction of the sampling efforts of the high frequency signals. For this purpose, the envelope detection technique was applied and evaluated. In addition, with the objective of presenting the development of the technique itself, simulations of the detector circuit were carried out in the time and frequency domain. In order to evaluate if the proposed technique is capable of estimating the evaluative parameters of circuit breakers, transient electromagnetic emissions from the process of opening a 15 kV circuit breaker were acquired at the UFCG High Voltage Laboratory. The sensitivity analysis of the extraction of the parameters of electric arc duration and energy of the signal, from the envelope of the arc signal, was made. For this, envelopes of the measured arc signals were obtained by simulation. The developed envelope detection technique showed accuracy in the calculation of the electric arc duration parameter, with errors lower than 2% in relation to the original signal. The energy parameter of the arc signal could be detected with the application of the technique; however, it was observed that a calibration of the system must be made to achieve the best performance. In addition, the project and evaluation procedures of the envelope detector circuit were presented, focused on the application of the arc signals analyzed in this work. The results obtained in this work evidenced the potential of the envelope detection technique to reduce the sampling efforts of the arc signals. Therefore, it is proven that envelope detector circuitry can be applied as input to a circuit-breaker monitoring device in service, requiring a less complex and more affordable signal acquisition, transmission and processing system.

**Keywords:** Monitoring of high-voltage circuit breakers, transient electromagnetic emissions, electric arc signals, envelope detector.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Disjuntor Siemens 145 kV com câmara de extinção a óleo. ....	23
Figura 2.2 - Fotografia de corte de um polo com sua câmara de extinção de arco. ....	24
Figura 2.3 - Fotografia dos contatos de um disjuntor. ....	25
Figura 2.4 - EET em disjuntor SF <sub>6</sub> . ....	29
Figura 2.5 - Exemplo de detecção de envoltória de um sinal acústico modulado. ....	31
Figura 2.6 - Processo de detecção de envoltória de sinal RF. ....	32
Figura 2.7 - Circuito detector de envoltória. ....	32
Figura 2.8 - Linha de transmissão em linha de microfita. ....	35
Figura 2.9 - Linha de transmissão em circuito de microfita. ....	36
Figura 2.10 - Técnica de casamento de impedância. ....	37
Figura 2.11 - Casamento de impedância em circuito LC. ....	38
Figura 2.12 - Redes de casamento LC em elementos concentrados. ....	39
Figura 4.1 - Fotografia do disjuntor utilizado nos ensaios. ....	46
Figura 4.2 - Pares de contatos utilizados nos ensaios. ....	47
Figura 4.3 - Fotografia do sensor capacitivo. ....	47
Figura 4.4 - Diagrama esquemático do sistema de injeção de corrente. ....	49
Figura 4.5 - Arranjo de ensaio de detecção de sinais de arco. ....	50
Figura 4.6 - Detecção das EET irradiadas pelo arco elétrico. ....	51
Figura 4.7 - Diagrama de blocos da detecção digital de envoltória. ....	54
Figura 4.8 - Esquema básico de simulação do circuito no Simulink®. ....	56
Figura 4.9 - Diagrama de simulação do circuito detector no Simulink®. ....	57
Figura 4.10 - Circuito equivalente do diodo Schottky. ....	59
Figura 4.11 - Simulação de comportamento de impedância do diodo. ....	60
Figura 4.12 - Circuito completo para simulação no ADS®. ....	60
Figura 5.1 - Espectro do sinal de ruído em função da frequência. ....	62
Figura 5.2 - Espectro do sinal de arco em função da frequência. ....	62
Figura 5.3 - Sinal de arco da amostra C1. ....	63
Figura 5.4 - Sinal de arco da amostra C2. ....	64
Figura 5.5 - Sinal de arco da amostra C3. ....	64
Figura 5.6 - Sinal de arco da amostra C4. ....	65
Figura 5.7 - Sinal de arco e sua envoltória com amostragem resultante a 1 MAps. ....	66

Figura 5.8 - MEA de cada contato por tipo de sinal.....	68
Figura 5.9 - $\sigma$ EA de cada contato por tipo de sinal. ....	68
Figura 5.10 - Análise de correlação e regressão linear de MEA da envoltória 5 MAs. 70	
Figura 5.11 - Espectro de potência em função da frequência da envoltória a 5 MAs.. 71	
Figura 5.12 - Diagrama de simulação do circuito no domínio do tempo. ....	72
Figura 5.13 - Sinal de arco e sua envoltória resultante.....	73
Figura 5.14 - Gráfico da impedância de entrada do diodo em função da frequência.....	75
Figura 5.15 - Diagrama do circuito detector resultante. ....	76
Figura 5.16 - Perda de retorno do sinal em função da frequência. ....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros e técnicas de medição para o monitoramento de disjuntores. .	27
Tabela 3.1 - Resumo das principais referências. ....	44
Tabela 4.1 - Dados de placa do disjuntor utilizado. ....	46
Tabela 4.2 - Características do sensor de acoplamento capacitivo.....	48
Tabela 4.3 - Características da PCI considerada nas simulações. ....	58
Tabela 4.4 - Relação do módulo da perda de retorno por potência de sinal transferida.	61
Tabela 5.1 - Atributos estatísticos de DA e EA.....	65
Tabela 5.2 - Incerteza do cálculo de DA das envoltórias. ....	67
Tabela 5.3 - Incerteza do cálculo de EA das envoltórias.....	67
Tabela 5.4 - Incerteza no cálculo dos atributos de EA com regressão linear. ....	71
Tabela 5.5 - Valores de Impedância de entrada do diodo em função da frequência. ....	75
Tabela 5.6 - Valores dos componentes da rede de casamento do diodo. ....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\sigma_{DA}$	Desvio padrão da Duração do Arco
$\sigma_{EA}$	Desvio padrão da Energia do sinal de Arco
AM	Modulação em Amplitude
AD	Analógico-Digital
ADS <sup>®</sup>	Advanced Design System <sup>®</sup>
CC	Corrente Contínua
CIGRE	Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos
CIGRE/CIREN	Congresso Internacional de Sistemas de Distribuição de Eletricidade do CIGRE
DA	Duração do Arco elétrico
DSP	Processamento Digital de Sinais (Digital Signal Processing)
EA	Energia do sinal do Arco
EET	Emissões Eletromagnéticas Transitórias
FPB	Filtro Passa-Baixas
kAps, mAps, GAps	Quilo, Mega e Giga Amostras por segundo
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LC	Indutor (L) e capacitor (C)
LT	Linhas de Transmissão
MDA	Média da Duração do Arco
MEA	Média da Energia do Sinal do Arco
PCI	Placa de Circuito Impresso
PVO	Pequeno Volume de Óleo
RC	Capacitor (C) e Resistor (R)
RF	Radiofrequência
S <sub>11</sub>	Índice de perda de retorno de sinal
SMA	Conector SubMiniatura Versão A (SubMiniature Version A)
SMD	Dispositivos Montados em Superfície (Surface Mounted Device)
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda$	Comprimento de onda de um sinal
$\epsilon\epsilon$	Permissividade efetiva
$\epsilon r$	Permissividade relativa
$c$	Velocidade da luz no vácuo
$\omega$	Velocidade angular
$\beta$	Constante de propagação
$v_p$	Velocidade de fase
$\text{var, Mvar}$	Volt-ampère reativo e Megavolt-ampère reativo
$\sigma$	Desvio padrão

# SUMÁRIO

1	Introdução.....	16
1.1	Objetivos.....	20
1.2	Organização do Texto.....	21
2	Fundamentação Teórica.....	22
2.1	Disjuntores de Alta Tensão.....	22
2.2	Monitoramento e Manutenção de Disjuntores.....	25
2.3	Emissões Eletromagnéticas Transitórias do Arco.....	28
2.4	Detecção de Envoltória de Sinal RF.....	30
2.5	Fundamentos Básicos de Circuitos RF.....	34
2.5.1	Linha de Transmissão em Linhas de Microfita.....	34
2.5.2	Casamento de Impedância em Elementos Concentrados.....	37
3	Revisão Bibliográfica.....	40
4	Metodologia.....	46
4.1	Material.....	46
4.2	Métodos.....	48
4.2.1	Preparação do Ensaio: Injeção de Corrente de Teste.....	49
4.2.2	Realização do Ensaio: Detecção das EET do Arco Elétrico.....	50
4.2.3	Análise de Sinais de Arco e Extração dos Parâmetros.....	52
4.2.4	Testes de Aplicabilidade da Detecção de Envoltória.....	53
4.2.5	Dimensionamento e Avaliação de Circuito Detector de Envoltória.....	55
5	Resultados.....	62
5.1	Aquisição dos Parâmetros do Arco Elétrico.....	63
5.2	Análise da Detecção de Envoltória das EET.....	66
5.3	Dimensionamento e Avaliação do Circuito no Domínio do Tempo.....	72
5.4	Dimensionamento e Avaliação do Circuito no Domínio da Frequência.....	74
6	Conclusões.....	80
	Trabalhos Futuros.....	81
	Publicações.....	82
7	Referências.....	84

# 1 INTRODUÇÃO

Em tese, os equipamentos empregados em circuitos elétricos de alta tensão são tidos como os principais ativos das concessionárias de energia. Quando operados em condições adequadas de funcionamento, esses ativos tornam-se os principais fatores de eficiência operacional, econômica e de competitividade das concessionárias do setor elétrico (FRONTIN, 2013). Portanto, a proteção dos equipamentos de alta tensão nas subestações de energia elétrica é compreendida como fundamental.

A função de proteção dos equipamentos de uma subestação é assegurada, em parte, pela atuação do disjuntor de alta tensão. Disjuntores de alta tensão são equipamentos eletromecânicos projetados para estabelecer e interromper o fluxo de corrente elétrica em circuitos de potência. A principal finalidade do disjuntor é a interrupção de correntes de falta tão rapidamente quanto possível, de forma a limitar os possíveis danos causados aos equipamentos por curtos-circuitos (RYAN e JONES, 1989).

Para que as funções do disjuntor sejam corretamente executadas, os disjuntores são constituídos por componentes mecânicos e elétricos que devem ser primorosamente especificados. Independentemente de suas funções específicas, os componentes dos disjuntores estão sujeitos à degradação contínua, em decorrência dos esforços acumulados nestes itens ao longo do tempo. O desgaste dos componentes do disjuntor é um processo inevitável e continuado, que se inicia desde a sua instalação, e que pode comprometer sua capacidade de operar.

Por outro lado, os disjuntores devem estar sempre aptos a operar efetivamente, do contrário, podem ocasionar falhas maiores e destruição de equipamentos ou parte do sistema elétrico no qual estejam inseridos (GARZON, 2002). Em vista disso, e dada a importância dos disjuntores no sistema elétrico, pesquisadores somam contribuições ao longo do tempo para o avanço de técnicas de monitoramento do estado operativo dos disjuntores de alta tensão. Estas contribuições datam desde o decênio de 1940, com os estudos de Ragnar Holm (HOLM, HOLM e IL, 1949).

Em geral, para o monitoramento do estado operativo do disjuntor de alta tensão, dados sobre os aspectos mecânicos, o meio isolante e os contatos elétricos são de interesse dos setores de manutenção. Independentemente da relevância de cada dado na avaliação

do equipamento, a eficiência das práticas de manutenção depende diretamente da capacidade em se monitorar continuamente essas informações.

Com a finalidade de fomentar o avanço de pesquisas sobre monitoramento contínuo de disjuntores, o Grupo de Trabalho 13.09 do CIGRE investigou e reuniu informações advindas de centenas de trabalhos acadêmicos e de experiências de funcionários de subestações. Como principal resultado, o grupo de trabalho forneceu uma seleção de parâmetros que podem ser utilizados para o diagnóstico do disjuntor de alta tensão (BAUDART, 2000), a qual é apresentada a seguir:

- Posicionamento do par de contatos;
- Características do deslocamento dos contatos;
- Tempos de operação de abertura e fechamento dos contatos;
- Sincronia entre os polos;
- Duração de arco elétrico;
- Degradação dos contatos de arco.

Embora o Grupo de Trabalho 13.09 tenha introduzido uma seleção de parâmetros relevantes ao diagnóstico de disjuntores, tem-se ainda como grande desafio o fato de que a maioria das técnicas atuais para a obtenção de parâmetros demanda que o equipamento avaliado seja retirado de operação.

A retirada de operação de um disjuntor de alta tensão reduz a disponibilidade do sistema no qual ele está instalado, aumentando custos de manutenção, bem como custos associados à indisponibilidade do equipamento.

A possibilidade de avaliar um disjuntor, de forma confiável, contínua e sem interromper ou interferir em sua operação habitual, é fundamental na antecipação de problemas, o que contribui com a otimização dos processos de gestão da manutenção. Sendo assim, técnicas de monitoramento em serviço (*online*) de disjuntores de alta tensão são desejáveis pelos setores de manutenção das empresas do setor elétrico.

Diante deste cenário, outro grupo de trabalho do CIGRE, denominado Grupo de Trabalho A3.32, avaliou diversas técnicas de extração de parâmetros de monitoramento em serviço de disjuntores apresentadas na literatura.

Dentre outras técnicas, o Grupo de Trabalho A3.32 destacou a detecção das Emissões Eletromagnéticas Transitórias (EET) irradiadas pelo arco elétrico, uma vez que esta técnica possibilita a extração de parâmetros pertinentes ao diagnóstico do disjuntor

de forma não invasiva e em serviço. Em função disto, destaca-se neste trabalho de dissertação a extração de dados da duração do arco elétrico e da degradação dos contatos de arco, utilizando-se da medição de EET irradiadas pelo arco originado durante a operação de disjuntores.

Para a captação das EET, diferentes topologias de sensores e antenas podem ser utilizadas, a exemplo do sensor de acoplamento capacitivo (CHAPMAN, 2005).

A aplicabilidade de sensores capacitivos na detecção de sinais do arco elétrico em disjuntores de alta tensão foi avaliada por Santana (2017), membro do Grupo de Pesquisas em Disjuntores do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande (LAT/UFCG), grupo ao qual também pertence o autor do presente trabalho. Para o andamento deste trabalho de dissertação, foi utilizado um sensor de acoplamento capacitivo desenvolvido por Santana (2017), como meio de captação dos sinais eletromagnéticos (EET) emitidos pelos arcos em disjuntores.

Em um viés de ordem prática, logo após a captação dos sinais de arco, por meio dos sensores, um sistema de aquisição de dados deve ser previsto em sequência. A função da aquisição dos dados é prover, essencialmente, a conversão analógico-digital, por meio da amostragem adequada do sinal, além do canal de transmissão das informações para um consequente sistema de processamento digital. A etapa de aquisição é uma tarefa criteriosa e deve ser realizada respeitando a integridade do sinal a ser amostrado. Sinais que se apresentam em frequência elevada tendem a demandar mais complexidade ao processo de amostragem. Por sua vez, as EET captadas do arco durante a operação de disjuntores demandam taxas de amostragem elevadas, pois se apresentam em espectros de radiofrequência (RF), que se estendem de 10 MHz a 800 MHz (PORTUGUES, MOORE e GLOVER, 2003).

De acordo com o Teorema de Nyquist, a quantidade de amostras adquiridas por unidade de tempo de um sinal (amostragem) deve ser igual ou maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado, para que se possa reproduzi-lo digitalmente sem erro de *aliasing* (do inglês, recobrimento) (ALENCAR, 2001). Portanto, uma vez que os sinais de arco possam apresentar componentes de frequência entre 10 MHz a 800 MHz, um sistema de aquisição de pelo menos 1,6 Gaps ( $1,6 \times 10^9$  amostras por segundo) seria necessário para a conversão analógica-digital (A/D) completa das EET.

Neste sentido, a aquisição completa dos sinais de arco exige elevadas taxas de conversão A/D, assim como elevada capacidade de armazenamento e transporte de informações na etapa de processamento de dados. Portanto, a aquisição integral de sinais

de arco demanda o uso de dispositivos de conversão A/D robustos, onerosos e complexos de serem implementados.

Todavia, é possível extrair informações (parâmetros) específicas de sinais RF sem que seja necessária a aquisição do sinal por completo. O uso de técnicas que otimizem o processo de amostragem é ideal para a simplificação e redução de custos do sistema de aquisição.

Contudo, o projetista deve-se ater se a técnica é capaz de fornecer as informações requeridas do sinal original. Para o caso de monitoramento de disjuntores analisado nesta dissertação, a técnica a ser utilizada deve ser suficientemente confiável para a identificação dos parâmetros de duração de arco elétrico e energia do sinal de arco. No que lhes concerne, estes parâmetros podem ser estimados a partir da aquisição da amplitude instantânea do sinal de arco.

A amplitude instantânea de sinais RF pode ser adquirida a partir da envoltória dos picos do sinal. A detecção de envoltória é uma técnica largamente usada aos sinais RF, nos quais as variações em amplitude contêm certo tipo de informação desejada. Com a aplicação da técnica de detecção de envoltória aos sinais de arco, pretende-se obter a representação dos sinais de arco em frequência significativamente inferior, reduzindo substancialmente os esforços de amostragem de um sistema de aquisição e processamento de sinais a jusante.

Para tanto, é apresentada no presente trabalho de dissertação uma análise criteriosa da extração e da utilização de parâmetros das EET no processo de diagnóstico de disjuntores de alta tensão. A partir desta análise, fundamenta-se o desenvolvimento de uma técnica de detecção otimizada dos sinais de arco, por meio da detecção de envoltória. A análise da aplicabilidade da técnica é centrada na confiabilidade em se extrair os parâmetros de duração do arco elétrico e energia do sinal de arco, utilizados para o monitoramento de disjuntores de alta tensão.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho de dissertação é avaliar a aplicação e o desenvolvimento de um circuito detector de envoltória para redução do esforço de amostragem dos sinais eletromagnéticos irradiados pelo arco elétrico em disjuntores de alta tensão. Os sinais de arco podem ser utilizados no monitoramento das condições operativas de disjuntores de alta tensão em serviço e de forma não invasiva.

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, delimitam-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a detecção dos sinais de arco, com uso de sensor de acoplamento capacitivo, para o dimensionamento da técnica proposta;
- Analisar a extração e utilização dos parâmetros avaliativos do sinal de arco, com ênfase nos requisitos do processo de aquisição de sinais;
- Avaliar a aplicação da técnica de detecção de envoltória, analisando sua confiabilidade quanto à extração dos parâmetros extraídos dos sinais de arco;
- Dimensionar e avaliar, por meio de simulações, circuito eletrônico que empregue a técnica proposta.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A continuidade do texto desta dissertação divide-se em outros cinco capítulos, comentados a seguir.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica acerca de disjuntores de alta tensão, englobando aspectos construtivos e de funcionamento, assim como os temas de manutenção e monitoramento. Outrossim, discutem-se características das emissões eletromagnéticas transitórias irradiadas pelo arco elétrico e a aplicação desses sinais nos processos de diagnóstico de disjuntores, mediante o uso de sensores capacitivos. Por fim, são também apresentados conceitos da técnica de detecção de envoltória de sinais, assim como de princípios utilizados no projeto de circuitos eletrônicos empregados em aplicações de radiofrequência (circuitos RF).

O Capítulo 3 foi escrito para a apresentação da revisão bibliográfica sobre pesquisas científicas relacionadas ao tema. O foco específico é dado aos trabalhos que mais contribuíram com informações acerca da aquisição e análise de sinais eletromagnéticos radiados pelo arco elétrico no monitoramento de disjuntores de alta tensão.

Uma vez que a fundamentação teórica sobre o tema tenha sido construída e a revisão dos trabalhos mais relevantes tenha sido cumprida, o Capítulo 1 tem o objetivo de introduzir o leitor à metodologia desta pesquisa. Para tanto, nesse capítulo são detalhados o material empregado e os métodos aplicados para o conseguimento dos resultados.

Com o seguimento dos procedimentos apresentados na metodologia proposta, foram logrados os resultados, sendo estes discutidos no Capítulo 5. Ademais, neste mesmo capítulo, é realizada toda a análise sobre a aplicabilidade e desenvolvimento da técnica proposta.

Por fim, no Capítulo 1, diante dos objetivos propostos e resultados obtidos, são discutidas as conclusões deste trabalho de dissertação. Adicionalmente, são apresentadas sugestões de trabalhos futuros para andamento da pesquisa, assim como as principais referências aproveitadas durante o desenvolvimento deste trabalho de mestrado. Trabalhos publicados e aceitos para publicação, relacionados à pesquisa ou à grande área de concentração, também são apresentados neste capítulo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é exposto um embasamento teórico para melhor entendimento da pesquisa. Para tanto, apresentam-se detalhes sobre o disjuntor de alta tensão e técnicas empregadas para sua manutenção e avaliação. Pretende-se também fundamentar conceitos característicos sobre o arco elétrico nos disjuntores e o fenômeno de emissão eletromagnética transitória, detectável com uso de sensor de acoplamento capacitivo. Ademais, são apresentados conceitos da técnica de detecção de envoltória como estratégia de redução dos requisitos de amostragem dos sinais de arco. Por fim, são comentados fundamentos básicos acerca de dimensionamento de circuitos eletrônicos empregados em projetos de radiofrequência, para que sejam compreendidas as etapas de projeto do circuito detector de envoltória.

### 2.1 DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

Disjuntores de alta tensão são equipamentos eletromecânicos projetados essencialmente para interromper ou reestabelecer circuitos de alta tensão, assim como para prover fluxo ininterrupto de corrente elétrica, em condições normais do sistema, com o cumprimento das exigências de isolamento referentes ao nível de tensão de sua aplicação no sistema elétrico (RYAN e JONES, 1989).

A interrupção ou reestabelecimento de circuitos de potência contribui para o surgimento de arco elétrico no interior da câmara de extinção de arco. Nesse sentido, o projeto da câmara de extinção em disjuntores de alta tensão deve prever o isolamento entre os contatos (quando separados), assim como o resfriamento do meio isolante, extremamente aquecido pelo estabelecimento do arco elétrico durante operações do equipamento (STEWART, 2004).

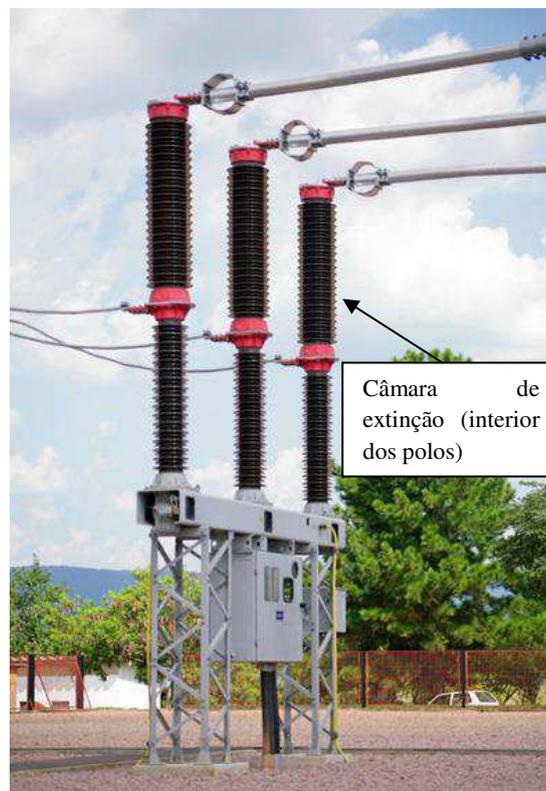
Quanto à sua operação, o disjuntor deve sempre estar mecanicamente apto a operar rapidamente (usualmente de 3 a 5 ciclos), independentemente do tempo em que permaneça ocioso, desde que a corrente a ser interrompida esteja dentro dos limites de sua capacidade (GARZON, 2002). De modo geral, os disjuntores em adequado estado de operação devem satisfazer, prioritariamente, os critérios descritos na lista a seguir (FRONTIN, 2013):

- 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 por um determinado período, de acordo com as especificações do fabricante;
- Isolar a tensão do sistema, em relação à terra e entre seus polos;
- Ser compacto, com adequada resistência mecânica, de modo a suportar as vibrações ocasionadas nas operações de fechamento e abertura.

Com o intuito de garantir a correta operação dos disjuntores e amparando na evolução dos conhecimentos a respeito da extinção do arco elétrico, técnicas de interrupção foram desenvolvidas e aprimoradas com o passar do tempo.

Historicamente, os primeiros disjuntores a serem usados foram os de interrupção ao ar livre. Em sequência, os disjuntores foram projetados com câmaras de extinção do arco a óleo, ar comprimido, SF<sub>6</sub> e vácuo (HADDAD e WARNE, 2007).

Figura 2.1 - Disjuntor Siemens 145 kV com câmara de extinção a óleo.

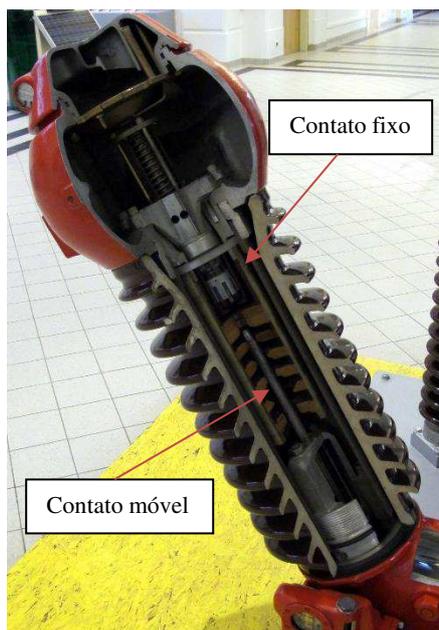


Fonte: FRONTIN, 2013.

De modo geral, a câmara de extinção é o compartimento do disjuntor que envolve o meio extintor e o par de contatos móvel e fixo, responsáveis pela condução e interrupção

da corrente elétrica (BHEL, 2006). Ela é responsável pelas principais funções do disjuntor, devendo ser mecânica e termicamente resistente ao arco e favorecer, em conjunto como meio extintor, condições para a extinção do arco elétrico (RYAN e JONES, 1989). Na Figura 2.2 é mostrada uma fotografia de um polo de disjuntor seccionado transversalmente, ressaltando o interior de sua câmara de extinção, na qual é possível identificar a disposição do par de contatos (móvel e fixo).

Figura 2.2 - Fotografia de corte de um polo com sua câmara de extinção de arco.



Fonte: Adaptado (VIENNA, T. M., 2011).

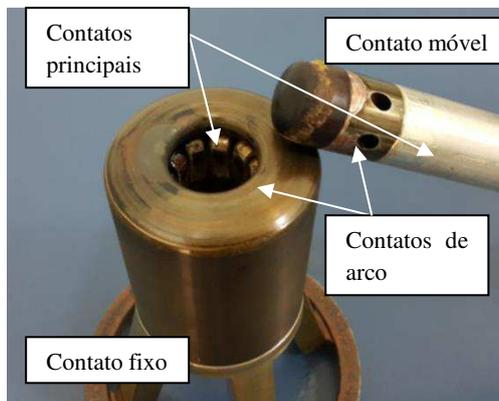
O par de contatos, quando na posição fechada, deve registrar entre seus terminais resistência elétrica quase nula (poucas centenas de micro-ohms), para que a condução de corrente elétrica de carga ocorra com mínimas perdas por aquecimento. Contudo, com a conclusão da operação de abertura, ou seja, com a total separação dos contatos, requer-se uma resistência de valor muito elevado (da ordem de mega-ohms), idealmente infinito (CARVALHO, PUENTE, *et al.*, 1995).

Quando em operação normal, com os contatos fechados (acoplados), o disjuntor é responsável pela condução da corrente de carga do sistema. Todavia, durante a operação de abertura ou fechamento do disjuntor, os pares de contatos são submetidos também à corrente elétrica sustentada pelo arco elétrico. Portanto, as especificações do par de contatos devem se adequar à condução de correntes elétricas de distintas características (corrente de carga e corrente de arco). Logo, são dimensionadas duas regiões de contato

(em cada um dos contatos móvel e fixo) com diferentes características elétricas, denominadas contato principal e contato de arco. Na

Figura 2.3 tem-se uma fotografia dos contatos móvel e fixo, assim como seus contatos de arco e principal.

Figura 2.3 - Fotografia dos contatos de um disjuntor.



Fonte: A autoria própria.

Os contatos principal e de arco são componentes estritamente determinantes ao funcionamento do disjuntor e sofrem de diferentes formas de depreciação ao longo do tempo. Contudo, tal qual na maioria dos equipamentos de alta tensão, o material dos componentes dos disjuntores é especificado para proporcionar um ciclo de vida da ordem de décadas ao equipamento, além de requerem o menor número de manutenções quanto possível. Para que sejam garantidas suas funções, os disjuntores devem ser continuamente avaliados e corrigidos, mediante o emprego de técnicas de monitoramento e manutenção, respectivamente.

## 2.2 MONITORAMENTO E MANUTENÇÃO DE DISJUNTORES

A velocidade com a qual ocorre o desgaste dos componentes do disjuntor está relacionada à quantidade de tempo em que o disjuntor esteja em operação, assim como à frequência de interrupções e amplitude das correntes interrompidas pelo equipamento. Alguns disjuntores são destinados a interromper correntes nominais diariamente, como aqueles que comutam banco de reatores e capacitores, enquanto outros operam algumas vezes por ano, para manobra ou isolamento de equipamentos e circuitos (ORLOWSKA, BALZER e HALFMANN, 2000). Em pior caso, do ponto de vista de esforços ao equipamento, os disjuntores atuam na interrupção de correntes de curto-circuito. A

amplitude da corrente de curto-circuito e o tempo decorrido para a extinção do arco elétrico provocado, contribuem mais significativamente com o desgaste do equipamento (SMEETS e ITO, 2005).

A minimização dos efeitos do desgaste de equipamentos é possibilitada por práticas de manutenção, que têm por objetivo principal assegurar que equipamentos desempenhem adequadamente suas funções, garantindo confiabilidade e disponibilidade ao sistema.

Na maioria dos casos, os disjuntores são submetidos a planos de manutenção preventiva. Neste conceito, os disjuntores são programados a serem reparados, substituídos ou reformados em determinados intervalos de tempo de operação no sistema. Adicionalmente, caso um disjuntor alcance um número limite pré-determinado (estimado) de operações livres de falha, antes que alcance o tempo pré-estabelecido, é adiantada a manutenção do equipamento (SUWANASRI, LIPIRODJANAPONG, *et al.*, 2014). Dadas as condições apresentadas, o disjuntor pode ser retirado de operação.

Nessa conjectura, planos de manutenção limitados à prática de manutenção preventiva possibilitam que equipamentos imprevisivelmente degradados ainda estejam sendo utilizados. Além disso, a limitação ao uso da manutenção preventiva abre margens para que ocorram paradas desnecessárias no sistema, para inspeção de equipamentos que ainda se encontram aptos a operar eficientemente.

Com as limitações da manutenção preventiva evidenciadas, o método de manutenção preditiva se desenvolve como ferramenta de otimização dos processos de monitoramento dos equipamentos de alta tensão (SOUSA, OLIVEIRA, *et al.*, 2018). Desta forma, a manutenção preditiva busca reduzir os custos de manutenção e aumentar o ciclo de vida útil do equipamento, com base na análise do seu estado atual.

Com o monitoramento do equipamento, na prática da manutenção preditiva, é possível encontrar defeitos em estágio inicial, permitindo antecipar a ocorrência de problemas que possam ocasionar falhas repentinas e devastadoras (STANEK e FRÖHLICH, 2000). Portanto, adotar técnicas de monitoramento do estado de operação dos disjuntores é prover mecanismos para que se possa melhorar o grau de confiabilidade do equipamento no desempenho das suas funções (FUJIE, ZHANGQI e HONGSAN, 1998).

Todavia, independentemente da técnica utilizada, o monitoramento de disjuntores depende diretamente da capacidade de se coletar continuamente informações sobre o estado real de operação do equipamento (CHAPMAN, 2011).

Com o objetivo de dar suporte às pesquisas voltadas para o monitoramento de disjuntores, um grupo de trabalho do CIGRE (CIGRE/CIREC Joint Working Group 13.09) destaca a utilização de determinadas informações para a avaliação do estado operacional de disjuntores de alta tensão, assim como dos métodos usualmente utilizados para a extração dos parâmetros (BAUDART, 2000). Os parâmetros e métodos destacados pelo Grupo de Trabalho 13.09 estão contidos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Parâmetros e técnicas de medição para o monitoramento de disjuntores.

Informações		Método/Sensor	Tipo de Monitoramento
I	Posicionamento do par de contatos	<u>Transdutor de posição</u>	
		- Sensor de contato	Contínuo
		- Sensor de proximidade	Contínuo
II	Características do deslocamento dos contatos	- Sensores ópticos	Contínuo
		<u>Sensor de posição dinâmica</u>	
		- Potenciômetro resistivo	Contínuo ou periódico
		- Sensor magneto-resistivo	Contínuo ou periódico
III	Tempos de operação	- Transformador variável diferencial	Contínuo ou periódico
		- Sensores ópticos	Contínuo ou periódico
		<u>Tempo de abertura e fechamento dos contatos</u>	Periódico
IV	Sincronia entre os polos	Tempo de funcionamento do motor	Contínuo ou periódico
		<u>Tempo de abertura e fechamento dos contatos</u>	Contínuo ou periódico
V	Duração de arco elétrico	Análise combinada do perfil de corrente com características do deslocamento dos contatos	Periódico
VI	Degradação dos contatos de arco	<u>Medição de Resistência Dinâmica</u>	Periódico
		<u>Produto <math>I^2t_{arc}</math></u>	
		- Medição de duração e corrente de arco	Contínuo*
		- Estimativas estatísticas	Periódico

\*Porém, um dos parâmetros de entrada (duração de arco elétrico) não seria atual e seria obtido de forma periódica.

Fonte: Adaptado (BAUDART, 2000).

Os quatro primeiros parâmetros da Tabela 2.1 estão diretamente ligados ao funcionamento do conjunto mecânico e de comando dos disjuntores. Enquanto os dois últimos parâmetros estão relacionados à presença e efeitos do arco elétrico estabelecido na câmara de extinção, embora uma maior duração do arco elétrico também possa estar relacionada a problemas mecânicos do disjuntor.

A maior preocupação com a parte mecânica do disjuntor é estatisticamente justificada, uma vez que a grande maioria das falhas em disjuntores ocorrem em seus mecanismos de operação (FLURSCHEIM, 1982). Apenas cerca de 14% das falhas resultam de problemas identificados na câmara de extinção de arco (ZHANG, ZHANG, *et al.*, 2009). No entanto, faz-se importante destacar que a avaliação das condições de quaisquer outras partes do disjuntor não é uma tarefa tão criteriosa, em comparação com a avaliação da câmara de extinção (BAGHERPOOR, RAHIMI, *et al.*, 2016). A razão disto é que esta parte do disjuntor é encapsulada, de difícil acesso e é exposta a altos níveis de tensão e corrente durante a operação do disjuntor. Neste contexto, parâmetros de monitoramento em serviço e não invasivo para o diagnóstico da câmara de extinção de arco têm sido estudados.

A efetividade do monitoramento em serviço depende diretamente da técnica a ser empregada e da capacidade de extração e manipulação dos dados contidos nos parâmetros de diagnóstico do equipamento. Neste contexto, vários métodos de monitoramento em serviço e não-invasivos são considerados entre os planos de manutenção das empresas do setor elétrico. Dentre as principais técnicas de monitoramento, destacam-se: medição de emissões eletromagnéticas transitórias irradiadas pelo arco elétrico, detecção de descargas parciais, medição de vibrações, detecção de vazamento do gás isolante, avaliação da integridade do vácuo, análise de produtos de decomposição do gás isolante e outros (UZELAC, PATER e HEINRICH, 2016).

A maior parte das técnicas de monitoramento reportadas na literatura refere-se à avaliação da capacidade de isolamento dos disjuntores, enquanto as emissões eletromagnéticas transitórias (EET) estão relacionadas às características do estabelecimento do arco elétrico. A medição de EET tem como principal vantagem a sua aplicabilidade em técnicas de monitoramento contínuo e não invasivo.

Portanto, a detecção das EET irradiadas pelo arco elétrico em disjuntores é indicada para a avaliação dos dois últimos parâmetros da Tabela 2.1, os quais são objeto de estudo deste presente trabalho de dissertação.

## 2.3 EMISSÕES ELETROMAGNÉTICAS TRANSITÓRIAS DO ARCO

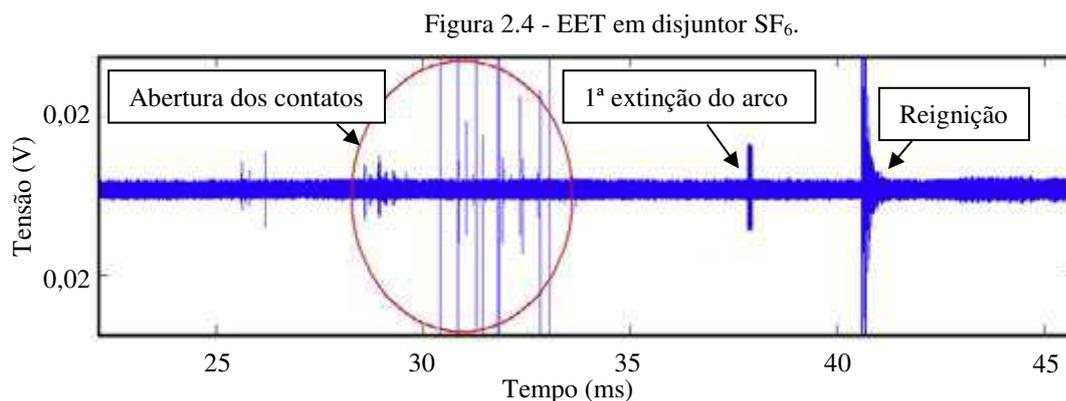
Ao longo do tempo, em medições de interferência e compatibilidade eletromagnética em subestações de energia elétrica, tem sido observada uma relação entre

componentes espectrais eletromagnéticos e a presença do arco elétrico, em bandas de frequência que se estendem na ordem de  $10^5$  a  $10^8$  Hz (SHISHKIN e JONES, 1990; RAMLI, BIRTWHISTLE, *et al.*, 2008). Tais componentes espectrais eram vistas apenas como fontes de interferência no sistema (MOORE, 2004).

No entanto, existe relações específicas entre as emissões eletromagnéticas transitórias (EET), cujo espectro se estende à faixa de radiofrequência (RF), e características inerentes ao fenômeno do arco elétrico (BARTLETT e MOORE, 2001). A corrente sustentada pelo arco elétrico, fonte dos sinais RF, apresenta rápidas variações de amplitude, proporcionando emissões eletromagnéticas transitórias em ampla faixa de componentes de frequência (BARTLETT, VAUGHAN e MOORE, 1999). Ou seja, a potência do sinal RF varia rapidamente entre estados de baixo e elevado nível, resultando em variações mensuráveis da energia do sinal.

Os maiores níveis de energia do sinal RF são presentes, portanto, durante maiores instabilidades do arco, notavelmente durante os processos de ignição e extinção do arco (CHAPMAN, 2005). Em contrapartida, quando o arco é estabilizado, tem-se um nível de sinal de menor amplitude e consistente.

Nesta perspectiva, tem-se que os sinais de arco podem ser continuamente detectáveis como série de impulsos (BARTLETT e MOORE, 2001). Este efeito é observável na Figura 2.4, na qual tem-se uma forma de onda de EET de arco elétrico estabelecido durante a operação de abertura de um disjuntor de 120 kV do tipo SF<sub>6</sub>.



Fonte: Adaptado (LOPEZ-ROLDAN, PATER, *et al.*, 2014).

Observa-se na Figura 2.4 que os momentos de ignição, extinção e reignição do arco elétrico são visivelmente diferenciados pela presença de formas de ondas de maior intensidade e instabilidade.

Devido à sua caracterização em elevada frequência, a detecção das EET é adequada para o desenvolvimento de técnicas de monitoramento em serviço e não-invasivas de disjuntores de alta tensão, uma vez que pode ser realizada à distância (no exterior da câmara de extinção), com uso de antenas e sensores. Tal característica proporciona grande potencial para medição remota de parâmetros pertinentes ao diagnóstico dos disjuntores.

No entanto, a medição de sinais EET de arco, especialmente como método alternativo de diagnóstico, possui algumas limitações. Para disjuntores, não existem sensores comerciais para detecção de sinal de arco, além do mais, inexistem métodos consolidados para determinação da influência dos parâmetros adquiridos do arco no diagnóstico do estado operacional do disjuntor (SANTANA, 2017).

Outra limitação quanto ao uso dos sinais de EET em dispositivos de monitoramento de disjuntores é o fato de que a aquisição de sinais em alta frequência demanda o uso de dispositivos de aquisição e conversão de dados robustos e onerosos. Estes dispositivos devem ser especificados a adquirir dados em elevadas taxas, da ordem de Gaps ( $1 \times 10^9$  amostras por segundo).

Para a redução do complexo conteúdo de sinais RF, tão logo, dos seus requisitos de amostragem, devem ser utilizadas estratégias de redução do esforço de amostragem dos sinais. A técnica utilizada para redução dos requisitos de amostragem de sinais deve ser orientada à confiabilidade em se extrair os parâmetros de interesse.

Uma vez que o presente trabalho esteja direcionado à determinação dos parâmetros de duração do arco e energia associada ao arco elétrico, propõe-se a avaliação de uma técnica que possa fornecer informações simultâneas sobre os instantes de ocorrência com a respectiva magnitude dos sinais de arco.

Neste sentido, propõe-se a avaliação da envoltória do sinal de arco, capaz de fornecer informações sobre tempo e amplitude, com significativa simplificação (em menor frequência) do conteúdo RF do sinal de arco.

## 2.4 DETECÇÃO DE ENVOLTÓRIA DE SINAL RF

A detecção de sinais RF é utilizada em uma ampla variedade de aplicações de processamento de sinais, onde se faz necessário detectar parâmetros temporais em sinais que se apresentam em alta frequência (LYONS, 2011). Aplicações como estas incluem a

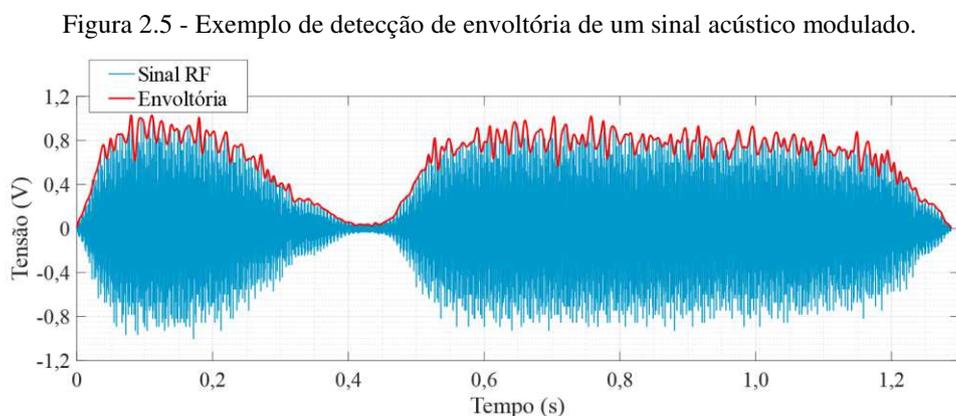
demodulação em amplitude, aplicação que motivou o desenvolvimento da técnica de detecção de envoltória (TUCKER, 1971).

Antecedente à etapa de demodulação, o sinal adquirido pelo receptor foi modulado, para então ser transmitido. De modo geral, modulação é a alteração sistemática de alguma característica de um sinal (portadora), em função de um outro sinal (mensagem) (ALENCAR, 2001). O objetivo da modulação é produzir um sinal modulado, em maior frequência, que contém a informação necessária pelo usuário e cujas propriedades sejam as mais convenientes ao processo de transmissão de dados considerado.

A técnica de Modulação em Amplitude (AM, do inglês, *Amplitude Modulation*) é uma forma de modulação em que a amplitude da portadora, que é o sinal RF, é variável em função da amplitude do sinal de interesse, sendo este o sinal de mensagem (modulador). A modulação em amplitude é uma das mais antigas formas de modulação em sistemas analógicos (HAYKIN, 2001), sendo ainda uma das mais utilizadas devido à sua simplicidade de implementação, inclusive no processo de demodulação.

No processo de demodulação em amplitude de um sinal RF, busca-se o rastreamento de sua envoltória, demarcada pela amplitude do sinal. Assim que a confiabilidade da técnica de detecção esteja estabelecida, parâmetros de sinais RF podem ser observados com redução dos requisitos de conversão, transmissão e armazenamento de dados.

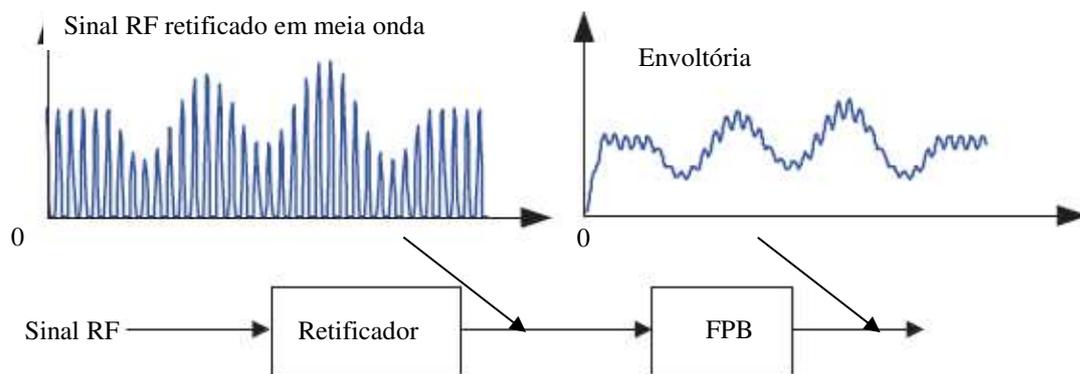
A solução apresentada pela detecção de envoltória baseia-se, sucintamente, em adquirir um sinal de amplitude flutuante, que contém certo tipo de informação desejada, e permitir a extração simplificada de tal informação (CIMOLI, VALDESCA, *et al.*, 2016). Um exemplo de uma envoltória detectada a partir de um sinal em alta frequência é apresentado na Figura 2.5.



Fonte: A autoria própria.

Ao comparar a envoltória e o sinal original, constata-se a manutenção de características importantes no reconhecimento do sinal, como os valores e os instantes dos picos. A detecção de envoltória é feita, primeiramente, com a retificação de meia onda do sinal RF, a qual ajusta as amostras negativas do sinal de entrada para a referência (zero, neste caso). Em seguida, aplica-se um filtro passa-baixas (FPB), projetado para eliminar componentes de frequência elevadas remanescentes do sinal RF originário. Este processo pode ser observado com mais detalhes no diagrama da Figura 2.6.

Figura 2.6 - Processo de detecção de envoltória de sinal RF.

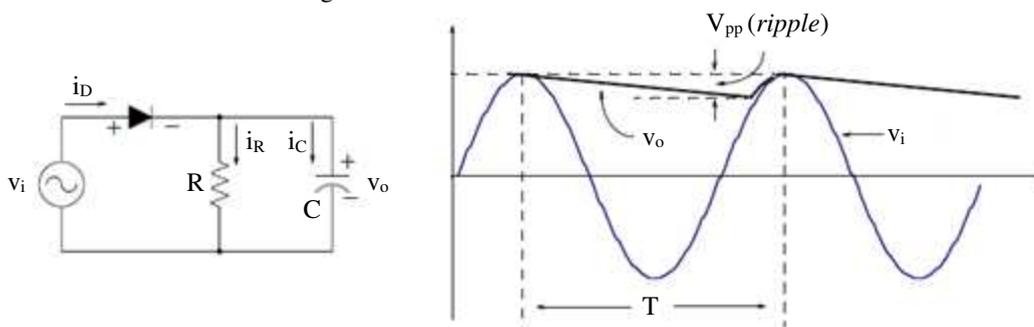


Fonte: Adaptado (LYONS, 2017).

Na prática, projetos de circuitos detectores de envoltória são geralmente simples e de baixo custo. A retificação do sinal de entrada é permitida por meio de um circuito retificador, operado com diodo, enquanto o filtro passa-baixas é exequível com um simples circuito RC, composto de resistor e capacitor em paralelo. A malha RC provê, essencialmente, a suavização da envoltória, determinada pelos picos do sinal de entrada.

Assumindo que o diodo seja ideal e que a constante RC seja muito maior que o período do sinal original, senoidal neste exemplo, a tensão no capacitor é conforme mostrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Circuito detector de envoltória.



Fonte: Adaptado (KARRIS, 2005).

Sempre que a tensão de entrada  $v_i$  for maior que a tensão  $v_o$  sobre o capacitor  $C$ , o diodo conduz e o capacitor se carrega com o valor presente na entrada. Em situação oposta, o capacitor irá se descarregar no resistor  $R$ . Desta forma, o sinal de tensão de saída é apresentado como a envoltória do sinal de tensão de entrada. A função do circuito é, portanto, seguir a amplitude positiva do sinal de entrada quando esta é maior que a tensão de joelho do diodo (ALAA, 2013).

A baixa impedância intrínseca do diodo e do capacitor permite que o capacitor seja carregado com uma constante de tempo muito curta (COWLES, 2004). É importante observar que, quando a tensão de entrada  $v_i$  tem sua polaridade invertida,  $v_o$  diminui exponencialmente com a descarga do capacitor, segundo a constante de tempo  $RC$ . Entretanto, em detecção de sinais RF, o sinal de entrada é tão rápido que a saída sequer sofre elevadas variações. Ou seja, enquanto um aumento da amplitude de  $v_i$  aumenta  $v_o$  rapidamente, uma diminuição dos picos de amplitude do sinal de entrada não afeta em muito a saída. Esta característica é ajustada pela seleção dos parâmetros  $R$  e  $C$  do circuito.

A seleção dos parâmetros  $R$  e  $C$  é crucial para o correto dimensionamento do detector de envoltória. Além disso, o projetista deve-se ater à correta escolha do tipo de diodo empregado. Diodos Schottky são comumente utilizados para esta aplicação, além de terem rápida resposta de comutação, possuem baixos valores de tensão de joelho (de 200 a 450 mV) em relação aos diodos comuns (maior que 700 mV), o que aumenta a sensibilidade e eficiência do circuito, diminuindo os requisitos de amplificação do sinal (COWLES, 2004).

A detecção de envoltória apresenta-se, portanto, como técnica apta a reproduzir características de interesse do sinal de arco, essencialmente centradas no reconhecimento dos momentos e intensidade das EET nos processos de ignição, reignição e extinção de arco elétrico.

Embora o emprego da técnica de detecção de envoltória contribua para a aquisição de um sinal resultante com menores componentes de frequência, parte do circuito eletrônico da técnica demanda restrições de projeto para aplicações em alta frequência. Uma das restrições baseia-se no fato de que comprimentos de onda de sinais RF podem ser tão pequenos quanto componentes do circuito. Deste modo, indutâncias e capacitâncias parasitas podem ser introduzidas dentro e entre os elementos instalados na placa de circuito impresso (PCI) (LUDWIG e BRETCHKO, 2000).

Diante do exposto, trata-se no item a seguir fundamentos básicos de circuitos aplicados a projetos de circuitos que operam em radiofrequência.

## 2.5 FUNDAMENTOS BÁSICOS DE CIRCUITOS RF

Em aplicações que operam em frequências nas quais o comprimento de onda é várias ordens de grandeza maior que as maiores dimensões do circuito e seus elementos, dispositivos convencionais como capacitores, indutores e resistores são os blocos básicos para os circuitos de transmissão, recepção e processamento de informação (POZAR, 1998). A construção e análise de tais circuitos pode ser realizada adequadamente apenas em termos de correntes de malha e tensão de nó, sem considerar os efeitos de propagação e reflexão dos sinais.

Sinais propagam-se em uma distância de um comprimento de onda em um intervalo de tempo igual a um período de um sinal senoidal aplicado. Portanto, quando as distâncias envolvidas são curtas comparadas com um comprimento de onda  $\lambda_0$ , o atraso de tempo não é significativo (COLLIN, 1992).

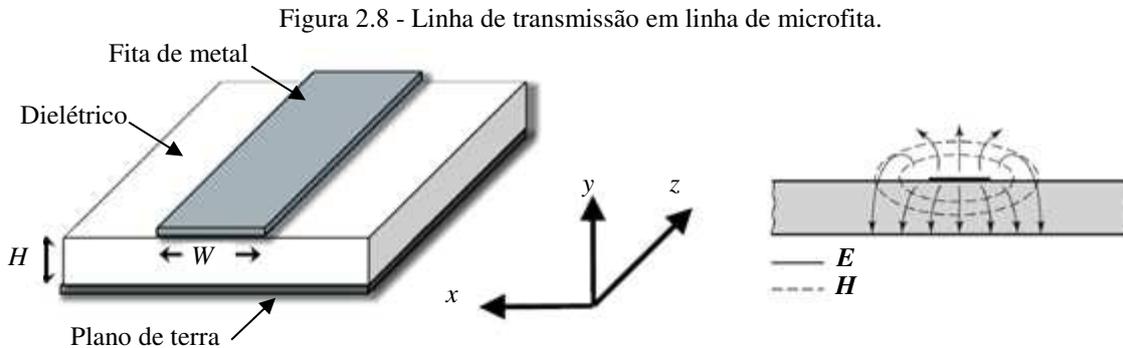
Contudo, à medida que a frequência é elevada a determinado valor, para o qual o comprimento de onda deixa de ser tão grande, em comparação com as dimensões do circuito, os efeitos de propagação não podem mais ser negligenciados (COLLIN, 1992). Um efeito adicional é o grande aumento relativo na impedância de conexões e terminais, além do efeito de capacitância e indutância parasitas dispersas no circuito. Portanto, a aplicação de circuitos e elementos projetados para baixa frequência é inadequada em aplicações de sinais RF.

Um dos requisitos essenciais em um circuito RF é a capacidade de transferir a potência do sinal de um ponto para outro sem perda de radiação e reflexão. Isso requer o transporte eficiente de energia eletromagnética na forma de uma onda de propagação. Ao longo do tempo, uma variedade de estruturas foi desenvolvida para guiar ondas eletromagnéticas de um ponto a outro com mínimas perdas. A estrutura de guia de ondas mais simples, do ponto de vista de construção e análise, é a linha de transmissão planar, em linhas de microfita (POZAR, 1998). Estas estruturas podem ser fabricadas em placas de circuito impresso, possibilitando sua construção com técnicas de baixo custo.

### 2.5.1 LINHA DE TRANSMISSÃO EM LINHAS DE MICROFITA

Linha de microfita, também conhecida por linha impressa ou linha de fita, é basicamente uma linha de transmissão (LT) construída com uma fita de metal condutora,

de largura  $W$  e um plano de terra condutor (POZAR, 1998). Estas partes condutoras são separadas por uma camada dielétrica de permissividade relativa  $\epsilon_r$  e espessura  $H$ , conforme pode ser observado na Figura 2.8.



O plano de terra também pode ser construído com o mesmo material do condutor, e em alguns casos este plano é montado sobre alguma outra superfície metálica (COLLIN, 1992). Por outro lado, o material dielétrico deve possuir baixíssima condutividade, dentre outros fatores. Os tipos de materiais dielétricos mais indicados para este tipo de estrutura são fibra de vidro, poliestireno, polietileno e alumina (COWLES, 2004).

Devido às características de propagação no material dielétrico, a velocidade de fase no ar ( $c$ ) é diferente da velocidade de fase no meio, visto que a onda propagada sofre reflexão na área de interação ar-dielétrico. Se a espessura do dielétrico for muito menor do que o comprimento de onda ( $H \ll \lambda$ ), o modo fundamental se comporta com aproximação das expressões de campo elétrico e magnético (LIMA, SILVA e FERREIRA JR., 2013).

Como parte dos campos está imerso no ar e parte está imerso num meio com  $\epsilon_r$ , define-se uma constante dielétrica efetiva  $\epsilon_e$ , tal que  $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ . Deste modo, a constante dielétrica efetiva pode ser interpretada como  $\epsilon_r$  de um meio homogêneo equivalente para o qual teria a mesma velocidade de fase (POZAR, 1998). A constante dielétrica efetiva  $\epsilon_e$  é então determinada por 2-1 e depende dos parâmetros apresentados na Figura 2.8.

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12H/W}} \quad 2-1$$

Uma vez que a constante  $\epsilon_e$  tenha sido definida, a velocidade de fase e a constante de propagação podem ser calculadas por 2-2 e 2-3, respectivamente.

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon_o \epsilon_e}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad 2-2$$

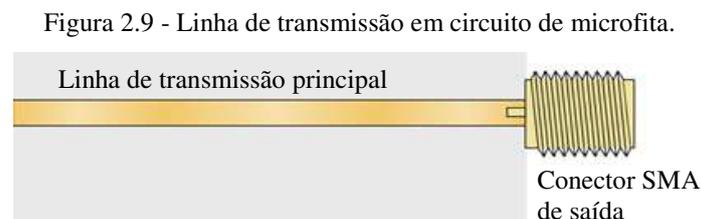
$$\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_e} \quad 2-3$$

Finalmente, a impedância característica da linha pode ser expressa em função de  $H$ ,  $W$  e  $\epsilon_e$ , conforme 2-4.

$$Z_o = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left( \frac{8H}{W} + \frac{W}{4H} \right), & \text{para } \frac{W}{H} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} \left( \frac{W}{H} + 1,393 + 0,0667 \ln \left( \frac{W}{H} + 1,444 \right) \right)}, & \text{para } \frac{W}{H} > 1 \end{cases} \quad 2-4$$

A impedância característica de uma LT é usualmente determinada numericamente (LIMA, SILVA e FERREIRA JR., 2013). Analogamente, o uso da expressão inversa de 2-4 é suficiente para determinar as dimensões da LT para uma impedância característica desejada. Uma vez que o parâmetro de entrada  $H$  seja conhecido, para um determinado projeto em uma PCI específica, a única variável não conhecida passa a ser a largura da linha de transmissão  $W$ , que pode ser também calculada numericamente.

Na Figura 2.9 tem-se a representação de uma linha de transmissão em circuito de microfita, conectada a um terminal subminiatura versão A (SMA, do inglês, *SubMiniature version A*).



Fonte: Adaptado (YEOM, 2015).

De modo geral, os circuitos RF devem ter seus detalhes construtivos especificados para que seja garantida a propagação dos sinais com a menor perda possível, ou seja, com a máxima transferência de potência. Este critério é logrado com o correto dimensionamento das impedâncias das linhas de transmissão, malhas de amplificação, filtros etc. Para que seja garantida a uniformidade na propagação dos sinais, projetistas utilizam-se da técnica de casamento de impedância.

O casamento de impedâncias é realizado com inserção de elementos (capacitores e indutores) que contribuam para o casamento entres as impedâncias vistas pela fonte e pela carga. Os elementos utilizados podem ser do tipo concentrados ou distribuídos. Elementos concentrados são os próprios componentes físicos (discretos), que, para circuitos em alta frequência, utiliza-se dimensões tão pequenas quanto possível, como os dispositivos montados em superfície (SMD, do inglês, *Surface Mounted Devices*).

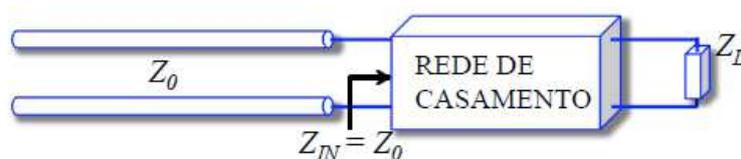
Analogamente, a própria linha de microfita pode ser utilizada para construção dos componentes da malha de casamento de impedância, utilizando-se da estrutura de elementos distribuídos, na qual as linhas se comportam como indutores ou capacitores, respectivamente em estruturas de alta ou baixa impedância. No entanto, a aplicação de elementos distribuídos para o casamento de impedância de circuitos que operam em banda larga é uma tarefa complexa. Além disso, o dimensionamento de elementos que operem em componentes de frequência muito inferiores a 1 GHz resulta em elevadas dimensões às linhas de microfita, tornando seu projeto inviável.

Com o intuito de não delongar o conteúdo deste capítulo, serão apresentados apenas os conceitos de casamento de impedância em elementos concentrados (componentes discretos), utilizados na metodologia deste trabalho de dissertação.

### 2.5.2 CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA EM ELEMENTOS CONCENTRADOS

De modo geral, a rede de casamento é projetada de maneira que a impedância percebida pela carga ( $Z_L$ ) seja igual à impedância característica da linha ( $Z_0$ ), conforme pode-se ver na Figura 2.10 - Técnica de casamento de impedância. Desta forma, a rede de casamento garante que haja o mínimo de reflexão para o gerador dos sinais, e que a impedância de entrada ( $Z_{IN}$ ) seja independente do comprimento exato da LT considerada (POZAR, 1998).

Figura 2.10 - Técnica de casamento de impedância.

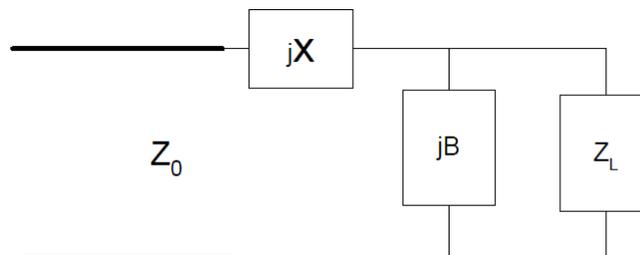


Fonte: Adaptado (POZAR, 1998).

Em suma, a rede de casamento é uma impedância adicional conectada à existente, afim de se alcançar um efeito específico: máxima transferência de potência ou a redução de reflexões do sinal (ZHURBENKO, KROZER e RUBAEK, 2010).

Uma maneira simples e efetiva de realizar o casamento de impedância de uma carga  $Z_L$ , com a impedância da LT  $Z_0$ , é mediante a aplicação de um circuito LC (MATZNER, LEVY e MOALEM, 2008). O circuito LC se utiliza de dois elementos reativos,  $jX$  e  $jB$ , dispostos em relação à carga conforme apresentado na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Casamento de impedância em circuito LC.



Fonte: Adaptado (MATZNER, LEVY e MOALEM, 2008).

Para o cálculo de  $X$  e  $B$ , assume-se que  $jX$  seja a reatância, e  $jB$  a admitância da impedância da rede de casamento. Para que o casamento entre as impedâncias da carga e da linha seja de fato atingido, tem-se a condição apresentada pela expressão 2-5, na qual  $R_L$  é a resistência e  $X_L$  a reatância da carga.

$$Z_0 = jX + \frac{1}{jB + \frac{1}{R_L + jX_L}} \quad 2-5$$

Ao separar as partes real e imaginária da expressão 2-5 e isolando as variáveis  $X$  e  $B$ , tem-se as expressões 2-6 e 2-7 a seguir.

$$B = \frac{1}{2(Z_0 R_L^2 + Z_0 X_L^2)} \left( 2Z_0 X_L \pm 2\sqrt{-Z_0^2 R_L^2 + Z_0 R_L^3 + Z_0 X_L^2 R_L} \right) \quad 2-6$$

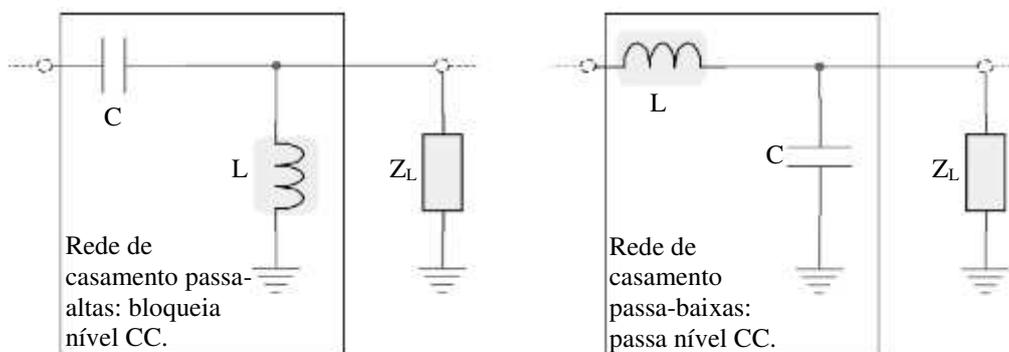
$$X = \frac{B R_L^2 + B X_L^2 - X_L}{B^2 R_L^2 - 2B X_L + 1 + B^2 X_L^2} \quad 2-7$$

Com a análise das expressões 2-6 e 2-7, é possível identificar que existem duas soluções possíveis para  $B$ , e conseqüentemente para  $X$ . As duas soluções são fisicamente possíveis. Caso  $X$  seja positivo, indica-se o uso de um indutor, caso contrário, implica na utilização de um capacitor. Analogamente, quando a solução de  $B$  for positiva, trata-se da aplicação de um capacitor, e para o caso negativo,  $B$  representa um indutor.

Diante do exposto, os valores de  $X$  e  $B$  são calculados de acordo com as impedâncias características da carga e da linha. Adicionalmente, a característica reativa de cada elemento ( $X$  e  $B$ ) da rede LC pode ser previamente escolhida, a depender dos critérios de propagação dos sinais, considerados pelo projetista.

A rede de casamento LC pode ser compreendida como um filtro que, a depender da disposição dos elementos escolhida pelo projetista, pode ser do tipo passa-altas ou passa-baixas. Em projetos de circuitos RF, encontra-se usualmente a configuração que atua como um filtro passa-altas, uma vez que nesta configuração a rede de casamento por si só pode atuar como um bloqueio de tensão contínua (nível CC) (NASH, 2000). Os dois tipos comuns de rede de casamento LC podem ser visualizados na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Redes de casamento LC em elementos concentrados.



Fonte: Autoria própria.

Uma vez atingido o devido casamento de impedância, espera-se que a perda de retorno dos sinais na LT seja mínima sendo, portanto, transferido o máximo de potência de sinal. A relação entre o coeficiente de perda de retorno  $S_{11}$  (em dB) e a taxa de transferência de potência do sinal (em %) é a base das especificações de projeto, sendo esta apresentada em tabela resumida na metodologia deste trabalho.

Neste capítulo de fundamentação teórica, foram apresentados fundamentos técnicos necessários para o entendimento deste trabalho de dissertação. O embasamento teórico sobre disjuntores e técnicas de monitoramento foram cruciais para o entendimento da motivação do trabalho. A análise das EET irradiadas pelo arco elétrico, assim como a apresentação da detecção de envoltória e de projetos de circuitos RF, contribuíram para a compreensão dos principais objetivos desta pesquisa.

No próximo capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica desenvolvida sobre os principais trabalhos e contribuições relacionados ao tema abordado.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados em ordem cronológica os principais trabalhos encontrados na literatura que contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa. Dá-se destaque às contribuições associadas à detecção de Emissões Eletromagnéticas Transitórias (EET) irradiadas pelo arco elétrico em disjuntores de alta tensão.

A princípio, as emissões eletromagnéticas irradiadas nas subestações de alta tensão eram vistas apenas como fontes de interferência. Pellegrini, Raimo e Reynaud (1976) realizaram um criterioso estudo considerando os problemas de compatibilidade eletromagnética conduzidos aos sistemas de proteção, medição e controle de uma subestação ao tempo de 420 kV na Itália. Os autores examinaram diversas fontes de radiointerferência e estenderam os estudos às perturbações irradiadas no ar, no qual conseguiram medir níveis de tensão induzida transitória. Além de outras fontes de interferência eletromagnética, avaliadas ao longo de um ano, os autores destacaram as correntes elétricas provenientes de surtos conduzidos à malha de aterramento e de operações de seccionadoras e disjuntores de alta tensão. As componentes de frequência das emissões eletromagnéticas medidas alcançaram valores de quilohertz a mega-hertz, a depender das características da corrente interrompida por seccionadoras ou disjuntores.

A partir de então, pesquisadores voltaram-se a estudar os efeitos causados por interferência eletromagnética dentro das subestações de alta tensão aos equipamentos eletrônicos, principalmente. Para tanto, conduziram trabalhos para estimação dos componentes de alta frequência para o correto dimensionamento da compatibilidade eletromagnética entre os equipamentos (ARI e BLUMER, 1987; RUSSEL, HARVEY e NILSSON, 1984). Posteriormente, começaram a surgir trabalhos focados nos efeitos eletromagnéticos causados no sistema pela presença de arcos elétricos em circuitos de potência. A exemplo, um método para localização de falta através de componentes eletromagnéticos em alta frequência (até 60 MHz), propagados por linhas de transmissão, foi desenvolvido (BARTLETT, VAUGHAN e MOORE, 1999). Este trabalho deu início a uma série de contribuições (por parte deste grupo de pesquisadores), a respeito da utilização das emissões eletromagnéticas transitórias (EET) como ferramenta de avaliação de sistemas elétricos de potência, e não mais como fonte de interferência.

Nesta conjectura, Bartlett e Moore (2001) estudaram diferenças entre os sinais EET emitidos durante a abertura e o fechamento de equipamentos de manobra a ar, óleo,

SF<sub>6</sub> e vácuo. A detecção de EET foi realizada por meio de antenas do tipo monopolo com faixa de operação de 1 MHz a 1 GHz e a captação foi realizada com a utilização de um receptor de rádio super heteródino modulador em faixa estreita. A partir deste arranjo, os sinais foram transmitidos a um sistema de processamento de dados localizado na cabine de controle da subestação, que contava com um computador conectado a um DSP robusto, que por sua vez, necessitava de um oscilador externo. Os autores realizaram operações nos equipamentos de modo a classificar os dados entre operações de abertura ou fechamento, duração do evento de comutação e tipo do comutador (chave ou disjuntor). Com a análise das EET adquiridas, os autores verificaram que existe uma diferença de simetria nos sinais provenientes das operações de abertura e fechamento. Eles concluíram que tanto a diferenciação entre os tipos de equipamentos (chaves ou disjuntores), como também a identificação de reignições de arco são possíveis, mediante a técnica utilizada.

Posteriormente, Moore (2004) procedeu com um trabalho voltado à análise de EET provenientes da operação de disjuntores, focado no diagnóstico da sincronia de operação entre os polos do equipamento. Para tanto, o autor propôs um método utilizando a análise de diferença de tempos de chegada (TDOA, do inglês, *Time Difference of Arrival*) para a determinação dos tempos de fechamento dos contatos de um disjuntor, baseado na detecção dos sinais emitidos pelo arco elétrico. A identificação dos instantes de ignição de arco foi realizada pela análise visual das formas de onda das EET detectadas com uso de quatro antenas estrategicamente posicionadas e uso de osciloscópio de alta taxa de amostragem (2,5 GAsps para cada um dos 4 canais utilizados). A faixa de detecção das antenas utilizadas foi de 100 MHz a 1 GHz e os testes foram realizados em um disjuntor a SF<sub>6</sub> no chaveamento de banco de capacitores. O autor concluiu que os tempos de fechamento dos polos podem ser determinados, de maneira confiável mediante a utilização do método proposto. No entanto, o autor expressou que sinais provenientes de equipamentos vizinhos podem interferir na acurácia do método.

Ramli, Birtwhistle e outros (2008) propuseram uma técnica para o monitoramento de disjuntores por meio da análise visual das EET. A detecção dos sinais de arco foi realizada por um arranjo de antenas, na ocorrência de um arco elétrico proveniente da comutação dos contatos de um disjuntor. O arranjo era composto por três antenas de acoplamento capacitivo em forma de cilindro fechado, capazes de detectar frequências de até 100 MHz e uma antena do tipo dipolo (1,5 GHz). A aquisição dos sinais foi realizada com osciloscópio de taxa de amostragem de 1,5 GAsps para cada um dos canais utilizados.

De acordo com resultados apresentados em disjuntores a SF<sub>6</sub> de 275 kV, os autores concluíram que é possível detectar os tempos de fechamento e abertura entre polos.

Chapman (2011), em seu trabalho de doutorado, realizou uma fundamentada discussão sobre as possibilidades e limitações de medições em radiofrequência (RF) do tempo de duração do arco elétrico, estabelecido nos disjuntores de alta tensão. Ao analisar diversas formas de extração de características do arco elétrico expostas na literatura, justificou o uso das EET como técnica de maior confiabilidade, não-intrusiva e de exequível implementação a custo reduzido. Para tanto, dimensionou e utilizou uma câmara de ensaios isolada de ruído RF externo, acoplada a um circuito ressonante. Os ensaios foram realizados em um disjuntor de média tensão 24 kV a SF<sub>6</sub>, com uso de duas antenas do tipo monopolo bicônica, de largura de banda 50 MHz a 200 MHz, e um sensor capacitivo do tipo disco passa-altas a 100 MHz. Com o aparato experimental elaborado por Chapman (2011), foi possível verificar componentes de frequência de até 1,2 GHz, utilizando para tal, um osciloscópio de 2,5 GApS por canal. O autor concluiu que é possível a detecção do tempo de duração do arco elétrico com uso de antenas e sensores.

Lopez-Roldan, Pater e outros (2014) desenvolveram uma metodologia de monitoramento não-intrusivo para disjuntores de alta tensão comutadores de bancos reativos. Para tanto, contou com a colaboração de duas empresas do setor, com subestações instaladas na Austrália e Canadá. Para avaliação de características do arco elétrico gerado nos disjuntores, foram detectadas EET com uso de antenas e sensores. Para as medições na subestação da Austrália, foram instalados três sensores capacitivos do tipo cilindro metálico, com frequência de corte de 50 MHz, e uma antena dipolo de largura de banda 1,5 MHz a 1,5 GHz. Na subestação do Canadá, utilizaram quatro antenas passivas de alta frequência. Os testes em ambas subestações foram em disjuntores de 275 kV, chaveando bancos de capacitores de 30 Mvar e utilizaram osciloscópios de 2,5 GApS por canal. Os autores utilizaram um sistema de medição da corrente de carga para identificação real dos instantes de fechamento dos polos. Os autores concluíram que foi possível identificar a ocorrência de reascendimentos e reignições, tempo de operação de abertura e fechamento dos contatos, tempo de entrada dos resistores de inserção, características da taxa de perda de rigidez dielétrica e avaliação da performance dos circuitos de comando. Os autores concluíram que a análise das EET permite o diagnóstico de disjuntores de alta tensão em serviço (*online*).

Com a análise da bibliografia apresentada, entre outros trabalhos, e tomando como referência a evolução dos processos de monitoramento de equipamentos em serviço, o

Grupo de Disjuntores do LAT/UFCG voltou-se para o desenvolvimento de técnicas de avaliação das EET irradiadas pelo arco elétrico em disjuntores de alta tensão (OLIVEIRA, SANTANA, *et al.*, 2016; SANTANA, OLIVEIRA, *et al.*, 2017). Dentre outros, fazem parte deste grupo de trabalho o autor desta dissertação e Santana, cuja pesquisa voltou-se ao uso dos sensores capacitivos utilizados neste trabalho.

Em sua dissertação de mestrado, Santana (2017) analisou a aplicabilidade de sensores de acoplamento capacitivo no monitoramento de disjuntores de alta tensão. A aplicabilidade dos sensores foi avaliada por meio da comparação dos sinais detectados pelos sensores e por uma antena direcional em banda larga, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Para tanto, analisou:

- Capacidade dos sensores de detectar os sinais dos arcos elétricos produzidos nas câmaras de extinção dos disjuntores;
- Sensibilidade de detecção dos sensores, quando instalados em diferentes posições ao longo do polo do disjuntor;
- Uso de diferentes materiais e dimensões na construção dos sensores;

Santana (2017) concluiu que os sensores analisados são capazes de detectar as ETT provenientes de arcos elétricos em disjuntores. Também foi evidenciado que a sensibilidade de detecção dos sensores depende do material, dimensões e da posição na qual forem instalados ao longo do polo analisado. O autor relata que o uso de material flexível para a confecção dos sensores é mais atrativo, uma vez que os sensores são projetados em forma de fita e são instalados em volta do polo do disjuntor. Todos os sinais analisados foram adquiridos com uso de osciloscópio de 1,25 GAsps por canal.

A Tabela 3.1 é apresentada como um resumo das principais contribuições avaliadas neste trabalho, com o intuito de sintetizar as informações exploradas neste capítulo.

Tabela 3.1 - Resumo das principais referências.

<b>Trabalho</b>	<b>Elemento de Detecção de EET</b>	<b>Informações Adquiridas</b>	<b>Instrumento de Aquisição</b>
Bartlett e Moore (2001)	Antenas do tipo monopolo (100 MHz a 1 GHz)	Diferença visual entre EET de abertura e fechamento do disjuntor.	Receptor de rádio DSB com saída em frequência audível.
Moore (2004)	Antenas monocônicas (100 MHz a 1 GHz).	Tempos de abertura e fechamento dos polos do disjuntor.	Osciloscópio de 2,5 GAs por canal.
Ramli, Birtwhistle e outros (2008)	Antena do tipo dipolo (1,5 GHz) e sensores capacitivos cilíndricos (100 MHz).	Análise visual da sincronia entre os polos do disjuntor.	Osciloscópio de 1,5 GAs por canal.
Chapman (2011)	Antenas do tipo monopolo bicônica (50 MHz a 200 MHz) e um sensor capacitivo do tipo disco passa-altas a 100 MHz.	Determinação do tempo de duração do arco elétrico.	Osciloscópio de 2,5 GAs por canal.
Lopez-Roldan, Pater e outros (2014)	Sensores capacitivos do tipo cilindro metálico (50 MHz), antena dipolo (1,5 MHz a 1,5 GHz) e quatro antenas passivas UHF.	Identificação de reascendimentos e reignições, tempo de operação de abertura e fechamento dos contatos, tempo de entrada dos resistores de inserção, características da taxa de perda de rigidez dielétrica e avaliação da performance dos circuitos de comando.	Osciloscópio de 2,5 GAs por canal.
Santana (2017)	Sensores de acoplamento capacitivo em forma de fita e antena direcional log-periódica (1 MHz a 2 GHz).	Tempo de duração e energia de sinal do arco elétrico.	Osciloscópio de 1,2 GAs por canal.
Este trabalho	Sensor de acoplamento capacitivo em forma de fita.	Tempo de duração e energia de sinal do arco elétrico.	Avalia técnica de redução dos critérios de amostragem das EET para aquisição confiável dos parâmetros avaliados.

Fonte: Autoria própria.

Neste capítulo foi apresentada uma análise bibliográfica dos principais trabalhos relacionados ao tema proposto. Apresenta-se no seguinte capítulo a metodologia utilizada nos procedimentos do presente trabalho de dissertação.



## 4 METODOLOGIA

Para o cumprimento dos objetivos traçados para a conclusão deste trabalho, uma metodologia específica foi delineada. A metodologia empregada é apresentada neste capítulo como descrição do material e métodos utilizados.

### 4.1 MATERIAL

O objeto dos ensaios realizados nesta pesquisa é um disjuntor de média tensão do tipo PVO fabricado pela Siemens, sendo este apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Fotografia do disjuntor utilizado nos ensaios.



Fonte: A autoria própria

Os dados de placa do disjuntor PVO utilizado estão contidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Dados de placa do disjuntor utilizado.

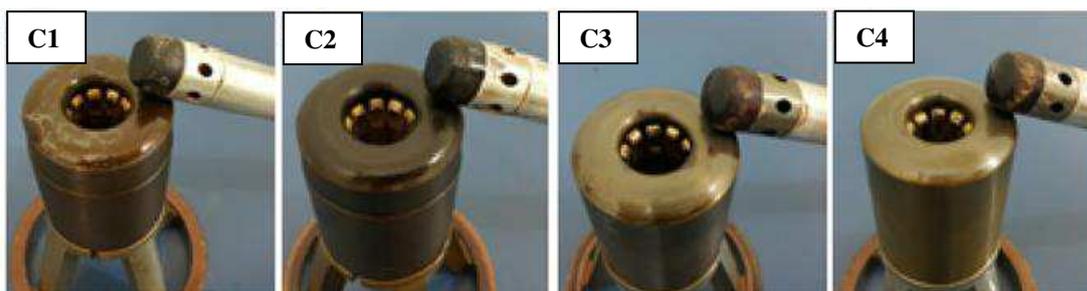
Tipo	3AC
Ano de fabricação	1978
Peso	120 kg
Corrente nominal	800 A
Tensão nominal	15 kV
Corrente de interrupção	12,5 kA
Frequência	50/60 Hz
Meio isolante	Óleo
Fabricação	Siemens

Fonte: A autoria própria

Por sua vez, o disjuntor de ensaio abriga os pares de contatos (fixo e móvel) utilizados nesta pesquisa como corpos de ensaio. Ao total, tem-se para aplicação da análise deste trabalho quatro amostras, com distintos níveis de degradação, nomeadas de C1 a C4.

As amostras selecionadas foram agrupadas em dois grupos de classificação por nível de degradação. As amostras C1 e C2 são consideradas menos degradadas, uma vez que foram adquiridas em estado de novo e foram utilizadas apenas em ensaios de laboratório a baixa tensão (12 V) e a correntes de aproximadamente um terço da corrente nominal (250 A). Já as amostras C3 e C4 possuem maior nível de degradação em relação aos contatos C1 e C2. Os pares de contatos C3 e C4 já foram utilizados em campo e foram doados ao laboratório com presença de deterioração acumulada durante o tempo em que estiveram em serviço. Os contatos utilizados são mostrados na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Pares de contatos utilizados nos ensaios.



Fonte: Autoria própria.

Os contatos apresentados na Figura 4.2 foram submetidos a ensaios de detecção de EET. A detecção das EET irradiadas pelo arco elétrico foi realizada com a utilização de um sensor de acoplamento capacitivo em forma de fita, ilustrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Fotografia do sensor capacitivo.



Fonte: Autoria própria.

Este sensor foi projetado e construído como resultado do trabalho de mestrado de Santana (2017). As características do sensor utilizado são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características do sensor de acoplamento capacitivo.

Tipologia	Passa-altas
Capacitância	184 pF
Comprimento	290 mm
Largura	20 mm
Espessura	1,52 mm
Material dielétrico	Fibra de Vidro
Frequência de corte	15,8 MHz
Impedância total	50 $\Omega$

Fonte: Autoria própria.

Destaca-se que o sensor utilizado é capaz de detectar sinais de arco e que o mesmo se apresenta como um sensor do tipo passa-altas, com frequência de corte próxima a 16 MHz, conforme apresentado na Tabela 4.2. As características do sensor são consideradas no dimensionamento do circuito de detecção de envoltória proposto como objetivo deste trabalho.

## 4.2 MÉTODOS

Os métodos empregados na metodologia deste trabalho dividem-se em quatro etapas principais, brevemente apresentadas a seguir.

- i. A etapa de realização de ensaios de abertura do disjuntor e aquisição das EET do arco elétrico foi executada no LAT/UFCG e é descrita no início desta seção;
- ii. Posteriormente, são apresentados os métodos de análise dos sinais de arco, assim como dos cálculos de seus parâmetros de diagnóstico, com uso da ferramenta computacional Matlab®;
- iii. Em seguida, apresenta-se a metodologia de análise da técnica de redução dos requisitos de amostragem dos sinais de arco, proposta com a utilização de detecção da envoltória. A técnica de detecção de envoltória é então avaliada quanto à sua confiabilidade, por meio de simulações de detecção digital de envoltória, com uso do Simulink® e Matlab®;
- iv. Uma vez provada sua aplicabilidade na extração de parâmetros do arco, foi projetado e testado, por meio de simulações, o circuito de detecção de

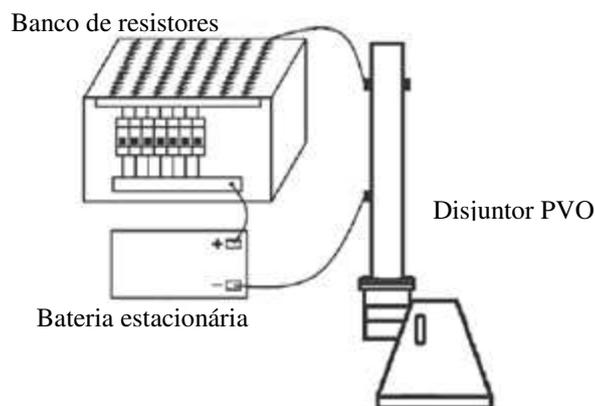
envoltória das EET. A etapa de simulação divide-se essencialmente em simulação no domínio do tempo, utilizando-se do Simulink<sup>®</sup>, e no domínio da frequência, com uso do Advanced Design System (ADS)<sup>®</sup>.

#### 4.2.1 PREPARAÇÃO DO ENSAIO: INJEÇÃO DE CORRENTE DE TESTE

Os testes nos contatos do disjuntor sob ensaio foram realizados com a utilização de um sistema de injeção de corrente contínua a baixa tensão (12 V). Para tanto, foi empregado o sistema de injeção de corrente desenvolvido por Souza e Costa (2014).

No sistema desenvolvido por Souza e Costa (2014), a injeção da corrente de teste é realizada a partir da associação de uma bateria estacionária (12 V/220 Ah) em série com um banco de resistores ajustável (0,040  $\Omega$  a 1,2  $\Omega$ ). O arranjo, apresentado na Figura 4.4, é capaz de estabelecer corrente elétrica de até 300 A.

Figura 4.4 - Diagrama esquemático do sistema de injeção de corrente.



Fonte: Adaptado (SOUZA e COSTA, 2014).

Nos ensaios realizados neste trabalho, o arranjo foi ajustado para fornecer 250 A, aplicada aos terminais do polo em ensaio. A corrente injetada pode ser medida por meio de um transdutor de corrente que fornece um sinal de tensão proporcional ao valor de corrente, cuja relação é de 1 V para cada 100 A.

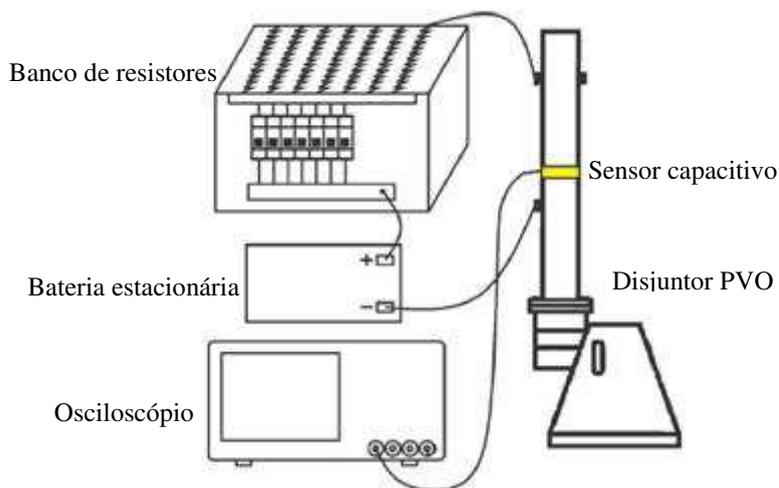
Durante os ensaios utilizou-se apenas um dos três polos do disjuntor PVO, para que fossem delimitadas as variáveis não controláveis do experimento, como por exemplo, diferentes desgastes mecânicos entre cada polo. Deste modo, a cada conjunto de 20 ensaios, o polo foi desmontado e remontado para instalação de cada uma das quatro amostras de par de contatos.

O sistema descrito foi utilizado para provocação do arco elétrico no polo do disjuntor sob ensaio. Uma vez que seja possível conduzir o sistema ao estabelecimento do arco elétrico, torna-se aplicável a detecção e aquisição das EET do arco elétrico.

#### 4.2.2 REALIZAÇÃO DO ENSAIO: DETECÇÃO DAS EET DO ARCO ELÉTRICO

A detecção dos sinais de arco (EET) foi realizada com o uso de sensor de acoplamento capacitivo. Por se tratar de um sensor flexível, ele foi instalado ao redor do polo do disjuntor. O sensor instalado foi conectado por um cabo coaxial ( $50 \Omega$ ) ao canal de  $50 \Omega$  do osciloscópio, perfazendo o casamento de impedância. Por sua vez, o osciloscópio Tektronix® TDS 5104B foi configurado a adquirir  $5 \times 10^6$  amostras em 2 milissegundos, resultando em uma taxa de amostragem de 2,5 GAsps. Tem-se, na Figura 4.5, o diagrama do arranjo utilizado nos ensaios.

Figura 4.5 - Arranjo de ensaio de detecção de sinais de arco.



Fonte: Adaptado (SANTANA, 2017).

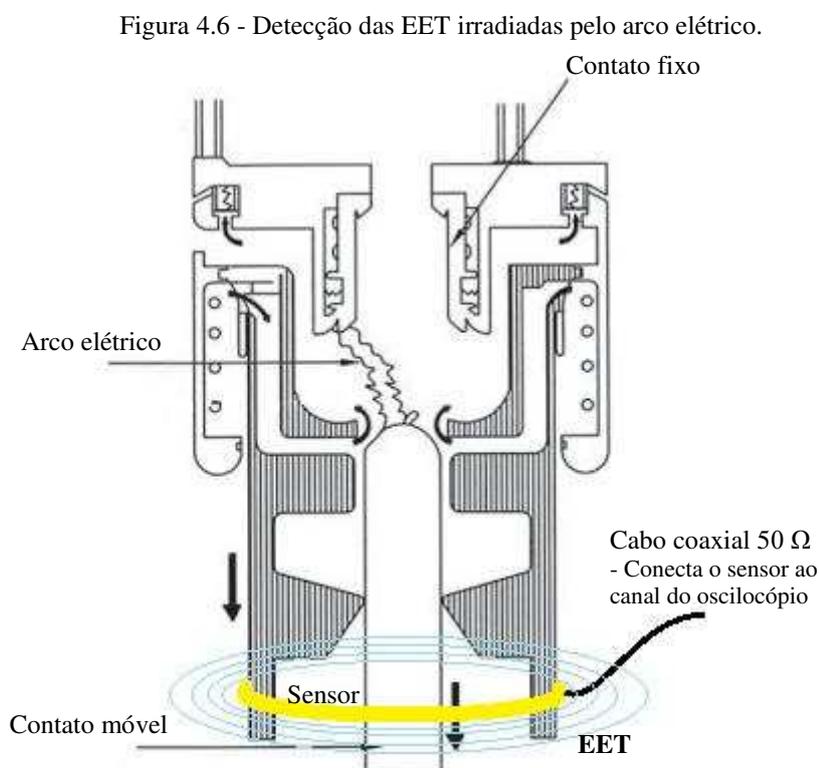
Após a montagem do arranjo, foram realizadas 20 operações de abertura do disjuntor, submetido a correntes de 250 A no polo sob ensaio. A rotina de 20 ensaios foi repetida para cada um dos quatro pares de contatos analisados.

A operação de abertura do disjuntor PVO utilizado é realizada de forma mecânica, com um sistema de acionamento composto por molas. Para que o sistema mecânico tenha energia suficiente para proceder com o processo de abertura, requer-se que a mola de abertura esteja armada, procedimento o qual é feito manualmente, utilizando-se de um

braço de alavanca. Com o sistema de molas armado, procede-se com o acionamento manual do equipamento para a efetiva abertura do disjuntor.

Durante a separação dos contatos no processo de abertura, é estabelecido um arco elétrico entre os contatos do disjuntor, com conseqüente radiação das EET. As EET emitidas pelo arco elétrico, estabelecido em cada uma das 20 operações, foram detectadas pelo sensor de acoplamento capacitivo, sendo então adquiridas e armazenadas pelo osciloscópio.

Na Figura 4.6 é possível identificar um esboço de como é realizada a detecção dos sinais de arco durante a operação de abertura do disjuntor.



Fonte: Adaptado (BHEL, 2006).

As formas de onda adquiridas e armazenadas pelo osciloscópio foram transferidas a um computador para a análise e processamento dos dados.

A partir da seção seguinte são apresentados os procedimentos da etapa de processamento e análise de dados, na qual foi realizada uma análise criteriosa dos sinais de arco, com ênfase nos parâmetros avaliativos de duração e energia do sinal de arco elétrico.

### 4.2.3 ANÁLISE DE SINAIS DE ARCO E EXTRAÇÃO DOS PARÂMETROS

Após a realização dos ensaios e a devida transferência dos dados armazenados no osciloscópio para um computador de mesa, procedeu-se com o processamento dos sinais com uso da ferramenta computacional Matlab®.

Em primeira etapa os dados foram extraídos e avaliados como sinais representados no domínio do tempo. Ademais, foi realizada uma análise sobre o comportamento dos sinais de arco no domínio da frequência. A partir da observação destes sinais, pôde-se desenvolver uma rotina do Matlab® para extração dos parâmetros de duração de arco e energia do sinal de arco. Os parâmetros dos sinais de arco são extraídos para que sirvam de referência futura no processo de análise da detecção de envoltória.

Como apresentado no Capítulo 2, EET são mais intensas em momentos de ignição e extinção do arco elétrico. Uma vez que a diferença entre o início e fim do arco elétrico seja verificada, a duração de arco elétrico pode, então, ser determinada pela diferença temporal entre os instantes de maiores amplitudes das EET.

Para estimação da duração de arco elétrico (DA), foi desenvolvida uma rotina no Matlab® que reconhece os momentos de maior intensidade das EET e calcula a diferença dos instantes de tempo entre a última ( $t_{fim}$ ) e a primeira ( $t_{inicio}$ ) presença de arco, conforme apresentado na expressão 4-1.

$$DA = t_{fim} - t_{inicio} \quad 4-1$$

A fim de se estudar o comportamento dos sinais de arco, entre as 20 medições registradas, foram calculados os atributos estatísticos de média e desvio padrão do parâmetro DA. Em seguida, a mesma rotina do Matlab® procede com o cálculo do parâmetro de energia do sinal de arco (EA). EA é associada ao parâmetro que avalia a degradação dos contatos de arco, o qual é apresentado na Tabela 2.1 como relevante no diagnóstico de disjuntores de alta tensão.

A avaliação de EA é então considerada no processo e segue o semelhante raciocínio da avaliação da duração do arco, no qual são considerados os atributos estatísticos de média e desvio padrão entre as 20 medições realizadas para cada contato.

O parâmetro EA é possível de ser estimado com o cálculo de energia de sinal discreto, determinado pela soma dos quadrados dos valores de tensão ponto a ponto. O cálculo de EA é realizado conforme apresentado em 4-2, em que  $V_{(n)}$  é o valor de tensão

da amostra  $n$ , e  $n_{fim}$  e  $n_{início}$  são as amostras que representam os instantes de fim e início do arco elétrico, respectivamente.

$$EA = \sum_{n=n_{início}}^{n_{fim}} |V_{(n)}|^2 \quad 4-2$$

O parâmetro EA é delimitado no intervalo de duração do arco elétrico. Logo, o cálculo de EA depende da determinação de DA.

A extração de ambos os parâmetros DA e EA é possível com a aquisição completa dos sinais de arco, conforme realizado até então, com a utilização de um osciloscópio com taxa de aquisição de 2,5 GAs para cada canal.

Com o intuito de se reduzir a amostragem dos sinais, facilitando o processo de aquisição e tratamento dos dados, pretende-se avaliar a técnica de detecção de envoltória como método de simplificação do conteúdo dos sinais de RF. A metodologia de avaliação desta técnica é apresentada no item seguinte.

#### 4.2.4 TESTES DE APLICABILIDADE DA DETECÇÃO DE ENVOLTÓRIA

Como apresentado, a técnica de detecção de envoltória é proposta nesse trabalho como ferramenta de redução dos requisitos de amostragem dos sinais RF provenientes do arco elétrico. Para tanto, faz-se necessária a avaliação de sua confiabilidade quanto à capacidade em fornecer os parâmetros de duração do arco elétrico e energia do sinal.

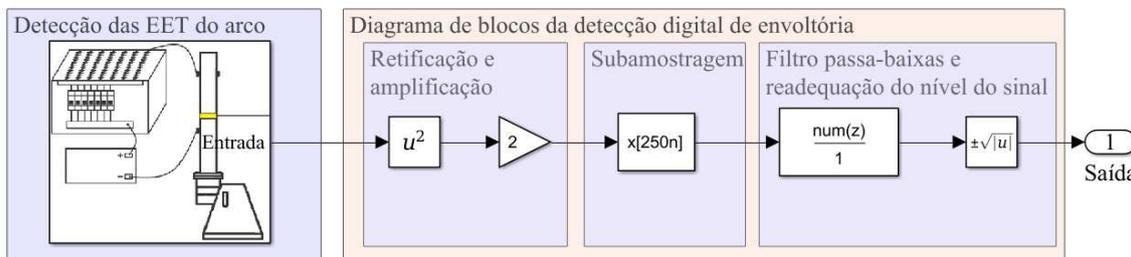
A avaliação da acurácia da técnica de detecção de envoltória quanto à extração dos parâmetros mencionados é realizada neste trabalho por meio de comparação. Os parâmetros extraídos dos sinais originais são comparados àqueles provenientes dos sinais que representam suas envoltórias. Para que esta análise seja feita, as envoltórias das EET, adquiridas nos ensaios são calculadas por meio de detecção digital, utilizando-se de simulação na ferramenta Simulink® do Matlab®.

A detecção digital de envoltória permite uma análise aproximada do comportamento do circuito detector de envoltória, suficiente para análise da aplicabilidade da técnica (LYONS, 2017). De modo geral, a simulação da técnica é lograda mediante o diagrama apresentado na Figura 2.6, da Seção 2.4.

Especificamente a esta aplicação, tem-se o diagrama de blocos apresentado na Figura 4.7, utilizado para a detecção digital das envoltórias das EET. Este processo foi

utilizado para detecção de envoltórias dos sinais adquiridos em cada uma das 20 medições das quatro amostras de contatos utilizadas nos ensaios.

Figura 4.7 - Diagrama de blocos da detecção digital de envoltória.



Fonte: Autoria própria.

A motivação deste procedimento é propor a redução de esforço de amostragem dos sinais de arco. Para tanto, a técnica de detecção de envoltória foi simulada seguindo o diagrama da Figura 4.7. A etapa de retificação e amplificação do sinal é utilizada para que metade da energia do sinal seja deslocada para componentes de frequências mais elevadas, enquanto a outra metade é concentrada em torno das componentes de frequência mais baixas. A etapa denominada de subamostragem trata de utilizar uma taxa de amostragem menor que a taxa de amostragem utilizada para adquirir o sinal original. Finalmente, o filtro passa-baixas é utilizado para eliminar as porções de energia do sinal nas frequências mais elevadas.

O processo da simulação de detecção de envoltória resulta em envoltórias simuladas dos sinais de arco originais, amostradas em diferentes taxas de amostragem ajustadas na etapa de subamostragem do diagrama de blocos da Figura 4.7. Portanto, para a avaliação da técnica, foram simuladas e avaliadas envoltórias com taxas de amostragem diferentes, de 10 MAsps, 5 MAsps, 2,5 MAsps, 1 MAsps e 250 kAsps.

Para cada uma das envoltórias simuladas, foram novamente calculados os parâmetros de duração de arco e energia de sinal de arco. Em seguida, seus atributos estatísticos foram comparados àqueles calculados a partir dos sinais originais.

Uma vez que tenha sido analisada a aplicabilidade da técnica, a etapa apresentada a partir do item a seguir é a metodologia para dimensionamento do circuito detector de envoltória, aplicado especificamente às EET irradiadas pelo disjuntor utilizado nesta pesquisa.

## 4.2.5 DIMENSIONAMENTO E AVALIAÇÃO DE CIRCUITO DETECTOR DE ENVOLTÓRIA

Em um primeiro momento, o dimensionamento geral do circuito detector de envoltória foi feito por meio de cálculo e posterior seleção dos parâmetros de cada componente, seguido de simulações para teste do circuito. Mediante os resultados avaliados nas simulações iniciais, os valores de cada componente foram ajustados e novamente procedeu-se com as simulações, até que fosse possível atingir os resultados que representassem a detecção de envoltória de forma eficiente.

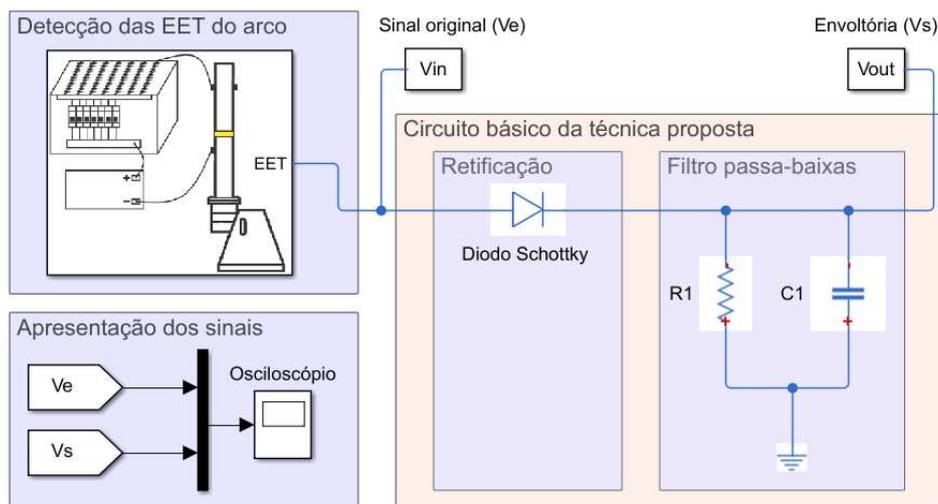
As simulações foram realizadas em distintas ferramentas computacionais, a depender do modo de avaliação. Em primeira ocasião, utilizou-se o Simulink<sup>®</sup> do Matlab<sup>®</sup> para a simulação do circuito e conseguinte avaliação de seu desempenho no domínio do tempo. Em seguida, procedeu-se com o uso do Advanced Design Systems (ADS)<sup>®</sup> para a simulação do circuito no domínio da frequência. O uso do ADS<sup>®</sup> foi determinante, principalmente, no projeto de linha de transmissão e casamento de impedância, essenciais à análise do comportamento do circuito na propagação dos sinais EET detectados, uma vez que estes se apresentam em componentes de radiofrequência.

### 4.2.5.1 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO NO DOMÍNIO DO TEMPO

O circuito dimensionado e simulado para avaliação no domínio do tempo tem como base o que foi apresentado na Seção 2.4, a qual trata dos fundamentos da detecção de envoltória de sinais RF, e destacado na Figura 2.7, na qual é apresentado um circuito detector de envoltória básico.

A princípio, o circuito detector de envoltória divide-se em uma parte responsável pela retificação do sinal, com utilização de um diodo, e outra encarregada de filtrar as componentes de alta frequência remanescentes, com uso de um filtro passa-baixas. As duas partes principais do circuito (retificador e filtro) são especificadas essencialmente pelo diodo escolhido e a constante RC determinada pela capacitância e resistência do filtro. O esquema básico do circuito detector de envoltória para simulação no Simulink<sup>®</sup> é apresentado a seguir, na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Esquema básico de simulação do circuito no Simulink®.



Fonte: Autoria própria.

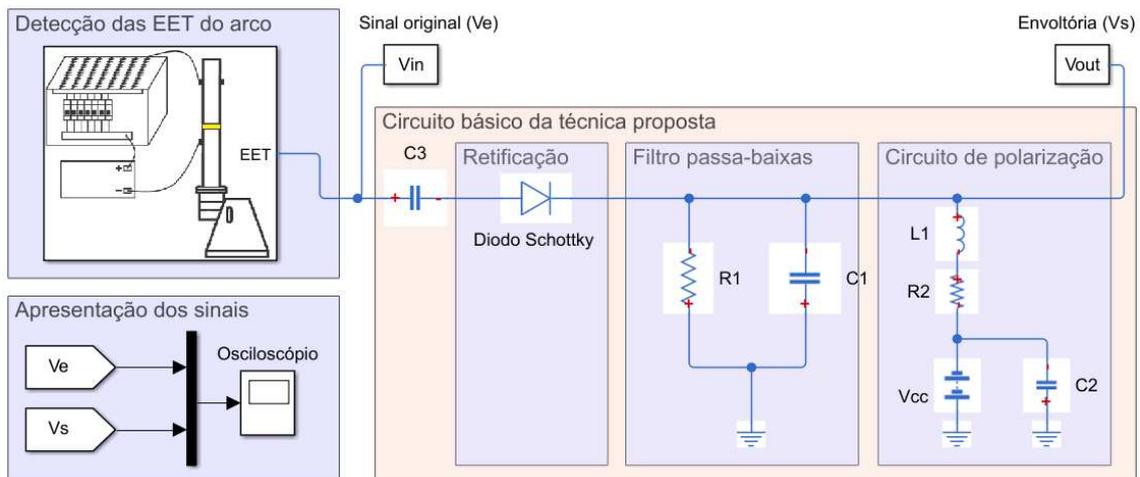
Sucintamente, a resistência  $R1$  e a capacitância  $C1$  do filtro RC são calculadas para que seja obtida uma constante RC condizente com a maior frequência da envoltória resultante da análise descrita em 4.2.4. Ou seja, a escolha da constante RC é dependente das características de interesse da saída resultante do detector digital de envoltória.

Por sua vez, o diodo deve ser especificado segundo as características do sinal de entrada do circuito, ou seja, das EET do arco elétrico. Uma vez que as EET do arco apresentem componentes de frequência em RF, faz-se necessário o uso de diodos de rápida resposta, ou seja, com o mínimo tempo de comutação. Este tempo de comutação mínimo deve ser calculado como menor que o inverso da maior componente de frequência das EET.

Além disso, o dimensionamento do retificador deve considerar os níveis de tensão das EET, uma vez que a tensão das EET deve sempre ser maior que a tensão de polarização direta do diodo, para o diodo possa conduzir. Diodos Schottky são diodos que possuem rápida resposta e mínima tensão de polarização direta, sendo então indicados para a determinada aplicação.

No entanto, para o caso em que a tensão de polarização direta do diodo não consiga ser superada pelos níveis de tensão do sinal RF, faz-se necessário o uso de algum artifício de acréscimo de tensão. Em circuitos que operam em RF, normalmente utiliza-se amplificadores RF ou circuitos de polarização. Para o caso do circuito dimensionado neste trabalho, é considerado o uso de um circuito de polarização, com o objetivo de garantir que o diodo trabalhe permanentemente em polarização direta, conforme é observável na Figura 4.9.

Figura 4.9 - Diagrama de simulação do circuito detector no Simulink®.



Fonte: Autoria própria.

Quanto ao seu projeto, o circuito de polarização deve considerar o nível de tensão contínua aplicado suficiente para polarizar diretamente o diodo, respeitando a corrente máxima aplicada nos terminais do dispositivo, ajustada pelo valor de R2.

No entanto, este nível CC é indesejável na entrada do circuito, para que não haja polarização do canal de transmissão, ou do próprio sensor utilizado à montante. Neste sentido, faz-se necessário o projeto de bloqueio de nível CC. O bloqueio CC é alcançado com o uso de um capacitor em série (C3), que por sua vez, é projetado para funcionar como um filtro passa-altas. O valor de C3 deve ser tal qual a reatância resultante seja muito menor que a impedância característica do circuito ( $50 \Omega$ ).

Analogamente, o nível CC deve ser evitado na saída do circuito detector de envoltória, para que o mesmo não comprometa a entrada em um posterior circuito de aquisição de dados. No entanto, supõe-se que bloqueio de nível CC seja realizado pelo sistema à jusante do circuito detector, seja por hardware ou software, sendo desconsiderado nesta etapa de projeto.

Outrossim, é preferível que o ramo do circuito de polarização não tenha componentes RF, mas apenas CC, para que não haja perda de potência do sinal de arco. A filtragem de componentes RF é aplicada com a introdução da indutância L1, que passa a funcionar como um filtro passa-baixas. O valor de L1 deve resultar em um cálculo de reatância indutiva muito maior que a impedância característica do circuito ( $50 \Omega$ ).

Por fim, o capacitor C2 é instalado em paralelo à fonte CC para que seja evitado retorno de tensão CC à terra.

Nesta etapa de simulação, foi previsto apenas o comportamento do circuito no domínio do tempo. Contudo, faz-se necessária a avaliação das linhas de transmissão do

circuito, assim como do casamento de impedâncias presentes na estrutura. Esta análise é possível com simulações no domínio da frequência, abordadas no próximo item.

#### 4.2.5.2 SIMULAÇÕES DO CIRCUITO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

As simulações do circuito no domínio da frequência são consideradas para que seja avaliado o desempenho do circuito, principalmente, quanto às linhas de transmissão (LT) e o casamento de impedância.

Antes de tudo, é necessário considerar as características da PCI (apresentadas na Tabela 4.3) no ambiente de simulações, pois estas influenciam diretamente no projeto do circuito. Além disso, são considerados componentes SMD com encapsulamento 0603 (0,8 mm x 1,6 mm), sendo um deles o diodo Schottky SMS763-079 da Skyworks Solutions<sup>®</sup>, que opera em sinais de frequência de CC a 24 GHz.

Tabela 4.3 - Características da PCI considerada nas simulações.

Material dielétrico	Fibra de vidro (FR4)
Espessura do dielétrico	1,52 mm
Permissividade relativa	4,24
Material condutor	cobre
Espessura do condutor	0,035 mm

Fonte: Autoria própria.

O objetivo do dimensionamento das partes do circuito é a apresentação de adequada resposta no amplo espectro de frequências em que se apresentam as EET. Os valores de frequência considerados nesta etapa de projeto são resultantes da análise proposta na Seção 4.2.3.

As simulações no ADS<sup>®</sup> foram feitas considerando o dimensionamento do circuito em alta frequência e banda larga, divididas basicamente em três etapas, conforme a seguir.

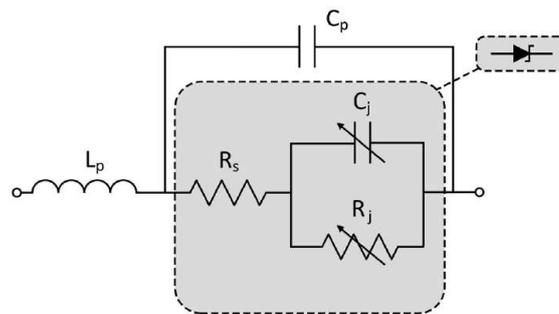
- i. Dimensionamento das linhas de transmissão do circuito com impedância equivalente a 50  $\Omega$ ;
- ii. Avaliação da impedância de entrada do diodo Schottky em função da frequência, para o dimensionamento da rede de casamento de impedância;
- iii. Avaliação da perda de retorno de sinal no circuito como um todo;

O projeto de linhas de transmissão e de rede de casamento de impedância é realizado conforme as expressões apresentadas na Seção 2.5, a qual trata de todo o equacionamento necessário. O *software* ADS<sup>®</sup> é utilizado para avaliação do comportamento do circuito no domínio da frequência, e consequentes ajustes necessários.

As linhas de transmissão foram calculadas pelas expressões apresentadas na Seção 2.5 e seus comportamentos, quanto à propagação dos sinais, foram avaliados em ferramenta específica para LT no ADS<sup>®</sup>.

O casamento de impedância com o diodo Schottky é uma etapa complexa, sendo possível com o cálculo de sua impedância de entrada. A impedância de entrada do diodo pode ser calculada com a avaliação no domínio da frequência dos parâmetros modelados de seu circuito equivalente, apresentado na Figura 4.10.

Figura 4.10 - Circuito equivalente do diodo Schottky.

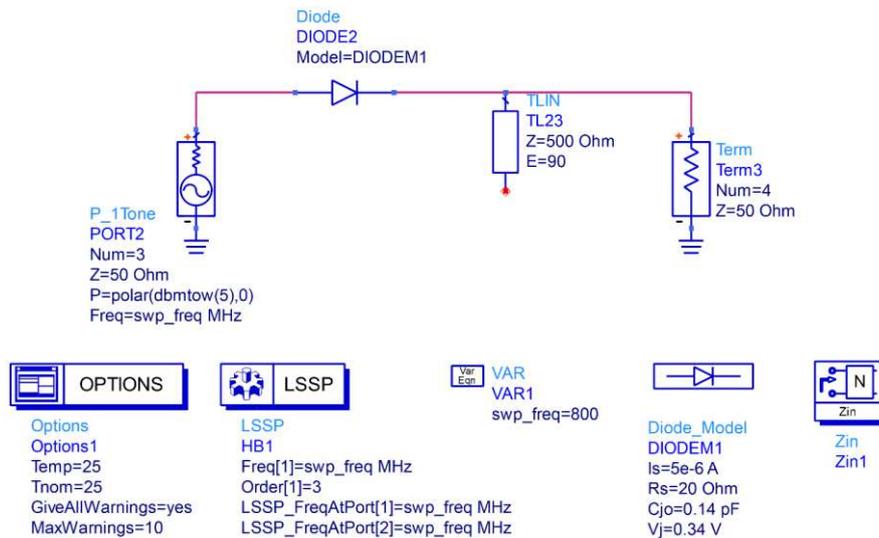


Fonte: Adaptado (VALDECASA, CIMOLI, *et al.*, 2017).

Parte dos parâmetros apresentados podem ser encontrados diretamente no documento de especificação do dispositivo (*datasheet*).  $L_p$  representa a indutância parasita e  $C_p$  a capacitância parasita da estrutura do componente,  $R_s$  a resistência em série e os demais  $C_j$  e  $G_j$  são relativos à junção do diodo, também conhecidos como parâmetros diferenciais. Estes parâmetros diferenciais dependem da frequência de aplicação e devem de ser calculados mediante análise no amplo espectro no qual são consideradas as EET.

O método de cálculo da impedância de entrada do diodo utilizado consiste na simulação de aplicação de um sinal de 5 dBm (em banda larga) ao diodo, conectado a uma carga de elevada impedância, conforme tem-se na Figura 4.11. O ambiente de cálculo considerado foi o de parâmetros S para grandes sinais (LSSP, do inglês, *Large Signals S-Parameters*), no qual é possível avaliar a perda de retorno de um sinal com potência configurável. A amplitude da impedância variável na frequência é então extraída como resultado pelo ADS<sup>®</sup>.

Figura 4.11 - Simulação de comportamento de impedância do diodo.

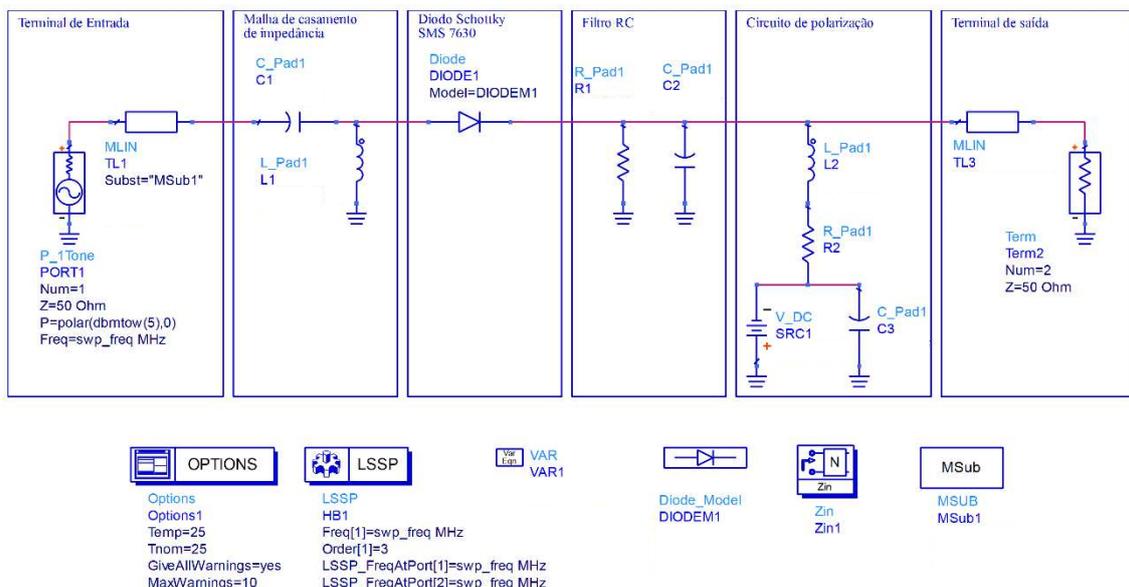


Fonte: Autoria própria.

De posse dos valores de impedância do diodo em função da frequência, calcula-se a rede de casamento de impedância do diodo, mediante aplicação de circuito LC (opção com bloqueio de nível CC), conforme tem-se na Figura 2.12.

Finalmente, com os resultados dos cálculos das LT e rede de casamento de impedância, é possível montar o circuito completo (com filtro RC, circuito de polarização e LT) para a avaliação de seu comportamento geral quanto ao  $S_{11}$ . A análise dos resultados desta etapa de simulação é dado de entrada para ajustes finos necessários ao seguimento dos critérios de projeto. O circuito completo é apresentado na Figura 4.12.

Figura 4.12 - Circuito completo para simulação no ADS®.



Fonte: autoria própria.

Em etapa seguinte, são adicionadas as porções de LT para prever as conexões metálicas entre todos os elementos do circuito. A adição das LT junto aos demais componentes do circuito influencia diretamente na resposta em frequência, uma vez que indutâncias, principalmente, são adicionadas ao circuito. Como a adição dos blocos que representam as LT torna o diagrama esquemático empregado na simulação demasiadamente grande, ele não é representado em ilustração. No entanto, ratifica-se que as porções de LT foram consideradas no ambiente simulações.

O principal critério de projeto é estabelecer ao funcionamento do circuito a menor perda de retorno possível, ou seja, transmissão mais eficiente dos sinais. Esta relação pode ser avaliada com a análise dos valores apresentados resumidamente na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Relação do módulo da perda de retorno por potência de sinal transferida.

Perda de retorno, $S_{11}$ (dB)	Potência transferida (%)
20,1	99,0
14,9	96,7
12,5	94,4
10,0	90,1
7,4	81,6
6,0	75,0
5,1	69,1
2,5	43,7
1,0	21,0

Fonte: Adaptado (SKYWORKS SOLUTIONS, 2003).

O módulo de  $S_{11}$  mínimo considerado como critério de projeto do circuito proposto é de 6,0 dB. Neste sentido, espera-se garantir uma transferência mínima de potência de sinal de pelo menos 75%. Taxas de transferência mais eficientes que esta são difíceis de serem implementadas em projetos de sinais que se apresentam em banda larga, principalmente quando a frequência inferior não é tão elevada, como o caso das EET.

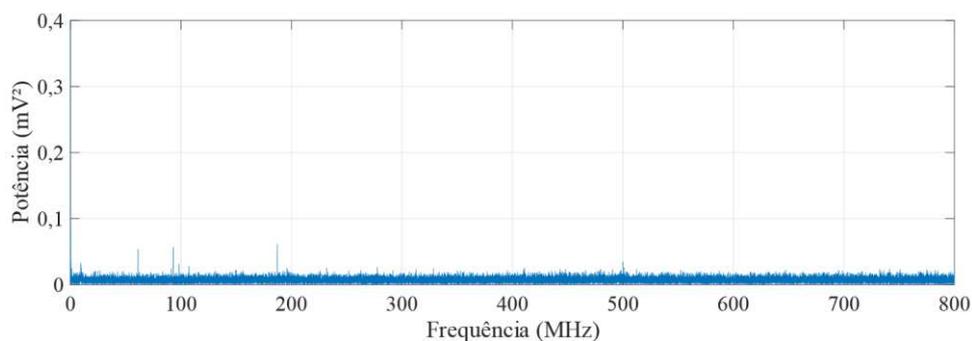
Neste capítulo foram apresentados o material utilizado na pesquisa e os métodos empregados. Os resultados deste trabalho de dissertação são finalmente apresentados e analisados no capítulo seguinte.

## 5 RESULTADOS

As análises dos resultados são apresentadas e discutidas a seguir de forma sequencial. De início, elabora-se uma análise no domínio da frequência dos sinais de arco elétrico. Logo em seguida, são apresentados os resultados extraídos dos parâmetros DA e EA. Posteriormente, tem-se a avaliação da detecção de envoltória quanto à sua confiabilidade na extração dos parâmetros. Em seguida, são discutidos os resultados de dimensionamento e simulação do circuito da técnica proposta.

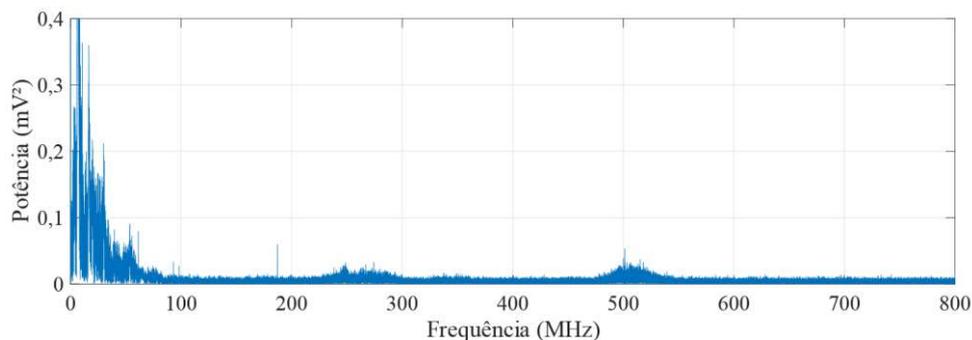
Conforme a literatura estudada e apresentada neste trabalho, as EET são caracterizadas por se apresentarem em ampla largura de banda. Isto posto, faz-se uma análise preliminar da representação no domínio da frequência dos sinais de EET adquiridos em laboratório. Na Figura 5.1, tem-se a apresentação do espectro do ruído detectado durante as medições. Em seguida, na Figura 5.2, tem-se o espectro de potência do sinal na presença do arco. A potência do sinal é representada considerando a aplicação em uma resistência de  $1 \Omega$ .

Figura 5.1 - Espectro do sinal de ruído em função da frequência.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.2 - Espectro do sinal de arco em função da frequência.



Fonte: Autoria própria.

Com a análise comparativa da Figura 5.1 e da Figura 5.2 é possível observar que existe um considerável relação sinal ruído (SNR, do inglês, *Signal Noise Ratio*), uma vez que os picos do sinal de interesse (sinal de arco) são até mais de 20 vezes maiores que os picos do sinal de ruído. A presença de potência de sinal de arco é notável, principalmente, nas frequências até aproximadamente 100 MHz, em componentes próximas a 250 MHz e a 500 MHz. Como um todo, observa-se componentes de frequência que representam o sinal de arco até aproximadamente 550 MHz.

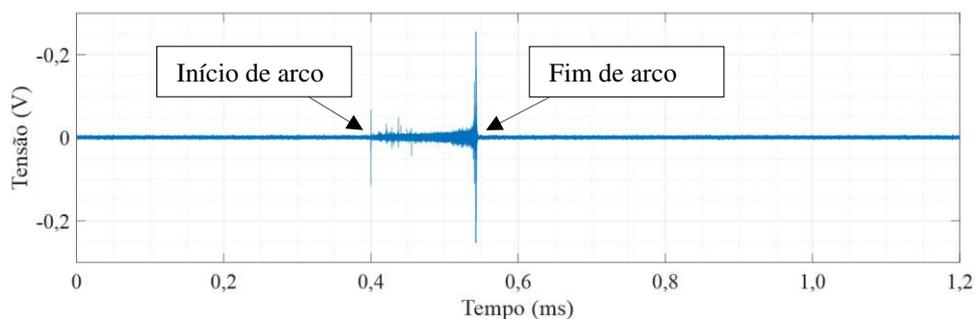
Portanto, aplicando o teorema de Nyquist, a aquisição dos sinais de arco demanda de um sistema de aquisição de dados a taxa de amostragem de pelo menos 1,1 Gaps.

A taxa de amostragem dos sinais de arco pode ser substancialmente reduzida com a detecção de envoltória. Para a implementação da técnica de detecção de envoltória, é imprescindível a análise dos parâmetros os quais a técnica deve ser capaz de extrair. Os parâmetros que devem ser extraídos com acurácia são apresentados na seção seguinte.

## 5.1 AQUISIÇÃO DOS PARÂMETROS DO ARCO ELÉTRICO

A aquisição de vinte sinais das EET do arco elétrico foi realizada utilizando-se da montagem experimental descrita em 4.2.2, que usa um sensor capacitivo acoplado à câmara de extinção do disjuntor, conectado a um osciloscópio configurado a adquirir a uma taxa de 2,5 Gaps. Em seguida, os sinais adquiridos foram processados no Matlab®. Na Figura 5.3 é apresentada uma amostra de um sinal de arco no tempo, obtido pelo uso par de contatos C1. Na figura, pode ser visto que os instantes de início e fim de arco são detectáveis.

Figura 5.3 - Sinal de arco da amostra C1.

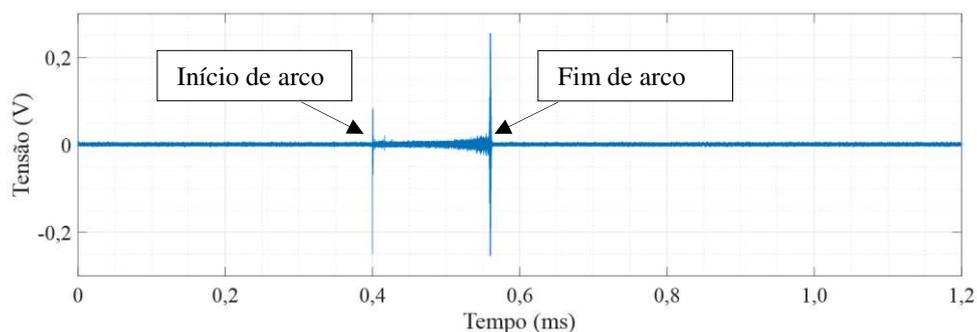


Fonte: Autoria própria.

Com a aquisição dos sinais de arco e posterior transferência para um computador de mesa, uma rotina do Matlab® executou os cálculos dos parâmetros duração de arco e energia de sinal de arco, avaliados ao fim desta seção.

Analogamente ao caso anterior, uma amostra de sinal de arco captado na abertura do par de contatos C2 é apresentada na Figura 5.4. O Contato C2 também se trata de um contato pouco degradado.

Figura 5.4 - Sinal de arco da amostra C2.

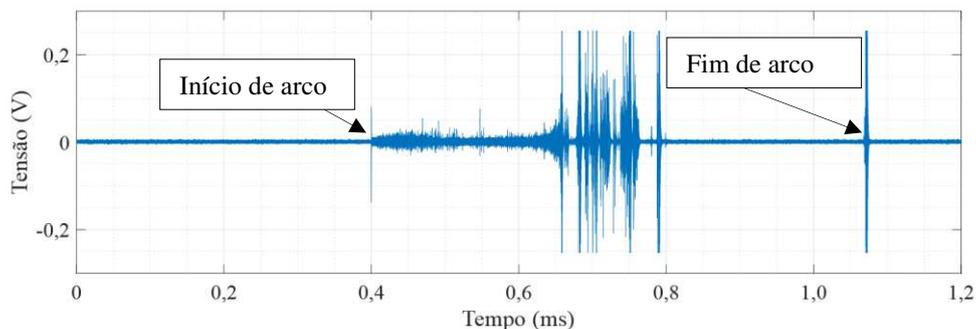


Fonte: Autoria própria.

Ao comparar visualmente os sinais das amostras C1 e C2, pode-se constatar que as presenças dos arcos ocorrem aproximadamente delimitadas entre os instantes de 0,40 ms e 0,55 ms. Dentre as medições realizadas, a duração do arco de aproximadamente 0,15 ms foi essencialmente mantida, o que demonstra que os contatos de arco pouco degradados podem apresentar valores consistentes do parâmetro de duração do arco.

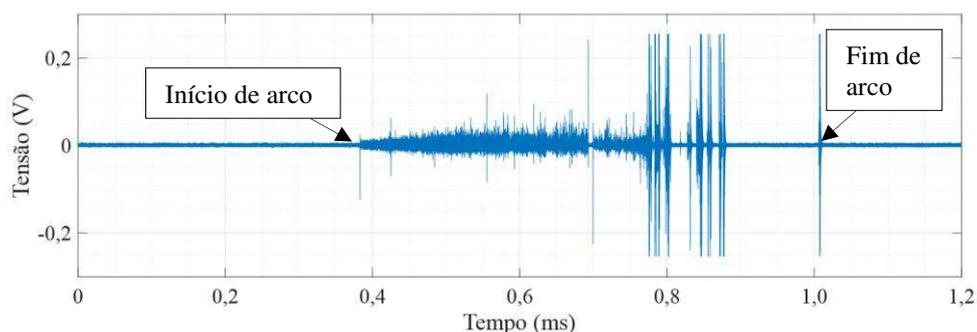
EET emitidas por contatos degradados são evidenciadas nas Figura 5.5 e Figura 5.6, respectivamente referentes às medições nos pares de contatos C3 e C4. Nas figuras, é possível identificar visualmente a diferença entre as formas de sinais para o caso de contatos menos degradados.

Figura 5.5 - Sinal de arco da amostra C3.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.6 - Sinal de arco da amostra C4.



Fonte: Autoria própria.

Em comparação ao que foi apresentado na análise dos contatos C1 e C2, os sinais adquiridos das amostras C3 e C4 apresentam evidências de maior duração do arco elétrico, com mais instantes de variação em amplitude dos valores de tensão ao longo do tempo. Além disso, a quantidade de picos do sinal com valores acima de 0,2 V é consideravelmente superior para o caso dos contatos mais degradados. A magnitude das variações em amplitude pode-se relacionar à energia dissipada pelo arco elétrico e, logo, à ineficiência de um contato em mau estado de operação. Além disso, observa-se nos sinais obtidos das amostras C3 e C4 a presença de reignições de arco, indesejáveis à correta operação do disjuntor. Tais efeitos indicam a dificuldade da câmara de extinção em extinguir rapidamente o arco elétrico. Dificuldades em extinção do arco elétrico, por sua vez, podem indicar falhas no contato de arco, no meio isolante ou no mecanismo de operação.

Com o objetivo de tornar esta análise mais objetiva e quantitativa, atributos estatísticos (média e desvio padrão) dos parâmetros de duração de arco (DA) e energia de sinal de arco (EA) são extraídos e apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Atributos estatísticos de DA e EA.

Amostras	DA ( $\mu\text{s}$ )		EA ( $\text{V}^2$ )	
	Média (MDA)	Desvio padrão ( $\sigma\text{DA}$ )	Média (MEA)	Desvio padrão ( $\sigma\text{EA}$ )
C1	189,9	28,2	154,1	79,9
C2	168,3	26,0	140,3	80,9
C3	564,2	235,4	645,0	601,9
C4	464,9	155,7	335,9	294,5

Fonte: Autoria própria

Infer-se da Tabela 5.1, que existe uma diferenciação clara entre os parâmetros DA e EA, entre os dois grupos de amostras analisados. Isto ocorre tanto para o atributo média quanto para o desvio padrão. Destaca-se ainda a importância do atributo desvio padrão,

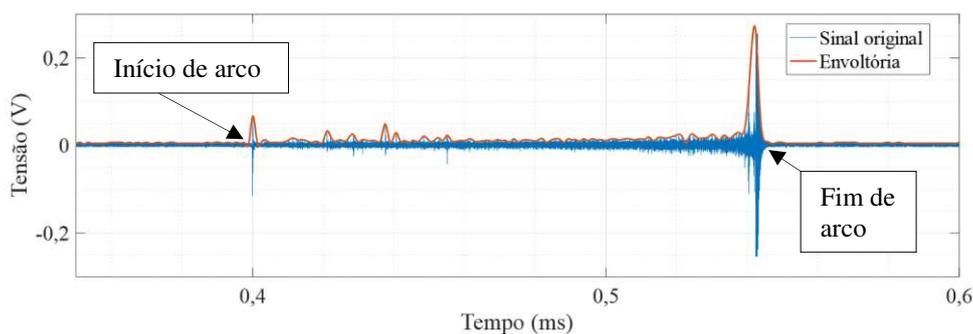
que reflete o quanto os sinais de arco são inconstantes quando se analisa contatos mais degradados (C3 e C4).

Os resultados acima demonstram a capacidade que a avaliação dos parâmetros DA e EA tem em propor um diagnóstico à degradação dos contatos. Contudo, a aquisição dos sinais que fornecem os parâmetros DA e EA apresentados na Tabela 5.1 foi realizada nesta pesquisa com uso de osciloscópio robusto e oneroso, com elevada taxa de amostragem de sinais (2,5 Gaps por canal). Como mencionado, a atual pesquisa pretende propor e avaliar uma técnica de aquisição otimizada dos sinais de arco. Pretende-se, portanto, na seção seguinte, analisar a aplicabilidade da detecção de envoltória como estratégia de redução dos requisitos de amostragem dos sinais de arco, avaliando sua confiabilidade quanto à extração dos parâmetros DA e EA.

## 5.2 ANÁLISE DA DETECÇÃO DE ENVOLTÓRIA DAS EET

Com base no que foi descrito na metodologia de teste de confiabilidade da técnica de detecção de envoltória, os sinais adquiridos pelo conjunto sensor capacitivo e osciloscópio foram utilizados para simulação, com uso da ferramenta Simulink do Matlab®. A Figura 5.7 é um exemplo de resultado do uso da detecção digital de envoltória em um sinal de arco da amostra C1 (originalmente adquirido a 2,5 Gaps), o qual resultou em uma amostragem do sinal a apenas 1 MAs.

Figura 5.7 - Sinal de arco e sua envoltória com amostragem resultante a 1 MAs.



Fonte: Autoria própria

Com a análise da Figura 5.7, é possível verificar que a detecção de envoltória é coerente para o uso em sinais de arco, uma vez que, principalmente, os picos e os instantes das EET provenientes dos momentos de ignição e extinção de arco são identificáveis. Com este resultado, espera-se que o uso da técnica possa reduzir significativamente a taxa

requerida para amostragem do sinal, possibilitando maior simplicidade nas etapas de aquisição, processamento e análise de dados de um sistema de monitoramento de disjuntores em serviço.

Para que a técnica seja de fato utilizada, faz-se necessária a análise da exatidão no cálculo dos atributos estatísticos dos parâmetros DA e EA.

A avaliação da acurácia do cálculo de duração do arco elétrico, com uso da técnica de detecção em envoltória, pode ser inferida por comparação, conforme pode-se verificar dos valores apresentados na Tabela 5.2. A incerteza do cálculo de DA a partir da envoltória foi avaliada em relação ao sinal original detectado para cada amostra de contato.

Tabela 5.2 - Incerteza do cálculo de DA das envoltórias.

Contato Analisado	MDA (original) ( $\mu$ s)	$\sigma$ DA (original) ( $\mu$ s)	Erros percentuais por taxa de amostragem (%)											
			10 MAps		5 MAps		2,5 MAps		1 MAps		250 kAps			
			MDA	$\sigma$ DA	MDA	$\sigma$ DA	MDA	$\sigma$ DA	MDA	$\sigma$ DA	MDA	$\sigma$ DA		
1	189,9	28,2	1,39	0,59	1,32	1,06	1,15	6,47	1,54	7,48	6,54	10,55		
2	168,3	26,0	0,01	0,18	0,04	0,10	1,20	0,52	2,45	0,67	5,02	3,66		
3	564,2	235,4	0,39	1,05	0,05	0,17	2,80	1,51	3,36	4,29	3,46	4,83		
4	464,9	155,7	1,74	1,45	1,92	0,67	6,72	3,22	6,42	7,77	6,01	11,28		

Fonte: Autoria própria

Verifica-se que não foram registrados erros significativos no cálculo dos atributos de DA para as envoltórias que resultam em taxas igual ou superior a 5 MAps. Este resultado é devido à capacidade da técnica em identificar os instantes de pico do sinal original. No entanto, envoltórias demasiadamente suaves, que resultam em taxas de amostragem inferiores a 2,5 MAps, perdem a acurácia na determinação do parâmetro DA.

Analogamente, as envoltórias resultantes da detecção digital foram utilizadas para análise da incerteza de cálculo dos atributos estatísticos do parâmetro EA. Os erros percentuais no cálculo dos atributos são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Incerteza do cálculo de EA das envoltórias.

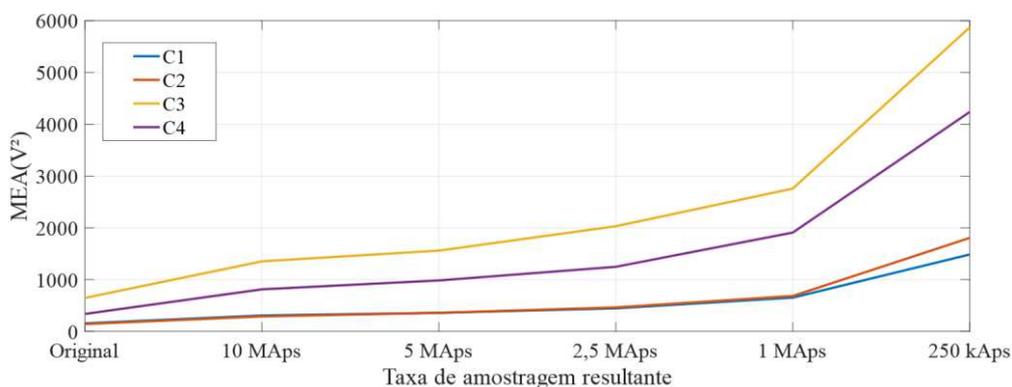
Contato Analisado	MEA (original) (V <sup>2</sup> )	$\sigma$ EA (original) (V <sup>2</sup> )	Erros percentuais por taxa de amostragem (%)											
			10 MAps		5 MAps		2,5 MAps		1 MAps		250 kAps			
			MEA	$\sigma$ EA	MEA	$\sigma$ EA	MEA	$\sigma$ EA	MEA	$\sigma$ EA	MEA	$\sigma$ EA		
1	154,1	79,9	98	62,5	>100	86,3	>100	>100	>100	>100	>100	>100		
2	140,3	80,9	>100	77,3	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100		
3	645,0	601,9	>100	87,2	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100		
4	335,9	294,5	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100		

Fonte: Autoria própria

Com a análise da Tabela 5.3, é possível verificar que as envoltórias são nitidamente ineficazes quanto à exatidão do cálculo do parâmetro EA. Contudo, os resultados apresentados no cálculo de EA eram esperados, uma vez que a detecção de envoltória não é técnica indicada para cálculo exato de energia de sinais discretos, quando comparado com o sinal original. Isto ocorre porque, como a envoltória representa um sinal que interliga os picos do sinal original, os pontos nulos e mínimos do sinal original são desprezados.

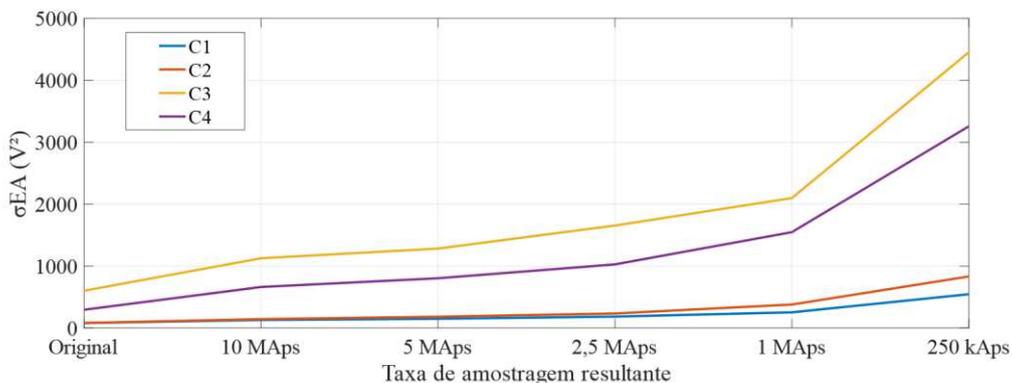
No entanto, conforme destacado na análise da Figura 5.7, existe uma correspondência direta entre a magnitude do sinal original e sua envoltória, o que propõe também uma correspondência no cálculo de EA. Esta correspondência pode ser observada com a análise das Figura 5.8 e Figura 5.9, nas quais tem-se os atributos MEA e  $\sigma_{EA}$ , respectivamente, de cada um dos quatro contatos avaliados, representados em função das envoltórias resultantes e dos sinais originais.

Figura 5.8 - MEA de cada contato por tipo de sinal.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.9 -  $\sigma_{EA}$  de cada contato por tipo de sinal.



Fonte: Autoria própria.

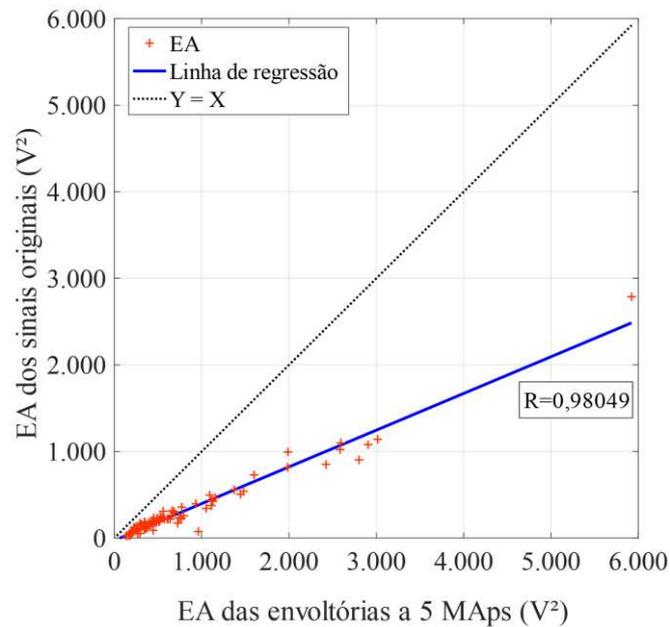
Com a análise das Figura 5.8 e Figura 5.9, é possível identificar que a diferenciação dos valores dos atributos de EA é mantida entre as diferentes envoltórias simuladas. As amostras C1 e C2 continuam a apresentar menores valores de MEA e  $\sigma_{EA}$ , em comparação ao que se tem dos contatos C3 e C4. Compreende-se, portanto, que os atributos estatísticos do parâmetro EA, extraídos das envoltórias do sinal de arco, podem ser utilizados para a avaliação do estado de degradação dos contatos, embora não representem integralmente os valores resultantes do sinal original.

Diante do exposto, tem-se que as envoltórias simuladas apresentam proporção no cálculo de EA. No entanto, tem-se que, quanto menor a taxa de amostragem resultante, mais a proporção entre os contatos diverge, como observado nos resultados de EA entre as envoltórias de 1 MAsps e 250 kAsps. Neste sentido, existe uma relação de compromisso na qual, quanto menor a taxa de amostragem resultante, mais simples pode ser o sistema de aquisição de dados necessário. Em contrapartida, quanto menor a taxa de amostragem, maior a dificuldade de calibração do sistema para o cálculo do parâmetro EA.

Adicionalmente, tem-se com a análise do parâmetro DA, evidenciada na Tabela 5.2, que envoltórias com amostragem inferior a 5 MAsps são imprecisas. Neste contexto, dentre as envoltórias avaliadas, aquela que resulta a uma taxa de 5 MAsps possui a menor taxa de amostragem admissível, ao considerar menores erros no cálculo de DA (menores que 2%) e adequada correspondência para o cálculo dos atributos de EA.

A existência ou não de correspondência entre sinais distintos, quanto ao cálculo de determinado parâmetro, pode ser analisada com o estudo de correlação. Para tanto, tem-se na Figura 5.10 o gráfico de dispersão dos valores de EA, com a estimação da correlação e da regressão linear, entre o sinal original e a envoltória de 5 MAsps. O estudo de correlação é feito utilizando-se do coeficiente de correlação de Pearson  $R$ . Nesta avaliação, foram considerados todos os valores de EA, calculados para as vinte medições de cada um dos quatro pares de contatos.

Figura 5.10 - Análise de correlação e regressão linear de MEA da envoltória 5 MAps.



Fonte: Autoria própria.

É possível verificar com a análise da Figura 5.10 que existe uma relação linear entre os sinais originalmente medidos e suas envoltórias simuladas, quanto ao cálculo de EA. A correlação entre as variáveis é comprovada pelo alto valor do coeficiente  $R$ , que resulta em uma correlação muito forte (0,98).

Quanto à regressão linear, o objetivo principal de estudá-la é estabelecer uma relação entre a variável de entrada (EA da envoltória) e a energia do sinal propriamente dita (EA do sinal original). Considerando esta relação como um modelo de regressão linear simples entre as variáveis resposta e regressora, é possível estabelecer a expressão 5-1.

$$EA_0 = m(EA_{env}) + b \quad 5-1$$

Na expressão 5-1,  $EA_0$  é a variável que representa o valor real de EA (do sinal original),  $EA_{env}$  é dado como o valor de EA calculado pela envoltória, e  $m$  e  $b$  são, respectivamente, os coeficientes angular e linear da reta destacada em azul, do gráfico da Figura 5.10. Os valores de  $m$  e  $b$  foram calculados no *software* Matlab® e são apresentados na expressão 5-2, sendo esta a expressão resultante para a estimação do parâmetro EA a partir da envoltória do sinal de arco (escolhendo a envoltória de 5 MAps como ótima).

$$EA_0 = 0,4241(EA_{env}) - 26,2049 \quad 5-2$$

O grau de incerteza do uso da expressão 5-2 na estimação dos atributos de EA pode ser avaliada a partir dos erros de cálculo para MEA e  $\sigma$ EA, presentes na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Incerteza no cálculo dos atributos de EA com regressão linear.

Contato Analisado	MEA (original) (V <sup>2</sup> )	$\sigma$ EA (original) (V <sup>2</sup> )	MEA (envoltória) (V <sup>2</sup> )	$\sigma$ EA (envoltória) (V <sup>2</sup> )	Erros em relação à envoltória (%)	
					MEA	$\sigma$ EA
1	154,1	79,9	135,6	71,3	12,0	10,8
2	140,3	80,9	124,9	77,4	10,9	4,2
3	645,0	601,9	634,9	544,0	1,6	9,6
4	335,9	294,5	390,4	340,6	16,2	15,6

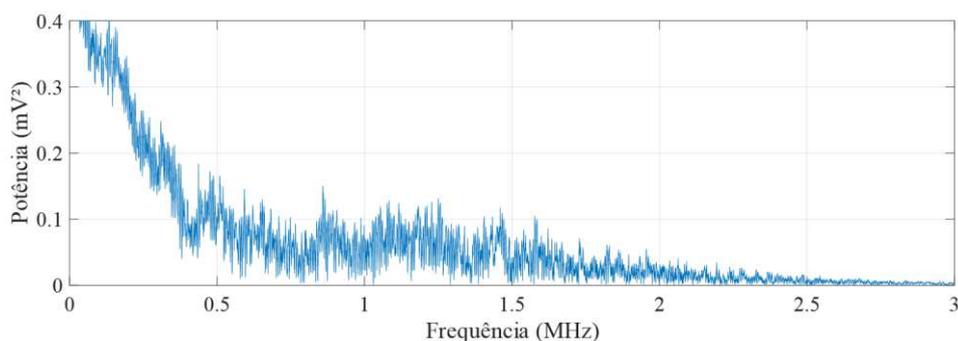
Fonte: Autoria própria.

Com a análise da Tabela 5.4, é possível verificar que a técnica de envoltória se torna eficiente na estimação dos parâmetros EA, desde que respeitado o seu modelo de regressão linear. Muito embora haja erros percentuais maiores que 10%, os valores dos atributos MEA e  $\sigma$ EA continuam mantendo-se consideravelmente distintos. Ou seja, a diferenciação dos atributos de EA entre contatos mais degradados (C3 e C4) e menos degradados (C1 e C2) é mantida. Em um viés de ordem prática, os coeficientes da expressão 5-1 podem ser determinados em processo de calibração do sistema de detecção e aquisição como um todo.

Em consonância com o que foi apresentado, a envoltória a 5 MAs é escolhida para o dimensionamento do projeto de detecção de envoltória proposto neste trabalho. Uma vez que seja parte do projeto do circuito detector de envoltória o filtro passa-baixas, para filtragem das componentes RF remanescentes do processo de retificação, faz-se necessária uma análise do espectro de frequência da envoltória selecionada.

Na Figura 5.11, é apresentado o espectro de potência da envoltória a 5 MAs de um sinal de arco adquirido na análise da amostra C1.

Figura 5.11 - Espectro de potência em função da frequência da envoltória a 5 MAs.



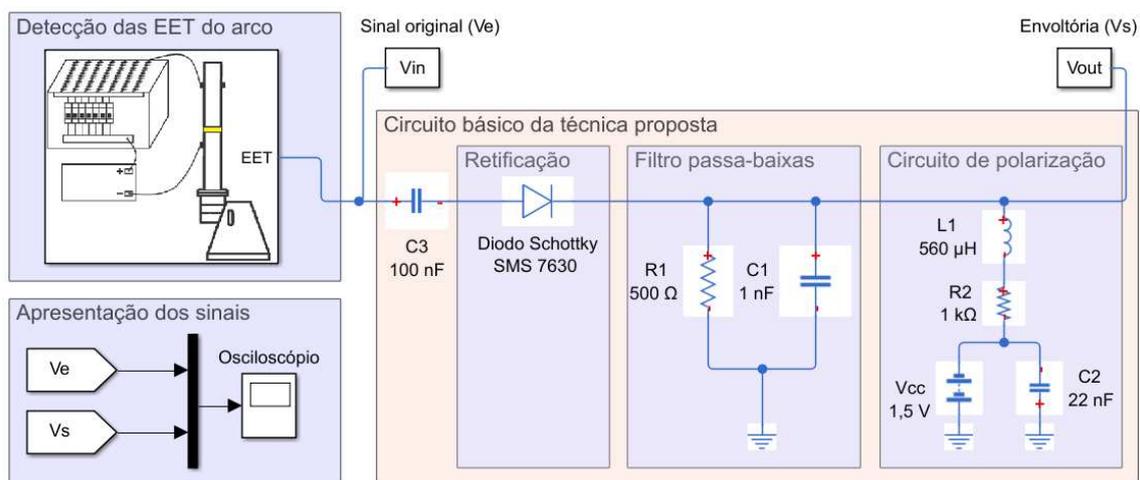
Fonte: Autoria própria.

Ao observar a Figura 5.11, é possível identificar que existe potência de sinal de interesse até valores próximos a 2 MHz. Portanto, a frequência de 2 MHz será considerada como a frequência de corte do filtro passa-baixas do circuito detector de envoltória. Por sua vez, a frequência de corte do filtro implica diretamente no cálculo dos componentes do circuito, que devem ser especificados segundo análises no domínio do tempo e da frequência.

### 5.3 DIMENSIONAMENTO E AVALIAÇÃO DO CIRCUITO NO DOMÍNIO DO TEMPO

Com a análise apresentada nas seções anteriores deste capítulo, foi possível o dimensionamento dos componentes do circuito apresentado na Figura 4.9, uma vez que os critérios dos sinais de entrada e saída do circuito detector de envoltória foram avaliados. Neste sentido, apresenta-se na Figura 5.12, o diagrama de simulação no Simulink® do circuito no domínio do tempo com os devidos valores e especificações de cada componente.

Figura 5.12 - Diagrama de simulação do circuito no domínio do tempo.



Fonte: Autoria própria.

O capacitor  $C3$  foi dimensionado para o bloqueio CC, atuando como um filtro passa-altas. Este filtro apresenta frequência de corte inferior à do sensor capacitivo utilizado, que por sua vez, funciona como um passa-altas a aproximadamente 15 MHz,

conforme Tabela 4.2. Neste sentido, todo o sinal de entrada é preservado para a etapa de retificação, evitando que nível CC seja propagado ao sistema de medição.

O diodo Schottky selecionado possui alta velocidade de comutação, apresentando desempenho garantido pelo fornecedor de 0 a 24 GHz, portanto, o sinal de arco pode ser completamente retificado com alto rendimento.

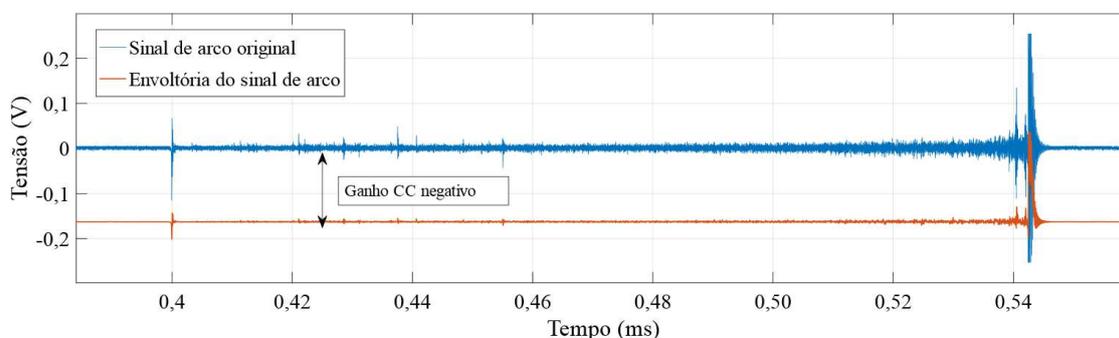
A filtragem do sinal de arco retificado é realizada com o circuito RC, conforme sua constante de tempo. A constante de tempo é determinada como o inverso da frequência de corte desejada pelo circuito, sendo esta frequência avaliada na seção anterior como 2 MHz. De posse da constante de tempo, calcula-se R1 e C1.

Em última etapa do circuito detector de envoltória, tem-se o circuito polarizador de nível CC. A fonte CC foi determinada para ter um nível de tensão contínua de 1,5 V, e a corrente do circuito polarizador foi dimensionada com a aplicação do resistor R2 de 1,0 k $\Omega$ . Esta corrente foi calculada para apresentar um valor de 1,5 mA, respeitando os critérios de corrente máxima do diodo selecionado.

O indutor L1 foi dimensionado para apresentar o mínimo de frequência de corte do filtro passa-baixas, garantindo que o mínimo de potência do sinal de envoltória seja desperdiçado no circuito polarizador. Por fim, em paralelo à fonte CC, o capacitor C2 garante que não haja retorno de sinal à terra.

O diagrama exposto na Figura 5.12 foi então utilizado para a simulação da detecção de envoltória, com seus devidos componentes especificados. O sinal de entrada do circuito foi o sinal de arco original de uma das medições feitas para a amostra de contatos C1. Isto feito, tem-se o sinal de arco original e a sua envoltória, resultado do circuito simulado no domínio do tempo, apresentados na Figura 5.13.

Figura 5.13 - Sinal de arco e sua envoltória resultante.



Fonte: Autoria própria.

Com a análise da Figura 5.13, é observado que foi possível realizar a detecção da envoltória (em cor laranja) do sinal de arco original (em cor azul). No entanto, constata-se que a envoltória resultante possui um ganho de tensão negativo, em relação ao sinal original. Este ganho de sinal negativo é consequência da aplicação do circuito de polarização e é indesejável na etapa de processamento de dados. Contudo, este efeito pode ser suprimido após a aquisição do sinal, pelo próprio *software* integrado ao processamento de sinais do sistema eletrônico de diagnóstico de disjuntores.

Com a análise realizada nesta seção foi possível avaliar o desempenho e aplicabilidade do circuito no domínio do tempo. Adiante, na seção seguinte, pretende-se avaliar o comportamento das partes do circuito no domínio da frequência, respeitando, principalmente, os critérios de reflexão de onda e casamento de impedância.

## 5.4 DIMENSIONAMENTO E AVALIAÇÃO DO CIRCUITO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

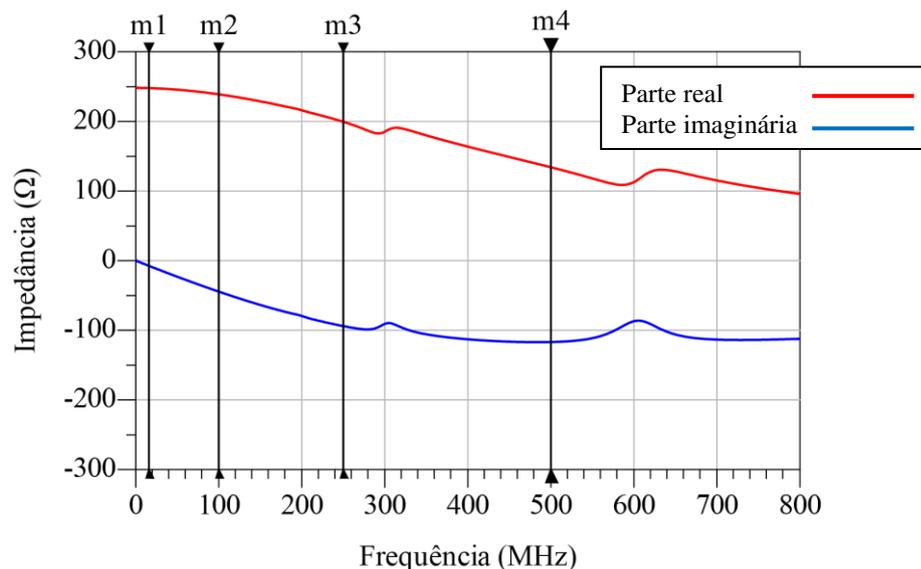
Como abordado nos métodos apresentados para o dimensionamento e avaliação do circuito no domínio da frequência, foi utilizado o ADS<sup>®</sup>. A primeira etapa de dimensionamento consistiu na especificação do espectro de frequências considerado, sendo este de 0 a 600 MHz, tomando como base o que foi exposto na análise feita no início deste capítulo.

Em seguida, procedeu-se como projeto das LT do circuito, especificadas para apresentarem uma impedância característica de 50  $\Omega$ . Com base no que foi apresentado nas expressões 2-1 a 2-4 e Tabela 4.3, as LT do circuito detector de envoltória, em PCI, foram dimensionadas para apresentarem uma largura da linha de microfita equivalente a 2,92 mm.

De posse da especificação da LT, foi utilizado o diagrama de circuito apresentado na Figura 4.11 para cálculo da impedância de entrada do diodo Schottky SMS7630-079. Os parâmetros não diferenciais do diodo foram consultados em seu *datasheet* e inseridos no ambiente de simulação. A simulação do comportamento da impedância de entrada do diodo foi realizada considerando como entrada um sinal em amplo espectro de frequências (de 0 a 800 MHz).

Os valores das partes real e imaginária da impedância de entrada do diodo em função da frequência podem ser observados na Figura 5.14.

Figura 5.14 - Gráfico da impedância de entrada do diodo em função da frequência.



Fonte: Autoria própria.

Os valores de frequência demarcados pelos marcadores  $m1$ ,  $m2$ ,  $m3$  e  $m4$  representam, essencialmente, os valores das componentes de frequência que possuem maior potência de sinal, de acordo com a análise do início deste capítulo. O marcador  $m1$  está localizado na frequência de 16 MHz, a qual representa a frequência de corte aproximada do sensor capacitivo utilizado como meio de detecção dos sinais de arco. Portanto, o valor de frequência em  $m1$  é considerado como a frequência inicial no projeto do circuito detector em banda larga. A frequência superior considerada é de 600 MHz, valor ligeiramente superior à frequência de 500 MHz, demarcada por  $m4$ .

Para cada um dos marcadores considerados, tem-se os seguintes valores de impedância em função da frequência, apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Valores de Impedância de entrada do diodo em função da frequência.

Marcadores	Frequência (MHz)	Parte real ( $\Omega$ )	Parte imaginária ( $\Omega$ )
m1	16	247,8	-7,6
m2	100	238,8	-44,5
m3	250	199,4	-94,0
m4	500	134,1	-116,9

Fonte: Autoria própria.

Os valores de impedância apresentados por cada um dos marcadores foram considerados para o dimensionamento de diferentes redes de casamento de impedância. O cálculo da rede de casamento de impedância LC foi realizado conforme as expressões apresentadas na Seção 2.5.2. É importante destacar que o tipo de rede de casamento LC

adotado é do tipo passa-altas, para que haja o devido bloqueio de nível CC. Os resultados preliminares dos componentes da rede de casamento, considerando os valores de cada um dos marcadores, estão evidenciados na Tabela 5.6.

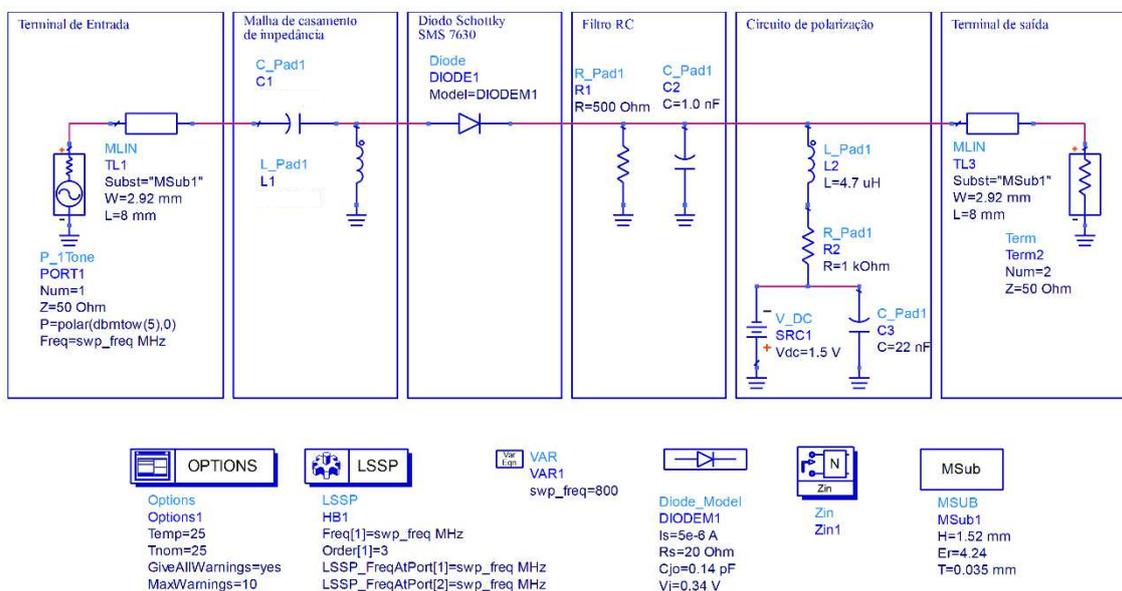
Tabela 5.6 - Valores dos componentes da rede de casamento do diodo.

Rede de casamento	Frequência (MHz)	Valores calculados		Valores comerciais	
		C (pF)	L (nH)	C1 (pF)	L1 (nH)
LC1	16	100	1.220	100	1.200
LC2	100	16	181	16	180
LC3	250	6,47	63,6	6,2	62
LC4	500	3,31	26,8	3,3	27

Fonte: Autoria própria.

De posse dos valores das linhas de transmissão, dos componentes da rede de casamento (para as quatro possibilidades), do circuito de polarização, do diodo e do filtro RC, procedeu-se com a simulação do circuito como um todo, conforme diagrama apresentado na Figura 5.15. Nesta etapa, foram simuladas quatro situações, utilizando de cada um dos valores comerciais dos componentes da rede de casamento do diodo, presentes da Tabela 5.6.

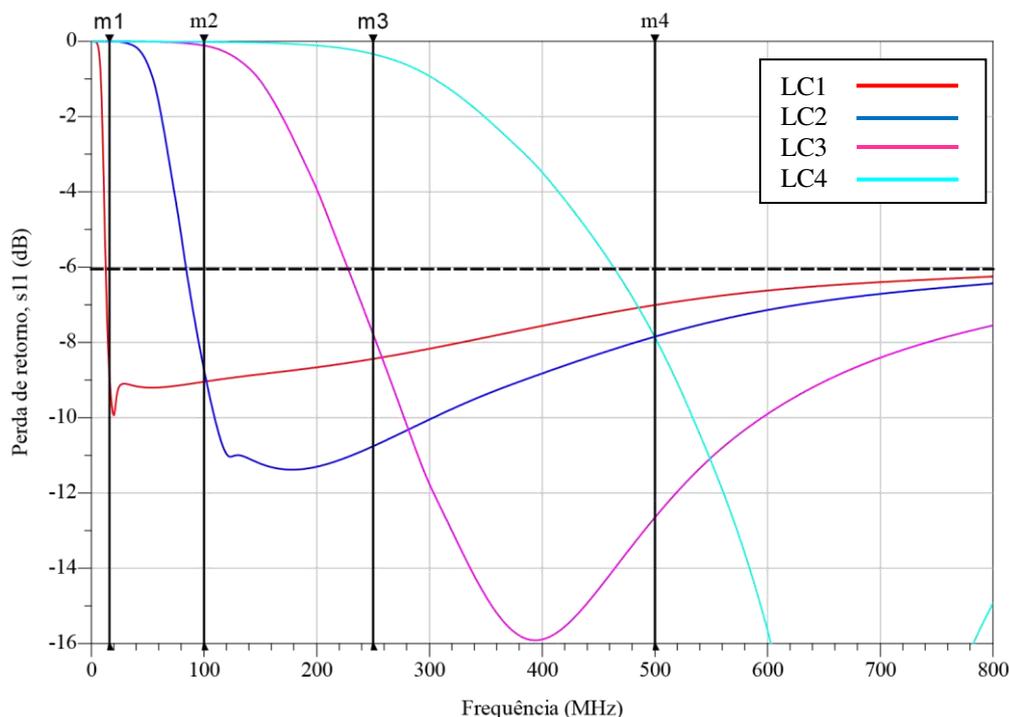
Figura 5.15 - Diagrama do circuito detector resultante.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados da análise do circuito com o devido casamento de impedância do diodo são observados com a análise da Figura 5.16, na qual tem-se o coeficiente de perda de retorno de sinal,  $S_{11}$ , em função da frequência, para as quatro situações propostas.

Figura 5.16 - Perda de retorno do sinal em função da frequência.



Fonte: Autoria própria.

A análise dos resultados apresentados na Figura 5.16 deve ser feita com a observação do que foi apresentado na Tabela 4.4, na qual estão contidas as relações entre perda de retorno de sinal e taxa de transferência de potência.

Conforme apresentado na Tabela 4.4, uma perda de retorno equivalente a  $-6,0$  dB indica transferência de potência de sinal de pelo menos  $75\%$  entre os terminais de entrada e saída do circuito. O valor de  $-6,0$  dB é estipulado como requisito mínimo neste projeto.

A aplicação da rede de casamento LC2 proporciona efetiva transferência de potência em sua frequência de operação (100 MHz), atingindo valores de  $S_{11}$  menores que  $-10$  dB entre as frequências de 110 e 303 MHz. Isto corresponde a uma transferência de potência equivalente a cerca de  $90\%$ , no entanto, o requisito mínimo de  $-6,0$  dB é apenas alcançado em valores de frequência superiores a 84 MHz.

Embora as redes de casamento LC3 e LC4 apresentem valores ótimos para elevados valores de frequência, registrando valores de reflexão de sinal inferiores a  $1\%$ , elas tornam-se correspondentemente inviáveis para a aplicação em frequências menores.

Portanto, é possível observar na Figura 5.16 que o requisito mínimo estipulado neste trabalho, para  $-6,0$  dB, é apenas logrado com a aplicação da rede de casamento LC1, tomando como referência a largura de banda de 16 a 600 MHz.

Com os resultados obtidos e apresentados neste capítulo, é possível afirmar que a detecção de envoltória é condizente com os objetivos estipulados, os quais resumem-se essencialmente em desenvolver uma técnica de detecção otimizada dos sinais de arco, com significativa redução dos requisitos de aquisição e conversão AD.

A correspondência entre as análises dos resultados obtidos e objetivos propostos nesta dissertação é apresentada no capítulo seguinte como conclusões do trabalho de dissertação.



## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, uma análise da aplicabilidade e o desenvolvimento de uma técnica de detecção otimizada das EET do arco elétrico foi feita. As EET do arco elétrico analisadas são provenientes do processo de abertura de um disjuntor de média tensão. Os sinais de arco foram adquiridos por meio de um sensor de acoplamento capacitivo em conjunto com um osciloscópio com taxa de amostragem de 2,5 GAsps por canal.

Com a análise dos sinais de arco adquiridos nos ensaios, foi possível constatar que as EET do arco elétrico, detectáveis com sensor de acoplamento capacitivo, se apresentam em espectro de radiofrequência, estendendo-se a componentes de frequência superiores a 550 MHz. De acordo com a revisão literária realizada, foi possível compreender que a aquisição de sinais em elevada frequência demanda o uso de sistemas de aquisição, transmissão e processamento de dados robustos e de elevado custo associado. Neste sentido, constatou-se que uma técnica de detecção otimizada dos sinais de arco seria necessária, devendo ser capaz de prover a redução dos esforços de amostragem dos sinais quanto à extração de parâmetros avaliativos dos sinais de arco.

A extração dos parâmetros avaliativos duração do arco elétrico (DA) e energia do sinal de arco (EA) foi possível a partir de sinais de arco adquiridos em laboratório. Com a análise dos parâmetros DA e EA, verificou-se que é possível avaliar o nível de degradação de contatos de arco de disjuntores de alta tensão. Finalmente, foi observado que os parâmetros DA e EA podem ser extraídos dos sinais de arco sem que seja necessária a aquisição completa dos sinais de arco, mediante aplicação da detecção de envoltória. A detecção de envoltória foi apresentada como capaz de fornecer a amplitude variável dos sinais de arco, mantendo os valores dos picos do sinal com seus instantes correspondentes.

Portanto, o presente trabalho avaliou e comprovou a aplicabilidade da detecção de envoltória como eficaz na aquisição otimizada dos parâmetros de monitoramento (DA e EA) de disjuntores de alta tensão. Conclui-se que, com a aplicação da detecção de envoltória, os parâmetros duração do arco elétrico e energia do sinal de arco podem ser adquiridos dos sinais de arco com significativa redução da taxa de aquisição necessária para a representação digital dos sinais.

Adicionalmente, foi possível observar que o desenvolvimento da técnica de detecção se apresenta como uma solução viável e de custo reduzido. Para tanto, uma

metodologia de desenvolvimento do circuito eletrônico que emprega a técnica de detecção de envoltória foi estabelecida e avaliada, mediante simulações no domínio do tempo e da frequência.

## TRABALHOS FUTUROS

A técnica de detecção de envoltória do sinal do arco elétrico foi estabelecida como viável para a aquisição de parâmetros avaliativos de disjuntores de alta tensão. O circuito de detecção de envoltória permite a um futuro dispositivo de processamento de sinais, do sistema de monitoramento de disjuntores, a aquisição em menores taxas. Neste sentido, trabalhos futuros podem ser desenvolvidos, sendo estes elencados a seguir.

- Avaliação da aplicabilidade do circuito detector de envoltória, adicionando às análises sinais de arco produzidos em diferentes tipos de disjuntores, sob diferentes condições de criação do arco elétrico, incluindo ensaios em campo;
- Análise do desempenho da técnica de detecção otimizada em diferentes topologias de sensores, como antenas patch, às quais o circuito detector de envoltória pode ser integrado à própria estrutura da antena.
- Desenvolvimento de sistema eletrônico microprocessado para o processamento de sinais e cálculo em tempo real dos parâmetros de diagnóstico de disjuntores de alta tensão, compatível com o monitoramento de disjuntores em serviço;
- Desenvolvimento e avaliação de plataforma integrada com banco de dados gerenciável por funcionários de subestações que avalie a degradação acumulada ao longo do tempo entre os componentes do disjuntor;

## PUBLICAÇÕES

Durante o desenvolvimento do mestrado, o autor deste trabalho publicou artigos em congressos nacionais e internacionais. Ademais, até a data de defesa desta dissertação de mestrado, alguns artigos se encontram apenas com o aceite.

Em primeira ocasião, estão descritos os artigos publicados relacionados com o tema principal.

- i. **SOUSA, HERBET**; OLIVEIRA, ADRIANO; SANTANA, HENRIQUE; ARAUJO, JALBERTH; COSTA, EDSON; FERREIRA, TARSO. Sensitivity analysis of dynamic resistance measurement attributes of high voltage circuit breakers. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). Niterói, 2018.
- ii. SANTANA, H. N.; COSTA, E. G.; OLIVEIRA, A. C.; **SOUSA, H. F. S.**; FERREIRA, T. V. Capacitive Coupling Sensor Application for Monitoring and Diagnosis of High Voltage Circuit Breakers. 20th International Symposium on High Voltage Engineering. Buenos Aires, 2017.
- iii. **SOUSA, HERBET**; OLIVEIRA, ADRIANO; SANTANA, HENRIQUE; COSTA, EDSON; FERREIRA, TARSO. Analysis of Alternative Parameters of Dynamic Resistance Measurement in High Voltage Circuit Breakers. International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2018). Athens, 2018;
- iv. SANTANA, HENRIQUE; **SOUSA, HERBET**; OLIVEIRA, ADRIANO; COSTA, EDSON; FERREIRA, TARSO. Metodologia para Obtenção da Curva de Deslocamento de Contato em Disjuntores de Alta Tensão. Congresso Brasileiro de Automática. João Pessoa, 2018;
- v. SILVA, HUGERLES; QUEIROZ, WAMBERTO; ALMEIDA, DANILO; **SOUSA, HERBET**; XAVIER, GEORGE. Estimativa dos Parâmetros do Ruído Impulsivo Gerado Laboratorialmente Utilizando o Método dos Momentos. Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais. Campina Grande, 2018.

Em seguida, tem-se os artigos publicados relacionados com a área de concentração do mestrado – processamento de energia.

- vi. SILVA, JOAO MARCELO; COSTA, EDSON; GONCALVES, MARCONNI; SOUZA, RONIMACK; BRITO, VALDEMIR; **SOUSA, HERBET**. Experimental evaluation of the transient behavior of a 3-rod grounded system under current impulse. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). Niterói, 2018;
- vii. SANTOS, ALANA; ALVES, LIDJA; **SOUSA, HERBET**; OLIVEIRA NETO, ANTÔNIO; LUCIANO, BENEDITO. Análise Energética dos Resíduos Orgânicos Provenientes do Restaurante Universitário da Universidade Federal de Campina Grande. 8th International Symposium on Residue Management in Universities. Campina Grande, 2017;
- viii. XAVIER, GEORGE.; COSTA, EDSON; **SOUSA, HERBET**; DIAS, RAMON; FERREIRA, REGELI; ALVES, LIDJA. Dielectric Characteristics Comparison of Insulating Babaçu's Vegetable Oil and Transformers Mineral Oil. 20th International Symposium on High Voltage Engineering. Buenos Aires, 2017;
- ix. XAVIER, GEORGE; COSTA, EDSON; ANDRADE, ARTHUR; **SOUSA, HERBET**; DINIZ, LARISSA. The Finite Element Method Applied to the Teaching of High Voltage Techniques. IEEE PES T&D Latin America. Lima, 2018;
- x. XAVIER, GEORGE; COSTA, EDSON; SERRES, ALEXANDRE; **SOUSA, HERBET**; OLIVEIRA, ADRIANO; NÓBREGA, LUIZ. Design and Application of an UHF Microstrip Circular Antenna for Partial Discharges Detection in Power Transformers. International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2018). Athens, 2018.

## 7 REFERÊNCIAS

ALAA, A. M. Frequency Domain Analysis of Envelope Detectors for AM (DSB-LC) Signals. **IEEE Potentials**, p. 40-43, Março/Abril 2013. ISSN 0278-6648.

ALENCAR, M. S. **Sistemas de Comunicações**. 1ª. ed. [S.l.]: ERICA, 2001.

ARI, N.; BLUMER, W. Transient Electromagnetic Fields Due to Switching Operations in Electric Power Systems. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. XXIX, n. 3, p. 233-237, Agosto 1987. ISSN 0018-9375.

BAGHERPOOR, A. et al. Online Condition Assessment of Interruption Chamber of Gas Circuit Breakers Using Arc. **Transactions on Power Delivery**, 2 Agosto 2016. 1776 - 1783.

BARTLETT, E. J.; MOORE, P. J. Analysis of Power System Transient Induced Radiation for Substation Plant Condition Monitoring. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 148, n. 2, p. 215-221, Maio 2001.

BARTLETT, E. J.; VAUGHAN, M.; MOORE, P. J. **Infestigations into Electromagnetic Emissions from Power System Arcs**. International Conference and Exhibition on Electromagnetic Compatibility. York: IEEE. 1999. p. 47-52.

BAUDART, C. **User Guide for the Application of Monitoring and Diagnostic Techniques for Switching Equipment for Rated Voltages of 72.5 KV and Above**. CIGRE - Technical Brochure 167. [S.l.], p. 160. 2000.

BHEL. **Handbook of Switchgears**. 1ª. ed. New York: McGraw-Hill Handbooks, v. I, 2006. 624 p.

CARVALHO, A. C. C. et al. **Disjuntores e Chaves - Aplicações em Sistemas de Potência**. Niterói: EDUFF, v. I, 1995. 365 p.

CHAPMAN, M. **Radio-frequency Based Determination of Arcing Duration in HVAC Circuit Breakers**. CIRED - 18th International Conference on Electricity Distribution. Turin: [s.n.]. 2005.

CHAPMAN, M. A. **Possibilities and Limitations of Radio-frequency Measurement of Arc Duration HVAC Circuit Breakers**. ETH Zurich. Zurich, p. 185. 2011.

CIMOLI, B. et al. **An Ultra-Wideband Schottky Diode Based Envelope Detector for 2.5 Gbps Signals**. 46th European Microwave Conference. Londres: IEEE. 2016. p. 277-280.

COLLIN, R. E. **Foundation for microwave engineering**. 2ª. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1992.

COWLES, J. C. **The Evolution of Integrated RF Power Measurement and Control**. XII Mediterranean Electrotechnical Conference. Dubrovnik: IEEE. 2004. p. 131-134.

FLURSCHEIM, C. H. **Power Circuit Breaker Theory and Design**. London: Institution of Engineering and Technology, 1982. 628 p.

FRONTIN, S. O. **Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. 1ª. ed. Brasília: Goya, v. I, 2013. 934 p.

FUJIE, S.; ZHANGQI, W.; HONGSAN, Q. **Diagnosis Techniques on Contact Electrical Endurance of High Voltage Circuit Breakers**. International Conference On Power System Technology Proceedings. Beijing: IEEE. 1998. p. 105-109.

GARZON, R. D. **High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications**. New York: CRC Press, 2002. 460 p.

GILL, P. **Electrical Power Equipment Maintenance and Testing**. 2ª. ed. New York: CRC Press, 2008.

HADDAD, M.; WARNE, D. F. **IET Power and Energy Series: Advances in High Voltage Engineering**. 2ª. ed. London: The Institution of Engineering and Technology, v. XXXX, 2007.

HAYKIN, S. **Communication Systems**. 4ª. ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2001.

HÖIDALEN, H. K.; RUNDE, M. **Continuous Monitoring of Circuit-breakers Using Vibration analysis**. 11th Internacional Symposium on High Voltage Engineering. London: [s.n.]. 1999. p. 102-106.

HOLM, E.; HOLM, R.; IL, E. I. S. Theory of Hardness and Measurements Applicable to Contact Diagnostics. **Journal of Applied Physics**, 20, n. 4, 1949. 319-327.

JANSSEN, A. L. J. et al. **Life Management of Circuit Breakers**. CIGRE Session. [S.l.]: [s.n.]. 2002. p. 13-104.

KARRIS, S. T. **Electronic Devices and Amplifier Circuits: with MATLAB® Applications**. 1ª. ed. Natick: Orchard Publications, 2005.

LANDRY, M. et al. A New Measurement Method of the Dynamic Contact Resistance of HV Circuit Breakers. **2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition**, 2006. 1002-1009.

LANDRY, M.; TURCOTTE, O.; BRIKCI, F. A Complete Strategy for Conducting Dynamic Contact Resistance Measurements on HV Circuit Breakers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 2, p. 710-716, 2008.

LIMA, A. M. P.; SILVA, A. P. T. R.; FERREIRA JR., A. A. **Estudo, Projeto e Simulação de Circuitos Passivos na Faixa de Radiofrequência**. XXIV Congresso de Iniciação Científica do Inatel. Santa Rita do Sapucaí: [s.n.]. 2013.

LOPEZ-ROLDAN, J. et al. Development of Non-intrusive Monitoring for Reactive Switching of High Voltage Circuit Breaker. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, LXI, Outubro 2014. 219-228.

LUDWIG, R.; BRETCHKO, P. **RF circuit design - Theory and applications**. 2ª. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 2000.

LYONS, R. **Understanding Digital Signal Processing**. 3ª. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2011.

LYONS, R. Digital Envelope Detection: The Good, the Bad, and the Ugly. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 17, p. 183-187, Júlio 2017. ISSN 1053-5888.

MATHWORKS. Envelope Detection - MATLAB & Simulink. **MathWorks**. Disponível em: <[https://www.mathworks.com/help/dsp/examples/envelope-detection.html?s\\_tid=gn\\_loc\\_drop](https://www.mathworks.com/help/dsp/examples/envelope-detection.html?s_tid=gn_loc_drop)>. Acesso em: 25 Abril 2018.

MATZNER, H.; LEVY, S.; MOALEM, H. **Basic RF Technic and Laboratory Manual: Impedance Matching**. Holon Institute of Technology. Holon, p. 14. 2008.

MCDONALD, J. D. **Electric Power Substations Engineering**. 2ª. ed. New York: CRC Press, 2007.

MITRA, S.; KUMUDA, D. K. Stepped Impedance Microstrip Low-Pass Filter. **International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology Implementation for S-band Application**, v. V, n. 3, p. 248-255, Maio 2015. ISSN 2278-621X.

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

NASH, E. Technical Reports: Measurement and Control of RF Power (Part I). **Analog Devices Inc.**, 2000. Disponível em: <<http://www.analog.com/en/technical-documentation/resources/index.html>>. Acesso em: 17 Outubro 2017.

NASRALLAH, E.; BRIKCI, F.; PERRON, S. Make/Break Contacts in Power Circuit Breakers. **Electric Energy T&D Magazine**, v. XI, n. 1, p. 54-60, 2007.

OLIVEIRA, A. C. **Ensaio de Resistência Dinâmica em Disjuntores: Análise de Sensibilidade da Corrente e da Velocidade de Abertura dos Contatos**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 77. 2015.

OLIVEIRA, A. C. et al. **Monitoramento Online e Diagnóstico de Disjuntores de Alta Tensão a Partir do Sinal Eletromagnético Irrradiado**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Natal: [s.n.]. 2016. p. 1-6.

OPPENHEIM, A. V. **Discrete-Time Signal Processing**. 2ª. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998.

ORLOWSKA, T.; BALZER, G.; HALFMANN, M. **Life Cycle Management of Circuit-breakers by Application of Reliability Centered Maintenance**. CIGRE Session. Paris: [s.n.]. 2000.

PELLEGRINI, G.; RAIMO, A.; REYNAUD, C. **EMC PROBLEMS IN H.V. SUBSTATIONS**. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Washington: IEEE. 1976. p. 106-109.

PORTUGUES, I.; MOORE, P. J.; GLOVER, I. A. **Characterisation of Radio Frequency Interference from High Voltage Electricity Supply Equipment**. International Conference on Antennas and Propagation. Exeter, UK: IET. 2003. p. 820-823.

POZAR, D. M. **Microwave engineering**. 2ª. ed. [S.l.]: John-Wiley & Sons, 1998.

RAMLI, S. et al. **EHV Circuit Breaker Condition Monitoring Using Antenna-based Coupling Methods**. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing: IEEE. 2008.

RUSSEL, B. D.; HARVEY, S. M.; NILSSON, S. L. Substation Electromagnetic Interference, Part I: Characterization and Description of the Transient EMI Problem. **IEEE Power Engineering Review**, v. IV, n. 7, p. 62-62, Julho 1984. ISSN 0272-1724.

RYAN, H. M.; JONES, G. R. **SF6 Switchgear**. London: Peter Perigrinus Ltd, 1989.

SANTANA, H. N. **Análise da Aplicabilidade de Sensores de Acoplamento Capacitivo no Monitoramento de Disjuntores de Alta Tensão**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 76. 2017.

SANTANA, H. N. et al. **Capacitive Coupling Sensor Application for Monitoring**. International Symposium on High Voltage Engineering. Buenos Aires: [s.n.]. 2017. p. 1-7.

SHISHKIN, G. G.; JONES, G. R. Investigation of the Electromagnetic Fields, Generated by High-current Convection-controlled Arcs. **Journal of Communications Technology and Electronics**, v. XXXV, n. 12, p. 126-132, 1990.

SKYWORKS SOLUTIONS. IC-VSWRRetn. **Skyworks Solutions, Inc.**, Setembro 2003. Disponível em: <<http://www.skyworksinc.com>>. Acesso em: 22 Junho 2018.

SMEETS, R. P. P.; ITO, H. **Electrical Endurance of High-Voltage Circuit Breakers in Service**. CIGRE SC A3 & B3 Joint Colloq. no. 102. Tokyo: [s.n.]. 2005.

SODHA, N. S. et al. Condition Assessment of EHV class Circuit Breakers using Dynamic Contact Resistance Measurement Technique. **Proceedings of Cigre Session A3 - 205**, Paris, 2012. 11.

SOUSA, H. et al. **Sensitivity Analysis of Dynamic Resistance Measurement Attributes of High Voltage Circuit Breakers**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Niterói: IEEE. 2018.

SOUZA, R. T. **Diagnóstico de Contatos de Disjuntores Baseado na Resistência Dinâmica de Contato e Lógica Fuzzy**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 177. 2015.

SOUZA, R. T.; COSTA, E. G. **Diagnóstico da Condição dos Contatos em Disjuntores Através da Resistência Dinâmica**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétrico. Natal: [s.n.]. 2014.

STANDARD ON HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROL GEAR. **IEC Standard 62271-100**. International Electrotechnical Commission. [S.l.], p. 186. 2006.

STANEK, M.; FRÖHLICH, K. "Model-aided Diagnosis: A New Method for Online Condition Assessment of High Voltage Circuit Breakers. **IEEE Transactions Power Delivery**, v. XV, n. 2, p. 585-591, Abril 2000.

STANISIC, Z.; NEIMANIS, R. **A New Ultra Lightweight Method for Static and Dynamic Resistance Measurements**. International Symposium on Electrical Insulation. San Diego: IEEE. 2010.

STEWART, S. **Distribution switchgear**. [S.l.]: The Institution of Engineering and Technology, 2004. 264 p.

SUWANASRI, C. et al. **Failure Rate Analysis of Circuit Breaker and its Preventive Maintenance Application**. International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Salt Lake City: IEEE. July 2014. p. 6.

TUCKER, D. G. The Early History of Amplitude Modulation, Sidebands and Frequency-Division-Multiplex. **The Radio and Electronic Engineer**, v. XLI, n. 1, p. 43-47, Janeiro 1971.

UZELAC, N.; PATER, R.; HEINRICH, C. **Classification of Non-intrusive Condition Assessment Methods for T&D Switchgear**. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Xi'an: IEEE. 2016. p. 5.

VALDECASA, G. S. et al. A HIGH-SPEED SCHOTTKY DETECTOR FOR ULTRA-WIDEBAND COMMUNICATIONS. **MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS**, v. LIX, n. 2, p. 388-393, Fevereiro 2017.

VIENNA, T. M. Cutaway Model of an Oil-filled High-voltage Circuit Breaker, Vienna, 2011. Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TMW\\_50981\\_Schnittmodell\\_Hochspannung-Leistungsschalter\\_HPF500F.jpg#file](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TMW_50981_Schnittmodell_Hochspannung-Leistungsschalter_HPF500F.jpg#file)>. Acesso em: 11 Novembro 2017.

WÄCKLÉN, N.; BJÖRCK, K.; CLAEISSON, L. High Voltage Circuit Breaker Testing with Dual Grounding. **Energise**, 2008. 52-55.

YEOM, K. W. **Microwave Circuit Design**. 1ª. ed. Michigan: Prentice Hall, 2015.

ZHANG, X. et al. Life Management of SF6 Circuit Breakers Based on Monitoring and Diagnosis. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. XXV, n. 3, p. 21-29, Junho 2009.

ZHURBENKO, V.; KROZER, V.; RUBAEK, T. **Passive Microwave Components and Antennas**. Rijeka: InTech, v. I, 2010.

ZIANI, A.; MOULAI, H. Extinction Properties of Electric Arcs in High Voltage Circuit Breakers. **Journal of Physics D: Applied Physics**, XVII, n. 10, 29 Abril 2009.