

Vivian Hausmann

**INTERPRETAÇÃO GRÁFICA DE DESCARGAS PARCIAIS ATRAVÉS
DA ANÁLISE DE SINAIS DE ULTRASSOM**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Valencia Ferreira da Luz.

Coorientador: Eng. Frederico Salvador Cabral Marks.

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra

Hausmann, Vivian
Interpretação Gráfica de Descargas Parciais Através da
Análise de Sinais de Ultrassom / Vivian Hausmann ;
orientador, Mauricio Valencia Ferreira da Luz,
coorientador, Frederico Salvador Cabral Marks, 2019.
103 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Descargas Parciais. 3.
Ultrassom. 4. Isoladores. I. Valencia Ferreira da Luz,
Mauricio. II. Salvador Cabral Marks, Frederico. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Elétrica. IV. Título.

Vivian Hausmann

**INTERPRETAÇÃO GRÁFICA DE DESCARGAS PARCIAIS
ATRAVÉS DA ANÁLISE DE SINAIS DE ULTRASSOM**

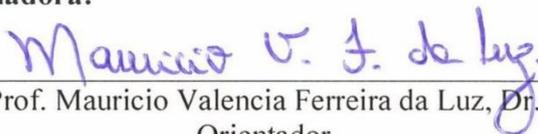
Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em sua forma final, pela Banca Examinadora.

Florianópolis, 15 de julho de 2019.

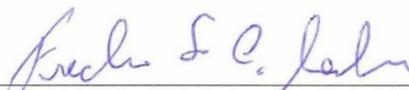


Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, em
exercício

Banca Examinadora:



Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Frederico Salvador Cabral Marks.
Coorientador
WEG Transformadores



Eng. Felipe Luis Probst.
Eletrosul Centrais Elétricas S.A.



Eng. Pedro Carvalho Silva Barcelos.
Mestrando PPGEEL - Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha avó Sitta (in memoriam), minha segunda mãe e hoje meu anjo da guarda.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Aos meus pais, Elisa e Romeu, por todo o amor e incentivo dados a mim durante toda a minha vida. Vocês são exemplos de esforço, dedicação e integridade. Devo a vocês todas as minhas conquistas.

À minha irmã, Ana Carolina, meu maior orgulho, tão madura, inteligente, talentosa. Você me inspira a ser uma pessoa melhor.

Ao meu namorado e melhor amigo, Hector, pelo carinho, apoio, parceria, paciência. Você foi o maior presente que a Engenharia me deu.

À família 14.1 e agregados, por terem sido tão acolhedores. Ao entrarem em um curso de Engenharia, os graduandos deparam-se com uma realidade egoísta e solitária. Nós provamos que somos diferentes e estivemos sempre amparando uns aos outros durante esses anos. Vocês são os melhores.

Ao professor Maurício, por ter aceitado me orientar à distância e estar sempre disponível quando precisei. Obrigada também pelos ensinamentos durante a graduação, foi um prazer ter sido sua aluna.

Ao pessoal da FURB, por sempre terem me ajudado voluntariamente, sem medir esforços para que este trabalho fosse concluído com sucesso. Frederico, obrigada pela ajuda na escolha do tema, pela orientação sobre o assunto e por sempre dar um jeito de conseguir me ajudar. Aprendi muito com você. Ao Professor Luiz Henrique Meyer, que contribuiu ao me ajudar tanto com a teoria, discutindo sobre o assunto e me emprestando livros, quanto com a prática, ao me dar orientações sobre os ensaios e permitir que eu usasse o microfone de ultrassom, peça chave para realização da parte prática deste trabalho. Ao Rafael, do Laboratório de Alta Tensão da FURB, pelo auxílio durante os ensaios no laboratório e por sempre ter me ajudado com tanta disposição e boa vontade. Ao Marcelo Corso, por ter sido tão prestativo e abdicar de horas de trabalho e estudo para me assistenciar durante os ensaios.

À UFSC, por ter sido a minha segunda casa durante esses 5 anos. Lá eu conheci pessoas maravilhosas, pude ampliar meus horizontes e cresci não só como estudante e profissional, mas principalmente como pessoa.

“Sábio é aquele que conhece os limites da própria ignorância.” (Sócrates)

RESUMO

A geração, transmissão e distribuição de energia elétrica compõem um Sistema Elétrico de Potência, que deve ser seguro e confiável para atender aos consumidores. Devido a isso, é necessário que as concessionárias de energia elétrica atentem-se ao estado dos componentes isolantes da rede de distribuição. A inspeção dos isoladores é fundamental, pois a degradação desses equipamentos e exposição dos mesmos a condições adversas podem levar à ocorrência de descargas parciais. Um dos métodos mais utilizados é a inspeção por ultrassom, por ser segura e não invasiva. Porém essa técnica depende da sensibilidade da audição do operador, o que a torna menos eficiente do que o desejável. Este trabalho apresenta uma alternativa para a inspeção por ultrassom, utilizando a análise dos sinais de ultrassom no domínio da frequência para detecção da presença de descargas parciais. Foram coletadas as formas de onda de pulsos de descargas parciais através de um microfone ultrassônico e os gráficos no domínio do tempo foram submetidos à Transformada Rápida de Fourier (FFT) para determinar as frequências fundamentais presentes nesses sinais.

Palavras-chave: Ultrassom. Descargas Parciais. Isoladores.

ABSTRACT

The generation, transmission and distribution of electrical energy compose an electric system, which must be safe and reliable in order to supply the consumers. Due to that, the distributors of electrical energy have to pay attention to the condition of insulation components that belong to the distribution grid. The inspection of insulators is very important, because the degradation of this equipments and exposure to adverse condition can lead to the occurrence of partial discharges. One of the most popular methods is the ultrasound inspection, because it's safe and relatively cheap. But this technique depends of the operator's audition sensitivity, which makes it not so assertive. This work presents an alternative to the ultrasound inspection, using the frequency analysis of ultrasound signals to detect the presence of partial discharges. The waveforms of partial discharges pulses have been collected using an ultrasound microphone and the time domain graphics were submitted to the Fast Fourier Transform (FFT), in order to determinate the fundamental frequencies present in these signals.

Keywords: Ultrasound. Partial Discharges. Insulators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Isolador Roldana.	22
Figura 2: Isolador de vidro em porcelana.	22
Figura 3: Estrutura de apoio de uma rede de distribuição.	23
Figura 4: Estrutura de ancoragem com isoladores de vidro.	23
Figura 5: Partes componentes de um isolador de disco.	24
Figura 6: Átomo de um material dielétrico. a) Átomo não polarizado. b) Forças no átomo quando se aplica E	26
Figura 7: Processo de avalanche de elétrons iniciado a partir de um eletrodo negativo. a) Início. b) Formação de um par de elétrons – Impacto de um elétron com um átomo neutro libera um elétron adicional e deixa um íon positivo para trás. c) Multiplicação – Os elétrons se movem criando íons positivos quando se multiplicam.	27
Figura 8: curva de Paschen. Relação entre tensão de ignição V_i e o produto pd	28
Figura 9: Eletrodo ponta-plano.	30
Figura 10: Tipos de descargas parciais: (A) superficial, (B) corona, (C) interna.	30
Figura 11: Arborescência em polimetilmetacrilato	31
Figura 12: Isolador bastão polimérico em processo de trilhamento bastante avançado.	32
Figura 13: Exemplo de configuração que pode gerar descargas tipo corona.	33
Figura 14: Distribuição do campo elétrico em uma região de campo não uniforme em função da distância dos eletrodos.	33
Figura 15: Equipamento Radar Engineers RFI Locator 240A.	35
Figura 16: Inspeção elétrica com equipamento de ultrassom.	37
Figura 17: SDT 170.	37
Figura 18: Intensidade do ultrassom em função da tensão aplicada e da distância do sensor de ultrassom.	39
Figura 19: Termovisor NEC modelo TH 5100.	40
Figura 20: Inspeção de redes de distribuição com termovisor.	40
Figura 21: Imagem termográfica de cadeia de isoladores em uma linha de distribuição.	41
Figura 22: Eletrodo ponta.	42
Figura 23: Eletrodo plano.	43
Figura 24: Isoladores de resina classe 25kV.	43
Figura 25: Estrutura de perfilados para fixar os isoladores, eletrodos e microfone.	44

Figura 26: Fonte de tensão contínua.....	44
Figura 27: Ponta de prova PPA-440 Instrutherm.	45
Figura 28: Multímetro ET-1610 Minipa.....	45
Figura 29: Microfone ultrassônico M500 Petersson.	46
Figura 30: Interface do <i>software</i> BatMicRecorder.	47
Figura 31: Bancada montada para os ensaios.....	48
Figura 32: Eletrodos secos e limpos.	50
Figura 33: Eletrodos molhados com solução salina.	51
Figura 34: Eletrodos sujos com lama.	51
Figura 35: Gráfico obtido da gravação de pulsos de descargas parciais com distância de 4mm entre os eletrodos e tensão de 5,29kV.	53
Figura 36: Um pulso de descarga parcial extraído do gráfico da Figura 35.....	54
Figura 37: FFT do pulso de descarga parcial da Figura 36.	56
Figura 38: 1º pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos secos. Tempo analisado: 0,503 a 0,505s. Tensão: 5,29kV	58
Figura 39: FFT do 1º pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos secos.....	59
Figura 40: 2º pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos secos. Tempo analisado: 2,238 a 2,240s. Tensão: 5,29kV	60
Figura 41: FFT do 2º pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos secos.....	60
Figura 42: 3º pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos secos. Tempo analisado: 4,5195 a 4,5215s. Tensão: 5,29kV.	61
Figura 43: FFT do 3º pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos secos.....	61
Figura 44: Comparação entre FFTs dos pulsos analisados. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos secos.	62
Figura 45: 1º pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos molhados com solução salina. Tempo analisado: 2,9642 a 2,9662s. Tensão: 3,49kV.	63
Figura 46: FFT 1º pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.	64
Figura 47: 2º pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos molhados com solução salina. Tempo analisado: 5,7803 a 5,7823s. Tensão: 3,49kV.	64
Figura 48: FFT 2º pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.	65
Figura 49: 3º pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos molhados com solução salina. Tempo analisado: 8,931 a 8,933s. Tensão: 3,49kV.	65
Figura 50: FFT 2º pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.	66

Figura 51: Comparação entre FFTs dos pulsos analisados. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.....	67
Figura 52: 1° pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos sujos com lama. Tempo analisado: 0,8075 a 0,8095s. Tensão: 3,9kV.....	68
Figura 53: FFT 1° pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos sujos com lama.	69
Figura 54: 2° pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos sujos com lama. Tempo analisado: 4,4048 a 4,4068s. Tensão: 3,9kV.....	69
Figura 55: FFT 2° pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos sujos com lama.	70
Figura 56: 3° pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos sujos com lama. Tempo analisado: 7,1198 a 7,1218s. Tensão: 3,9kV.....	70
Figura 57: FFT 3° pulso. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos sujos com lama.	71
Figura 58: Comparação entre FFTs dos pulsos analisados. <i>Gap</i> : 4mm. Eletrodos sujos com lama.	72
Figura 59: 1° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos secos. Tempo analisado: 1,879 a 1,181s. Tensão: 7,55kV.	73
Figura 60: FFT 1° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos secos.....	74
Figura 61: 2° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos secos. Tempo analisado: 4,163 a 4,165s. Tensão: 7,55kV.	74
Figura 62: FFT 2° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos secos.....	75
Figura 63: 3° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos secos. Tempo analisado: 6,88025 a 6,88025s. Tensão: 7,55kV.	75
Figura 64: FFT 3° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos secos.....	76
Figura 65: Comparação entre FFTs dos pulsos analisados. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos secos.	77
Figura 66: 1° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos molhados com solução salina. Tempo analisado: 1,7832 a 1,7852s. Tensão: 7,4kV.	78
Figura 67: FFT 1° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos molhados com solução salina.	78
Figura 68: 2° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos molhados com solução salina. Tempo analisado: 3,8166 a 3,8186s. Tensão: 7,4kV.	79
Figura 69: FFT 2° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos molhado com solução salina.....	79
Figura 70: 3° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos molhados com solução salina. Tempo: 7,1402 a 7,1422s. Tensão: 7,4kV.	80
Figura 71: FFT 3° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos molhados com solução salina.	80

Figura 72: Comparação entre FFTs dos pulsos analisados. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos molhados com solução salina.....	81
Figura 73: 1° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos sujos com lama. Tempo analisado: 0,6073 a 0,6093s. Tensão: 4,6kV.....	82
Figura 74: FFT 1° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos sujos com lama.	83
Figura 75: 2° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos sujos com lama. Tempo analisado: 2,9383 a 2,9403s. Tensão: 4,6kV.....	83
Figura 76: FFT 2° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos sujos com lama.	84
Figura 77: 3° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos sujos com lama. Tempo analisado: 6,0024 a 6,0044s. Tensão: 4,6kV.....	84
Figura 78: FFT 3° pulso. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos sujos com lama.	85
Figura 79: Comparação entre FFTs dos pulsos analisados. <i>Gap</i> : 6mm. Eletrodos sujos com lama.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Constantes mínimas de ignição para alguns gases.	29
Tabela 2: Itens para a montagem da bancada de ensaios.	48
Tabela 3: Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). Gap: 4mm. Eletrodos secos.	62
Tabela 4: Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). Gap: 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.	67
Tabela 5: Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). Gap: 4mm. Eletrodos sujos com lama.	72
Tabela 6: Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). Gap: 6mm. Eletrodos secos.	77
Tabela 7: Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). Gap: 6mm. Eletrodos molhados com solução salina.	82
Tabela 8: Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). Gap: 6mm. Eletrodos sujos com lama.	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ADC: *Analog-to-Digital Converter*;

CC: Corrente Contínua;

DFT: *Discrete Fourier Transform*;

DP: Descarga Parcial;

EMI: *Electromagnetic Interference*;

FFT: *Fast Fourier Transform*;

HD: *Hard Disk*;

IEC: *International Electrotechnical Commission*;

NBR: Norma Brasileira;

OTG: *On The Go*;

PC: *Personal Computer*;

P&D: Pesquisa e Desenvolvimento

RF: *Radio Frequency*;

RFI: *Radio Frequency Interference*;

SE: Subestação;

SEP: Sistema Elétrico de Potência;

USB: *Universal Serial Bus*;

UV: Ultravioleta;

cm: centímetro, equivale a 10^{-2} m;

°C: graus Celsius;

d: distância entre os eletrodos;

dBA: nível sonoro ponderado A;

dBV: unidade de medida de tensão elétrica referenciada a 0,775V ($\text{dBV} = 20 \log (\text{tensão} / 0,775\text{V})$);

E: campo elétrico;

F: força elétrica;

$\nabla\phi$: gradiente do fluxo magnético;

g: gramas;

Hz: Hertz;

kHz: quilohertz, equivale a 1000Hz;

km/h: quilômetros por hora;

kV: quilovolts, equivale a 1000V;

m: metros;

MHz: megahertz, equivale a 10^6 Hz;

ms: milissegundos, equivale a 10^{-3} s.

p: pressão no gás;

pd : produto entre pressão do gás e distância entre os eletrodos;

pd_{min} : valor mínimo do produto entre pressão do gás e distância entre os eletrodos em que pode ocorrer a ignição de uma descarga parcial;

s: segundos;

TB: tera bytes, equivale a 1000GB;

torr: unidade de pressão, equivale a 133,32Pa;

μA : microamperes, equivale a 10^{-6} A;

μm : micrometro, equivale a 10^{-6} m;

V: Volts;

∇V : gradiente de tensão;

V_i : tensão de ignição de um gás;

$V_{i min}$: tensão de ignição mínima de um gás;

V_r : tensão de ruptura do dielétrico.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	18
2.2	REDE DE DISTRIBUIÇÃO	19
2.2.1	Sistemas de subtransmissão.....	19
2.2.2	Subestações de distribuição	19
2.2.3	Sistemas de distribuição primária	19
2.2.4	Estações transformadoras	20
2.2.5	Redes de distribuição secundária.....	20
2.3	ISOLADORES DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO	20
2.3.1	Materiais isolantes mais comuns.....	20
2.3.1.1	Porcelana e vidro	21
2.3.1.2	Materiais poliméricos	21
2.3.2	Tipos de isoladores mais utilizados nas redes de distribuição.....	22
2.3.2.1	Isoladores roldana.....	22
2.3.2.2	Isoladores de pino.....	22
2.3.2.3	Isoladores de disco	23
2.3.3	Falhas em isoladores	24
2.4	DESCARGAS PARCIAIS	24
2.4.1	Definição.....	24
2.4.2	Condições para a ocorrência de descargas parciais.....	25

2.4.2.1	Ionização	26
2.4.2.2	Considerações sobre o campo elétrico	28
2.4.2.2.1	<i>O campo elétrico e a geometria dos eletrodos</i>	29
2.4.3	Tipos de descargas parciais	30
2.4.3.1	Descarga parcial interna	30
2.4.3.2	Descarga parcial superficial	32
2.4.3.3	Descarga corona	32
2.5	TÉCNICAS PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS	34
2.5.1	Interferência em Rádio Frequência (RFI)	34
2.5.2	Ultrassom	36
2.5.3	Termovisão.....	39
3	METODOLOGIA	42
3.1	EXPERIMENTAL	42
3.1.1	Equipamentos, eletrodos e softwares utilizados	42
3.1.2	Montagem da bancada para os ensaios	47
3.1.3	Condições ambientais simuladas.....	49
3.1.3.1	Eletrodos secos e limpos	50
3.1.3.2	Eletrodos molhados com solução salina.....	50
3.1.3.3	Eletrodos sujos com lama.....	51
3.2	ANÁLISE DOS DADOS	52
3.2.1	Rotina para leitura dos dados e plotagem dos gráficos no domínio do tempo ...	52
3.2.2	Rotina para leitura e análise de um pulso de descarga parcial.....	53
3.2.3	Rotina para plotagem dos gráficos no domínio da frequência.....	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1.1	Distância entre os eletrodos: 4mm. Eletrodos secos.	57
4.1.1.1	1º pulso	57
4.1.1.2	2º pulso	60

4.1.1.3	3º pulso	61
4.1.1.4	Comparação entre as FFTs dos pulsos analisados. Distância entre os eletrodos: 4mm. Eletrodos secos.	62
4.1.2	Distância entre os eletrodos: 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.	63
4.1.2.1	1º pulso	63
4.1.2.2	2º pulso	64
4.1.2.3	3º pulso	65
4.1.2.4	Comparação entre as FFTs dos pulsos analisados. Distância entre os eletrodos: 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.	66
4.1.3	Distância entre os eletrodos: 4mm. Eletrodos sujos com lama.	68
4.1.3.1	1º pulso	68
4.1.3.2	2º pulso	69
4.1.3.3	3º pulso	70
4.1.3.4	Comparação entre as FFTs dos pulsos analisados. Distância entre os eletrodos: 4mm. Eletrodos sujos com lama.	71
4.1.4	Distância entre os eletrodos: 6mm. Eletrodos secos.	73
4.1.4.1	1º pulso	73
4.1.4.2	2º pulso	74
4.1.4.3	3º pulso	75
4.1.4.4	Comparação entre as FFTs dos pulsos analisados. Distância entre os eletrodos: 6mm. Eletrodos secos.	76
4.1.5	Distância entre os eletrodos: 6mm. Eletrodos molhados com solução salina.	77
4.1.5.1	1º pulso	78
4.1.5.2	2º pulso	79
4.1.5.3	3º pulso	80
4.1.5.4	Comparação entre as FFTs dos pulsos analisados. Distância entre os eletrodos: 6mm. Eletrodos molhados com solução salina.	81
4.1.6	Distância entre os eletrodos: 6mm. Eletrodos sujos com lama.	82

4.1.6.1	1º pulso	82
4.1.6.2	2º pulso	83
4.1.6.3	3º pulso	84
4.1.6.4	Comparação entre as FFTs dos pulsos analisados. Distância entre os eletrodos: 6mm. Eletrodos sujos com lama.	85
5	CONCLUSÃO	87
6	TRABALHOS FUTUROS.....	89
	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICE A – Código de Matlab desenvolvido para análise dos dados coletados	97

1 INTRODUÇÃO

Um Sistema Elétrico de Potência (SEP) é composto por geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Para atender aos consumidores, as concessionárias de energia elétrica devem cumprir alguns requisitos como qualidade de energia, confiabilidade, continuidade, disponibilidade e segurança do sistema elétrico. Devido à necessidade de atender a essas exigências, as concessionárias precisam dar atenção especial ao estado da isolação dos componentes da rede de distribuição (isoladores, buchas, chaves e pára-raios), uma vez que a falha destes é a maior causa de interrupções no fornecimento de energia elétrica [2] e acarreta em custos indesejados e redução dos índices de qualidade.

Dentre os equipamentos das redes de distribuição, um dos que mais apresenta defeitos é o isolador, cuja função é separar eletricamente áreas com diferentes potenciais. As falhas nos isoladores podem ocorrer por diversos motivos como manuseio indevido, vandalismo, controle de qualidade inadequado durante a fabricação, poluição do ambiente no qual o isolador está instalado e condições atmosféricas como temperatura, chuva, exposição aos raios ultravioleta (UV) e vento. Além disso, como as redes de distribuição encontram-se mais próximas do solo, elas estão mais sujeitas à contaminação. A constante exposição dos isoladores a esses fatores pode levar à ocorrência de descargas parciais (DPs) e, conseqüentemente, à diminuição da capacidade de isolação desses equipamentos.

Os sistemas isolantes podem apresentar defeitos intermitentes, que surgem durante seu período de trabalho devido às combinações de certas condições às quais estão expostos. Estes defeitos geralmente não são aparentes, o que torna necessária a utilização de equipamentos específicos para detecção de falhas em sistemas elétricos [3]. As descargas parciais sobre os isoladores, por exemplo, geram ruído e luminosidade que podem ser imperceptíveis pelo ser humano. Portanto, para detectá-las é necessário fazer o uso de técnicas como Rádio Interferência (RFI), Ultrassom, Termovisão e Isolômetro.

A solução do problema de detecção de isoladores defeituosos torna-se cada vez mais necessária para as empresas de energia elétrica, as quais buscam associar o aumento da confiabilidade do sistema à redução de custos [5]. É por isso que os métodos de inspeção citados são tão importantes, pois se tratam de ações preventivas nas redes de distribuição. Uma rotina de manutenções preventivas pode evitar que ocorram interrupções no fornecimento de energia,

deslocamento de equipes de manutenção e troca de isoladores. Além da inspeção, outras ações preventivas como limpeza dos isoladores e dos condutores próximos a eles e aperto das suas conexões nas estruturas também são de suma importância [4].

O enfoque deste trabalho será na técnica de inspeção por ultrassom, que utiliza um equipamento para captar sons de alta frequência, os quais podem indicar a presença de descargas parciais, mostrando que há falhas no sistema de isolamento. Esse equipamento detecta as ondas ultrassônicas, as converte em sinal elétrico e, por meio de um circuito, o sinal elétrico é convertido em sinal audível. Através de um fone de ouvido o operador ouve o ruído e, de acordo com a sua percepção, realiza o diagnóstico dos componentes da rede. Ou seja, a inspeção por ultrassom é vantajosa por ser realizada a uma distância segura da rede elétrica, por ser não invasiva e por utilizar um equipamento diretivo. Porém, o lado negativo é que a análise depende da experiência e da sensibilidade do operador.

Considerando os fatos supracitados, seria de grande valia um procedimento que utilizasse a análise de sinais de ultrassom e que tivesse um alto nível de confiabilidade para detectar isoladores em estado de pré falha. Esse novo método poderia reduzir de forma significativa os custos arcados pelas concessionárias com a manutenção de linhas de distribuição, porque indicaria as substituições apenas dos isoladores necessários [6].

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Mostrar a existência de um padrão em curvas de descargas parciais, a fim de propor uma forma mais assertiva e objetiva para localização de isoladores defeituosos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Simular descargas parciais em laboratório;
- Captar sinais de ultrassom provenientes de descargas parciais utilizando microfone ultrassônico;
- A partir dos dados obtidos através do microfone de ultrassom, obter amostras de um único pulso de descarga parcial;

- Através de *softwares* específicos, obter gráficos dos pulsos de descargas parciais no domínio da frequência a partir das curvas geradas com microfone de ultrassom no domínio do tempo;
- Demonstrar um padrão de componentes de frequências presentes em curvas de descargas parciais obtidas em ambiente seco;
- Demonstrar um padrão de componentes de frequências presentes em curvas de descargas parciais obtidas em ambiente úmido e salino;
- Demonstrar um padrão de componentes de frequências presentes em curvas de descargas parciais obtidas em ambiente úmido e poluído;
- Comparar as componentes de frequências presentes em curvas de descargas parciais obtidas em ambientes secos, úmidos e salinos e úmidos e poluídos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em capítulos, para melhor apresentação do conteúdo e entendimento sobre a pesquisa desenvolvida.

O Capítulo 1 contém a introdução, objetivos geral e específicos e apresentação da estruturação do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o assunto, abordando sobre sistemas elétricos de potência, redes de distribuição, isoladores para redes de distribuição, descargas parciais (conceito, tipos, condições para que ocorram) e técnicas para detecção de descargas parciais.

O Capítulo 3 contém a metodologia de pesquisa, mostrando desde a parte experimental até a etapa de tratamento e análise dos dados obtidos em ensaios laboratoriais.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e a discussão sobre os mesmos.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão a que se chegou ao fim deste trabalho.

O Capítulo 6 apresenta sugestões para trabalhos futuros nesta área, visto que é um tema com grande potencial a ser explorado e de grande relevância para o setor elétrico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão bibliográfica, que aborda pontos como características e estrutura de um sistema elétrico de potência, rede de distribuição e isoladores utilizados em redes de distribuição. Além disso, são apresentados os conceitos básicos para o entendimento de descargas parciais, as condições para a ocorrência desse fenômeno, os tipos de descargas parciais e as principais técnicas utilizadas pelas concessionárias de energia para detectar a presença desse efeito na rede elétrica.

2.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Os sistemas elétricos de potência têm a função principal de fornecer energia aos consumidores com a qualidade adequada, no instante em que for solicitada. Isto é, o sistema tem as funções de produtor, transformando a energia de alguma natureza, por exemplo, hidráulica, mecânica, térmica ou outra, em energia elétrica, e de distribuidor, fornecendo aos consumidores a quantidade de energia demandada, instante a instante [7].

Segundo Kagan, Oliveira e Robba (2005), um sistema elétrico é composto pelas seguintes partes, resumidamente:

1. Um sistema de geração, que transforma energia hidráulica, térmica, eólica, etc. em energia elétrica. Tensões entre 2,2kV e 22kV, sendo que a tensão nominal usual é de 13,8kV.
2. Subestações (SEs) elevadoras, que elevam as tensões de geração para tensões de transmissão, sendo as mais usuais 69, 138, 230, 345 e 500kV.
3. Um sistema de transmissão (linhas de transmissão), que faz o transporte da energia dos centros de produção até os centros de consumo, sendo que a maioria opera em tensão na faixa de 230 a 500kV.
4. Subestações abaixadoras, que reduzem as tensões de transmissão para níveis de distribuição (tensão primária), geralmente 13,8kV, mas pode ser também 23kV ou 34,5kV.
5. Um sistema de distribuição, que distribui energia aos consumidores. A entrega para alguns grandes consumidores é em média tensão (tensão primária), enquanto para os pequenos consumidores, como residências, é feita em baixa tensão (tensão

secundária, 380/220V). A transformação de média para baixa tensão é feita por transformadores trifásicos instalados nos postes.

2.2 REDE DE DISTRIBUIÇÃO

A distribuição se caracteriza como o segmento do setor elétrico dedicado ao rebaixamento da tensão proveniente do sistema de transmissão, à conexão de centrais geradoras e ao fornecimento de energia elétrica ao consumidor [8].

O sistema de distribuição é composto pela rede elétrica e pelo conjunto de instalações e equipamentos elétricos que operam em níveis de alta tensão (superior a 69 kV e inferior a 230 kV), média tensão (superior a 1 kV e inferior a 69 kV) e baixa tensão (igual ou inferior a 1 kV) [8].

Segundo Kagan, Oliveira e Robba (2005), a rede de distribuição é composta por: sistema de subtransmissão, subestações de distribuição, sistemas de distribuição primária, estações transformadoras e redes de distribuição secundária.

2.2.1 Sistemas de subtransmissão

Coletam a energia das subestações de subtransmissão e a entregam às subestações de distribuição e aos consumidores que recebem a energia elétrica em alta tensão, geralmente 138 ou 69kV. Grandes instalações industriais e estações de tratamento e bombeamento de água são alguns exemplos desses consumidores [7].

2.2.2 Subestações de distribuição

São supridas pela rede de subtransmissão e nelas ocorre a transformação da tensão de subtransmissão (alta) para a tensão de distribuição primária (média). Há vários arranjos eletromecânicos possíveis para essas subestações e a escolha do arranjo é feita de acordo com a carga que a SE deverá alimentar [7].

2.2.3 Sistemas de distribuição primária

Podem ser chamados também de redes de média tensão. Derivam das subestações de distribuição e operam radialmente (no caso da rede aérea), com possibilidade de transferência

de blocos de carga entre circuitos para o atendimento da operação em condições de contingência, devido à manutenção corretiva ou preventiva [7]. As redes de média tensão atendem aos transformadores de distribuição e aos consumidores primários, como indústrias de médio porte e *shopping centers*. Além disso, podem ser aéreas ou subterrâneas, sendo as primeiras mais comuns devido ao menor custo.

2.2.4 Estações transformadoras

São constituídas por transformadores, que reduzem a tensão primária (média tensão) para a de distribuição secundária (baixa tensão) [7]. Esses transformadores são em sua maioria trifásicos e instalados nos postes. No Brasil, os padrões de tensões secundárias são 220/127V e 380/220V.

2.2.5 Redes de distribuição secundária

Dos transformadores deriva-se a rede de baixa tensão (220/127V ou 380/220V), que supre consumidores como residências e pequenos comércios e indústrias [7].

2.3 ISOLADORES DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Os isoladores são equipamentos providos de propriedades elétricas e mecânicas. Em termos mecânicos, devem ser capazes de suportar os esforços produzidos pelos condutores. Em termos elétricos, exercem a função de isolar os condutores, submetidos a uma diferença de potencial em relação à terra ou em relação a um outro condutor de fase [9].

Segundo a definição de Gorur, Cherney e Burnham (1999), um isolador na verdade é um conjunto de componentes constituído pelo dielétrico, eletrodos terminais ou terminais conectores, e partes internas que auxiliam a fixar o dielétrico aos eletrodos.

2.3.1 Materiais isolantes mais comuns

Há três tipos principais de materiais dielétricos que são usados para fabricar isoladores de alta tensão: porcelana, vidro e polímero. Os isoladores de porcelana também são chamados de isoladores de cerâmica e os isoladores poliméricos também são conhecidos como compósitos e não-cerâmicos [10].

2.3.1.1 Porcelana e vidro

A porcelana e o vidro são materiais inorgânicos, conhecidos por resistir à degradação natural por muitos anos. Além disso, seus pontos de fusão ultrapassam 1500°C e são inertes à maioria dos produtos químicos. Sendo assim, isoladores de porcelana e de vidro são extremamente resistentes ao calor devido a descargas elétricas [10].

A água adere facilmente à superfície de isoladores de vidro e porcelana, portanto os isoladores feitos desses materiais devem ter uma distância de escoamento suficientemente grande e formas especiais para evitar o acúmulo de água em sua superfície e ter uma resistência superficial alta mesmo sob condições de chuva e ambientes contaminados [10].

O vidro e a porcelana são materiais densos, portanto os isoladores feitos desses materiais são pesados. Além disso, são sensíveis, então precisam ser manuseados com cuidado [10].

De acordo com a NBR 5032 (ABNT, 2014), os isoladores de porcelana e vidro devem ser livres de trincas, rebarbas, bolhas ou inclusões de materiais estranhos.

2.3.1.2 Materiais poliméricos

Os isoladores poliméricos são feitos de materiais orgânicos, principalmente hidrocarbonetos. Esse tipo de material é mais susceptível à deterioração devido ao calor causado por descargas elétricas, produtos químicos (água inclusive) e condições ambientes como luz solar, umidade, temperatura, etc [10].

Materiais orgânicos possuem uma propriedade de repelir a água, chamada hidrofobia. Essa resistência à água é desejável porque faz com que a resistência superficial do isolador polimérico não diminua tanto sob condições de umidade e contaminação como acontece com os isoladores de porcelana e vidro [10].

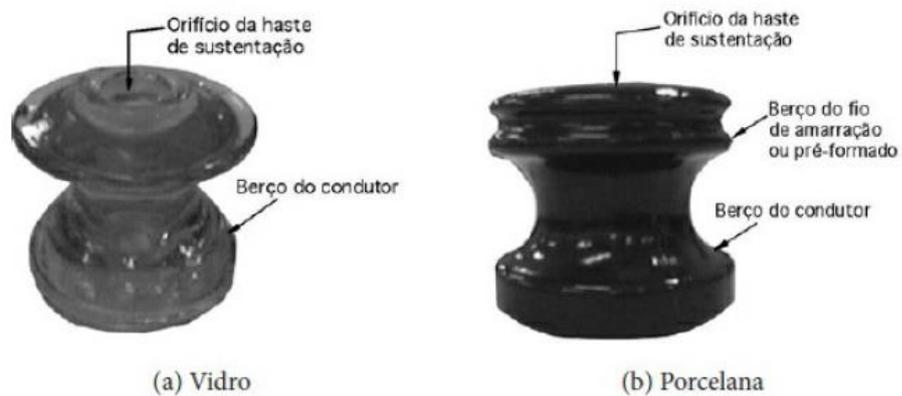
Isoladores compósitos são bem mais leves do que os de porcelana e vidro e, além disso, não são tão frágeis. Portanto, seu manuseio e instalação são mais fáceis e ainda são mais resistentes a atos de vandalismo [10]. Gorur, Cherney e Burnham (1999) fazem uma comparação entre isoladores de distribuição cerâmicos e não cerâmicos, da classe de tensão de 15kV. Segundo os autores, os isoladores não cerâmicos são 74,7% mais leves que os de porcelana.

2.3.2 Tipos de isoladores mais utilizados nas redes de distribuição

2.3.2.1 Isoladores roldana

Usados predominantemente em redes de distribuição secundárias (220 ou 380V). Podem ser encontrados tanto em porcelana vitrificada como em vidro recozido [9].

Figura 1: Isolador Roldana.



Fonte: [9].

2.3.2.2 Isoladores de pino

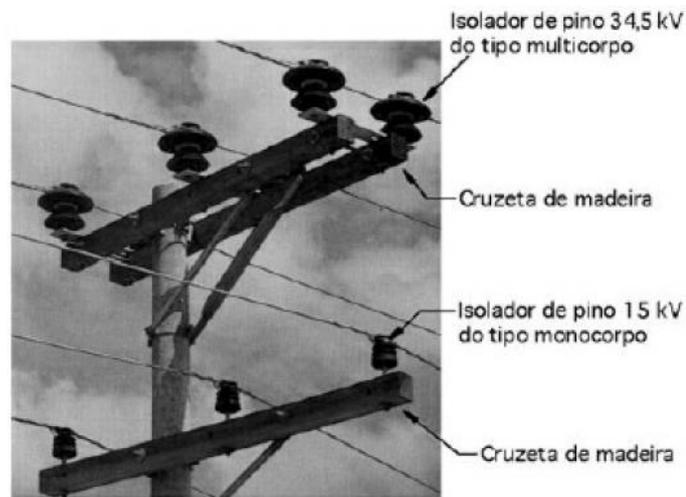
Predominantemente utilizados em redes de distribuição rural e urbana primária na tensão de até 38kV. Podem ser fabricados em porcelana vitrificada ou vidro temperado [9].

Figura 2: Isolador de pino em porcelana.



Fonte: [9].

Figura 3: Estrutura de apoio de uma rede de distribuição.

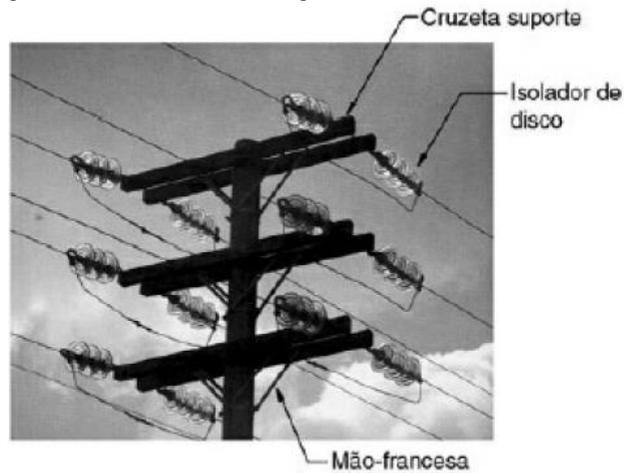


Fonte: [9].

2.3.2.3 Isoladores de disco

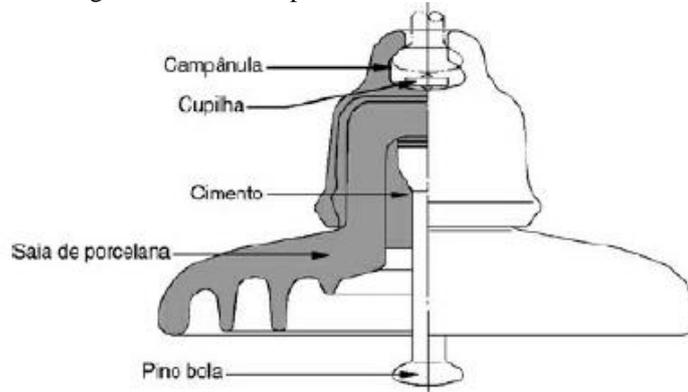
Também chamados de isoladores de suspensão, são utilizados em redes de distribuição urbana e rural primária e linha de transmissão, tanto nas estruturas de ancoragem e amarração como nas estruturas de alinhamento tipo suspensão [9].

Figura 4: Estrutura de ancoragem com isoladores de vidro.



Fonte: [9].

Figura 5: Partes componentes de um isolador de disco.



Fonte: [9].

2.3.3 Falhas em isoladores

Isoladores de distribuição são, em sua maioria, instalados ao ar livre e estão sujeitos a estresses mecânicos, elétricos e ambientais. Esses fatores combinados aceleram o processo de degradação do sistema isolante e dão margem à ocorrência de descargas parciais nos isoladores.

A poluição do ambiente no qual está instalado o isolador acumula-se na sua superfície, formando uma camada não-uniforme de poluentes. Quando a poluição está seca, a condutividade da superfície é baixa, porém a exposição à alta umidade faz com que os poluentes se dissociem em íons, aumentando a condutividade da superfície do isolador [12]. Na superfície flui uma corrente de fuga, que causa aquecimento devido ao efeito Joule e ocorre a evaporação da umidade presente na superfície do isolador. Como a camada de poluentes é heterogênea, o aquecimento e consequente evaporação da umidade ocorrem de modo não uniforme, ocasionando o aparecimento de bandas secas. As bandas secas são regiões dielétricas cercadas de regiões condutoras e nas suas bordas acumulam-se cargas elétricas que originam um intenso campo elétrico. Se esse campo elétrico for grande o suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar ao redor da banda seca, ocorre uma descarga parcial. Dependendo da intensidade e da frequência com que ocorrem as descargas parciais, pode ocorrer uma descarga completa, chamada de *flashover* [12], [13], [14].

2.4 DESCARGAS PARCIAIS

2.4.1 Definição

A norma IEC 60270 (2015) define descarga parcial como sendo uma descarga elétrica localizada que curto circuita parcialmente a isolação entre condutores e que pode ou não ocorrer

adjacente a um condutor. Geralmente essas descargas ocorrem em forma de pulsos, com a duração de menos de $1\mu\text{s}$.

Já Krueger (1989) afirma que uma descarga parcial (DP) é caracterizada como uma descarga elétrica de pequena intensidade que ocorre em uma região de imperfeição de um meio dielétrico sujeita a um campo elétrico, onde o caminho formado pela descarga não une as duas extremidades dessa região de forma completa. A ocorrência de descargas parciais depende da intensidade do campo aplicado nas extremidades desse espaço, além do tipo de tensão de teste aplicada (alternada, contínua, sinal transitório ou impulso).

O termo “descarga parcial” inclui um amplo grupo de fenômenos de descargas: (i) descargas internas, que ocorrem em vazios ou cavidades dentro de dielétricos sólidos ou líquidos; (ii) descargas superficiais, que aparecem no contorno de diferentes materiais isolantes; (iii) descargas corona, que ocorrem em dielétricos gasosos na presença de campos não homogêneos; (iv) impacto contínuo de descargas em dielétricos sólidos, formando “caminhos” de descarga (*treeing*, em português “arborescência”) [18].

2.4.2 Condições para a ocorrência de descargas parciais

A ocorrência de uma descarga parcial depende, a princípio, de que duas condições sejam satisfeitas. Uma dessas condições é que haja cargas livres (elétrons ou íons positivos) em uma determinada região do espaço [21]. A outra é que haja um campo elétrico intenso o suficiente para acelerar as cargas livres com energia necessária para iniciar um processo de avalanche [20].

Quando a rigidez dielétrica do meio que separa dois pontos com potenciais elétricos diferentes é rompida, ocorre uma descarga elétrica. O início, crescimento e finalização da descarga dependem de diversas variáveis, como o meio dielétrico, o tipo de tensão aplicada, condições ambientes, distribuição do campo elétrico, geometria dos eletrodos, entre outros [5].

Um átomo gasoso, assim como todo átomo, é composto de um núcleo com cargas elétricas positivas e elétrons carregados negativamente na órbita. Normalmente, os átomos gasosos têm carga elétrica zero pois as cargas positivas e negativas se cancelam e, diferentemente de materiais condutores, nos materiais isolantes os elétrons não têm mobilidade. Porém, sob certas circunstâncias, particularmente um alto campo elétrico, os gases tornam-se ionizados conforme os elétrons vão se tornando livres e ocorre fluxo de corrente elétrica. Isso

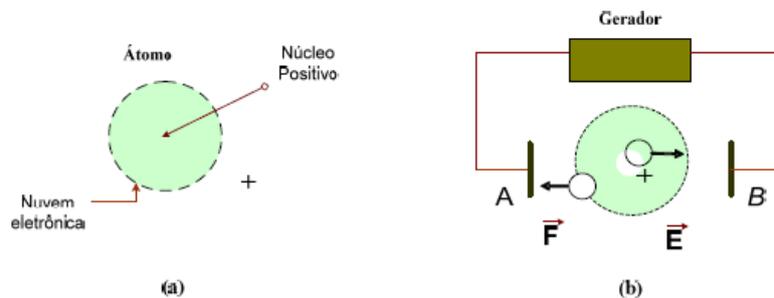
se manifesta através de descargas elétricas que se desenvolvem nas regiões de alto campo elétrico, causando faíscas (descargas de corrente baixa) ou arcs elétricos (descargas de alta energia) [19].

2.4.2.1 Ionização

Como o fenômeno de descargas parciais decorre de uma avalanche de elétrons provocada pelo processo de ionização dos átomos que compõem um material isolante, para compreendê-lo é necessário entender como são ionizados os átomos de um material dielétrico.

Imaginemos um campo elétrico uniforme (que é causado por uma diferença de potencial) no interior de um material isolante. Esse campo elétrico aplicado ao material dielétrico exerce uma força nos elétrons da camada mais externa dos átomos desse material. Ou seja, ele tenta arrancar os elétrons da camada de valência, mas como os elétrons são fortemente unidos aos seus átomos, o que ocorre na verdade é uma polarização do átomo. Portanto há um deslocamento de cargas positivas e negativas de suas posições de equilíbrio para posições mais periféricas no átomo. Os elétrons são submetidos a forças contrárias ao sentido do campo e o núcleo submetido a forças de mesmo sentido do campo (Figura 6). Quando houver um aumento do campo elétrico (por exemplo através do aumento da diferença de potencial), as forças internas não serão mais capazes de manter os elétrons da última camada presos aos átomos, portanto haverá um desprendimento desses elétrons. A partir desse momento, o átomo irá ficar ionizado positivamente e o elétron liberado encontrar-se-á livre pelo dielétrico [23].

Figura 6: Átomo de um material dielétrico. a) Átomo não polarizado. b) Forças no átomo quando se aplica \vec{E} .



Fonte: Bartnicas R., Corona Discharge Processes in Voids. In: R. Bartnicas, E. McMahon, Engineering Dielectrics: Corona Measurement and Interpretation. Vol. I, Chapter 2, Philadelphia, ASTM, 1979.

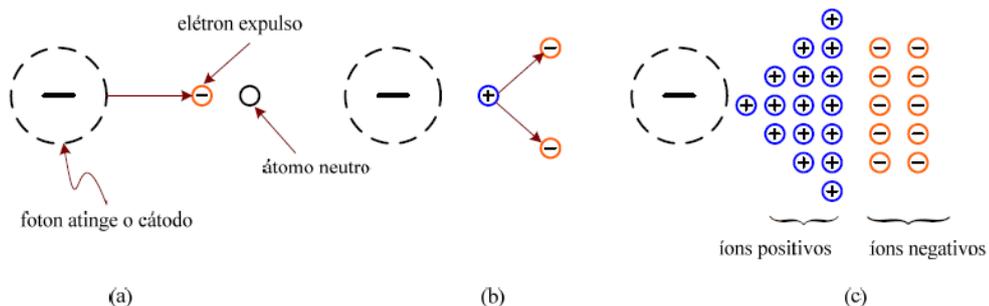
O processo da liberação deste elétron libera energia e pode culminar em uma descarga. No entanto, o processo principal que ocasiona as descargas é a ionização ocasionada pelo elétron que foi liberado. Esse elétron livre é acelerado pelo campo elétrico e colide com os

átomos neutros. Se a intensidade do campo for superior a um determinado valor crítico, a colisão com os átomos neutros será capaz de liberar elétrons destes. Os elétrons liberados comportam-se da mesma forma que o primeiro e as colisões se multiplicam cada vez mais no interior do dielétrico. Esse processo chama-se avalanche de elétrons (Figura 7). [23]

Os íons positivos deixados para trás no processo da avalanche de elétrons movem-se na direção do eletrodo negativo [22]. Porém isso acontece vagorosamente, uma vez que a massa do próton é aproximadamente 1835 vezes a massa do elétron [24]. Esses íons positivos atraem elétrons que estão vagando e volta-se a ter uma molécula neutra. Como o nível de energia de uma molécula neutra é menor do que o de um íon positivo, quando um elétron livre é capturado um quantum de energia é emitido pela molécula [22], [23]. Esse quantum de energia tem a mesma magnitude da energia que foi necessária inicialmente para deslocar o elétron para fora de sua molécula. Com a emissão do quantum de energia é irradiada uma onda eletromagnética cuja radiação está dentro do espectro de luz visível para moléculas de ar como o oxigênio e o nitrogênio. Portanto, um observador consegue enxergar essa radiação como uma luz violeta clara.

Caso não haja mais a fonte de energia, o processo de ionização cessará, mas a recombinação continuará até que não haja mais elétrons e nem íons positivos livres. Os elétrons e íons positivos provenientes desse processo são suficientes para conduzir corrente entre os eletrodos e absorver uma quantidade significativa de potência da fonte, fazendo com que surja uma centelha entre os eletrodos. Na ocorrência desse centelhamento, diz-se que há uma ruptura do material dielétrico. Caso a centelha não atravessar completamente o material dielétrico, que é o que geralmente acontece, ocorre uma descarga parcial [22].

Figura 7: Processo de avalanche de elétrons iniciado a partir de um eletrodo negativo. a) Início. b) Formação de um par de elétrons – Impacto de um elétron com um átomo neutro libera um elétron adicional e deixa um íon positivo para trás. c) Multiplicação – Os elétrons se movem criando íons positivos quando se multiplicam.



Fonte: [22].

2.4.2.2 Considerações sobre o campo elétrico

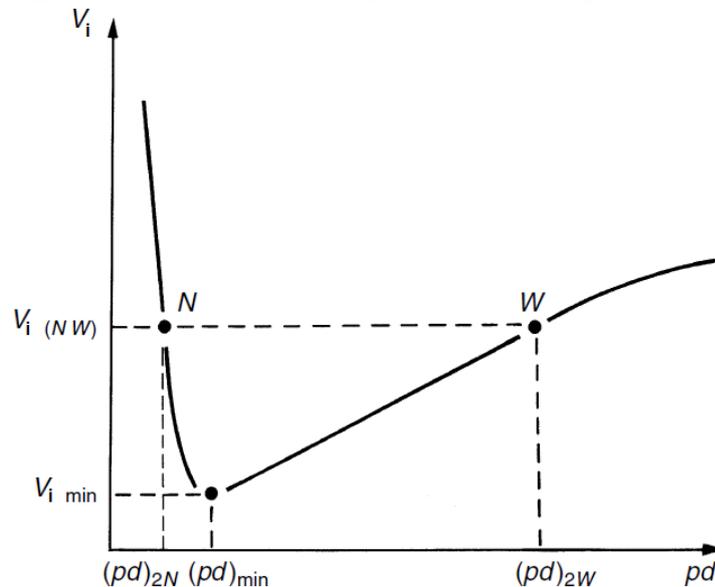
O campo elétrico influencia diretamente o processo de ionização dos elétrons de um material dielétrico, portanto tem um papel muito importante no surgimento das descargas parciais. A intensidade do campo elétrico está relacionada à magnitude da tensão, ao meio em que ele se encontra e à geometria dos eletrodos em que ele atua [22].

O campo elétrico no interior do isolante deve ser superior a um campo elétrico crítico de ruptura, determinando assim o campo de ignição para a ocorrência das descargas. Além disso, haverá um campo elétrico de extinção, abaixo do qual a ocorrência das descargas parciais cessará [21].

A condição de que o campo elétrico local deve ser mais do que certo valor de campo elétrico crítico é dada pela curva de Paschen (Figura 8) [18], que mostra que a tensão de ignição da descarga (V_i) depende do produto entre a pressão (p) e a distância entre os eletrodos (d) para um determinado gás e material. Além disso, variáveis como temperatura, geometria dos eletrodos e tamanho da cavidade também são importantes na análise das descargas [4], [18].

Na Figura 8 pode-se observar que a tensão de ignição (V_i) passa por um valor mínimo ($V_{i\ min}$) a um determinado valor do produto (pd_{\min}) [18], [21].

Figura 8: curva de Paschen. Relação entre tensão de ignição V_i e o produto pd .



Fonte: adaptado de [18].

Para qualquer distância entre eletrodos em um meio gasoso, existe uma pressão crítica na qual a descarga de ruptura se dá com um valor mínimo de tensão aplicada entre os eletrodos.

Com pressões acima e abaixo desses valores críticos, aumenta a tensão necessária para a ruptura do gás.

A Tabela 1 mostra alguns valores medidos na prática para as constantes de ignição $V_{i\ min}$ e pd_{min} de alguns gases.

Tabela 1: Constantes mínimas de ignição para alguns gases.

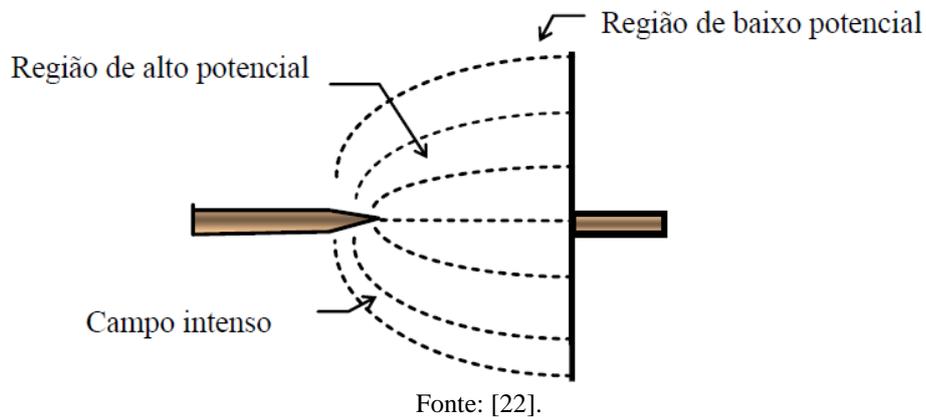
<i>Gas</i>	$(pd)_{min}$ <i>torr cm</i>	$V_{i\ min}$ <i>volts</i>
Air	0.55	352
Nitrogen	0.65	240
Hydrogen	1.05	230
Oxygen	0.7	450
Sulphur hexafluoride	0.26	507
Carbon dioxide	0.57	420
Neon	4.0	245
Helium	4.0	155

Fonte: adaptado de [18].

2.4.2.2.1 O campo elétrico e a geometria dos eletrodos

A distribuição da intensidade do campo elétrico é diretamente influenciada pela geometria dos eletrodos, uma vez que depende do gradiente da tensão aplicada ($\nabla V = \nabla \phi = -\vec{E}$). Como o gradiente da tensão aumenta quanto menor for a área do eletrodo, se o eletrodo for uma ponta, o gradiente de tensão é alto. Se, por outro lado, a mesma tensão for aplicada em um eletrodo com formato plano, o gradiente de tensão será bem menor [22]. A Figura 9 mostra um exemplo de eletrodo ponta-plano com um gás como meio dielétrico.

Figura 9: Eletrodo ponta-plano.



Perto da ponta o gradiente de tensão é maior, então a intensidade do campo elétrico também é maior. O elétron próximo à ponta pode ser acelerado até adquirir energia o suficiente para causar uma ionização. Perto do plano, com uma intensidade de campo elétrico menor, o elétron pode não adquirir energia o suficiente para causar uma ionização, logo a descarga fica limitada a uma região próxima à ponta [22].

2.4.3 Tipos de descargas parciais

A classificação das descargas parciais é normalizada pela IEC 60270 (2015), que afirma que, dependendo da sua localização, as descargas podem ser classificadas como: internas, superficiais e corona. A Figura 10 mostra uma representação dessas classificações.

Figura 10: Tipos de descargas parciais: (A) superficial, (B) corona, (C) interna.



Fonte: adaptado de [16].

2.4.3.1 Descarga parcial interna

As descargas internas são causadas por inclusões gasosas ou partículas (metal, vidro, fibras de celulose) em isolamento sólida, líquida ou impregnada. Vacúolos gasosos podem

aparecer na manufatura ou desenvolver-se durante testes de fabricação ou mesmo em uso, como consequência de estresses mecânicos, mudança de temperatura, sobrecarga ou sobretensão [25].

Ocorrem em inclusões de baixa rigidez dielétrica, geralmente vazios preenchidos com gás, presentes em materiais dielétricos sólidos utilizados em sistemas de isolamento de alta tensão [16].

Os principais fatores para a ocorrência de descargas parciais internas são as menores rigidez e permissividade dielétricas dos gases em comparação às dos isolamentos líquidos ou sólidos e consequente intensificação do campo elétrico no interior da cavidade com menor tensão de ruptura. Esse tipo de descarga pode ocorrer em qualquer parte do dielétrico, seja na junção de dois materiais dielétricos diferentes, nas regiões adjacentes ao eletrodo ou também onde o vazio está totalmente circundado pelo dielétrico [16], [21].

Existe um tipo particular de descarga parcial interna que se chama arborescência elétrica, em inglês *treeing*, ilustrada na Figura 11. O aspecto resultante assemelha-se à forma de uma árvore, daí o nome arborescência [28]. É um fenômeno de pré-ruptura que ocorre no material dielétrico e é causado pela repetitividade de descargas internas [26]. Dentre os mecanismos de envelhecimento sob ação do campo elétrico, destaca-se a arborescência como um dos principais causadores de defeitos em materiais poliméricos utilizados como isolantes [28].

Figura 11: Arborescência em polimetilmetacrilato



Fonte: [27].

2.4.3.2 Descarga parcial superficial

Este tipo de descarga ocorre em gases, líquidos ou na superfície de um material dielétrico, geralmente partindo do eletrodo em direção à superfície do dielétrico. O processo de descarga superficial inicia-se quando a componente de campo elétrico tangente à superfície exceder certo valor crítico [29].

Assim como as descargas internas causam alterações no interior do dielétrico, as descargas superficiais causam alterações na superfície do dielétrico, de forma que são iniciados caminhos condutores que se propagam ao longo da direção do campo elétrico. Esse fenômeno é conhecido como trilhamento (Figura 12), em inglês *tracking*, e pode ocasionar a ruptura completa do material dielétrico [25]. Normalmente esse tipo de descarga ocorre em saias de isoladores, cabos protegidos e terminações de cabos isolados e no sistema de alívio de barras de geradores [16].

Figura 12: Isolador bastão polimérico em processo de trilhamento bastante avançado.



Fonte: [30].

2.4.3.3 Descarga corona

Em regiões de campos não uniformes ocorrem diversas manifestações de descargas luminosas e audíveis antes de ocorrer a completa ruptura do dielétrico. Essas descargas podem ser transitórias ou permanentes e são conhecidas como descargas corona. É um fenômeno importante na engenharia de alta tensão, onde campos não uniformes são inevitáveis. Além disso, as descargas corona são responsáveis por perdas consideráveis em linhas de transmissão de alta tensão e frequentemente ocasionam deterioração da isolação pela ação combinada de íons de descarga bombardeando a superfície e componentes químicos que são formados pela descarga [18].

Descargas corona, também chamadas de descargas externas, ocorrem em gases a partir de pontas agudas em eletrodos metálicos, conforme Figura 13. Esses pontos concentradores de

estresses, partes com pequenos raios de curvatura, formam regiões nas vizinhanças do condutor com campo elétrico elevado (Figura 14), o qual ultrapassa o valor de ruptura do gás, dando origem à ocorrência de descargas parciais [16]. A tensão de iniciação das descargas depende do raio de curvatura da ponta do eletrodo e da tensão aplicada [21].

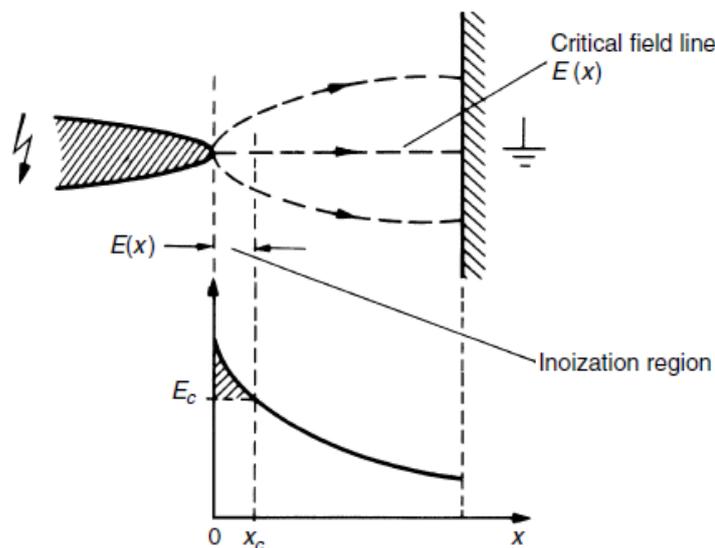
Descargas corona em ar produzem ozônio, que pode causar o fissuramento da isolamento polimérica. Ademais, óxidos de nitrogênio combinados com vapor d'água podem corroer materiais e formar depósitos condutores na isolação, provocando o trilhamento do material [25].

Figura 13: Exemplo de configuração que pode gerar descargas tipo corona.



Fonte: [21].

Figura 14: Distribuição do campo elétrico em uma região de campo não uniforme em função da distância dos eletrodos.



Fonte: [18].

2.5 TÉCNICAS PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

A solução do problema de detecção de isoladores defeituosos torna-se cada vez mais necessária para as empresas de energia elétrica, as quais buscam associar o aumento da confiabilidade do sistema à redução de custos [31].

A detecção e medida de descargas é baseada no intercâmbio da energia que ocorre durante a descarga. Esses intercâmbios manifestam-se através de: (i) pulsos de corrente elétrica; (ii) perdas dielétricas; (iii) radiação eletromagnética (luz); (iv) som (ruído); (v) aumento da pressão de gás; (vi) reações químicas. Portanto, as técnicas de detecção e medidas das descargas parciais devem se basear na observação de um dos fenômenos citados [18].

Nas redes de distribuição as técnicas de inspeção mais utilizadas são: rádio interferência (RFI), ultrassom e termovisão.

2.5.1 Interferência em Rádio Frequência (RFI)

A radiação de campos eletromagnéticos no espaço é uma das formas mais comuns de transmissão de informação, na qual se faz uso da técnica de modulação de uma onda portadora. O alcance e a capacidade de transporte de informação dependem do tipo de modulação, da frequência da portadora, da potência e sensibilidade do transmissor/receptor e da eficiência de acoplamento do conjunto emissor/meio/receptor [37].

A rádio interferência (RI) é a degradação da recepção de um sinal desejado causada por perturbações de radiofrequência. A interferência nas frequências de rádio, RFI (Radio Frequency Interference), é caracterizada por radiações eletromagnéticas emitidas por circuitos elétricos que geram sinais indesejados. A RFI também é conhecida como interferência eletromagnética (EMI) [38].

As descargas parciais, a partir do ponto de sua geração, produzem ondas eletromagnéticas de frequências características, podendo interferir sobre os sistemas de comunicação [33]. Nas redes de distribuição, as principais fontes geradoras de interferência em rádio frequência (RFI) são pequenos *gaps* nas ferragens de estruturas não aterradas, denominados de centelhamentos, descargas tipo corona e descargas internas. Os centelhamentos são a principal fonte de RFI (95%) e podem ser detectados na faixa de 1 a 1000MHz. As descargas corona são responsáveis por menos que 5% da RFI gerada nas redes

de distribuição, pois a descarga corona ocorre em tensões muito maiores que as aplicadas em linhas de distribuição [34].

Em [35], Shihab e Wong (2000) apresentam uma técnica para detecção de componentes em estado de falta como isoladores rachados e pára-raios com falhas em linhas de energia. Essa técnica utiliza pulsos de rádio frequência emitidos pelos componentes falhados como parâmetro de monitoração. Esses pulsos são capturados utilizando antena bicônica com uma faixa de frequência de 30MHz a 300MHz. Os pulsos de rádio frequência são armazenados, analisados e caracterizados utilizando processamento de sinais. Foi obtida uma boa caracterização de pulsos de RF no domínio do tempo utilizando parâmetros obtidos de análises estatísticas, como média, mediana, pico e autocorrelação. O segundo método de análise aplicado para caracterizar os pulsos é a Transformada Rápida de Fourier (FFT). A fim de extrair mais informações sobre os pulsos de RF, uma terceira análise, que é a junção da transformação tempo-frequência, é utilizada. Esses três diferentes métodos revelaram com sucesso marcas únicas de diferentes condições de falta em componentes de linhas de energia.

Na literatura há diversas faixas de frequência sugeridas para operação do detector de RFI. Por exemplo, no estudo realizado por Kowalski et al. (2006), a faixa de frequência compreendida entre 1,8MHz e 40,2MHz foi constatada como sendo a faixa ótima para a detecção de isoladores com descargas parciais. Chegou-se a essa conclusão por meio de experimentos em laboratório e em campo. O equipamento utilizado para esse estudo é o da Figura 15.

Figura 15: Equipamento Radar Engineers RFI Locator 240A.



Fonte: [36].

O método de detecção de descargas parciais por meio da interferência em frequências de rádio tem uma grande desvantagem de captar muita interferência do ambiente, fazendo com que as leituras sejam alteradas. Além disso, outro problema é a sensibilidade do equipamento, pois o mesmo não consegue identificar a fonte dos centelhamentos e sim a direção das ondas eletromagnéticas percebidas [39].

2.5.2 Ultrassom

As ondas de ultrassom são ondas sonoras cuja frequência de oscilação está acima de 20kHz, sendo que o ouvido humano consegue interpretar sons de frequências compreendidas entre aproximadamente 20Hz e 20kHz. Portanto, a tecnologia de detecção de descargas parciais por meio do ultrassom baseia-se em detectar ondas sonoras em frequências acima daquelas percebidas pelo sistema auditivo do ser humano. Nas redes de distribuição, as principais fontes de ultrassom são descargas parciais, corona, arcos ou trilhamentos [40], [41].

Para a detecção do ultrassom gerado pela rede de distribuição, é necessário utilizar equipamentos específicos os quais detectam as ondas ultrassônicas através de um transdutor piezoelétrico que converte o ruído sonoro em sinal elétrico. Por meio de um circuito esse sinal é convertido em sinal audível. Há alguns equipamentos disponíveis no mercado que possuem somente um fone de ouvido para que o operador ouça o ruído do sinal de ultrassom e outros equipamentos têm, além do fone, um indicador de intensidade sonora em dBu [5], [32]. A Figura 16 mostra como é feita a inspeção da rede de distribuição utilizando o equipamento de ultrassom.

Figura 16: Inspeção elétrica com equipamento de ultrassom.



Fonte: [3].

Na Figura 17 pode-se observar o detector de ultrassom SDT 170 utilizado para a inspeção instrumental de isoladores. Esse equipamento possui um sensor acoplado à antena parabólica para que se possa realizar medidas direcionais (ponto a ponto). Ele realiza medições de sinais compreendidos entre -10dBu e 120dBu e opera na faixa de frequência entre 16kHz e 190kHz. Além disso, possui mira a laser para permitir que o operador mire diretamente no ponto em que se deseja fazer a inspeção [5], [32].

Figura 17: SDT 170.



Fonte: [42].

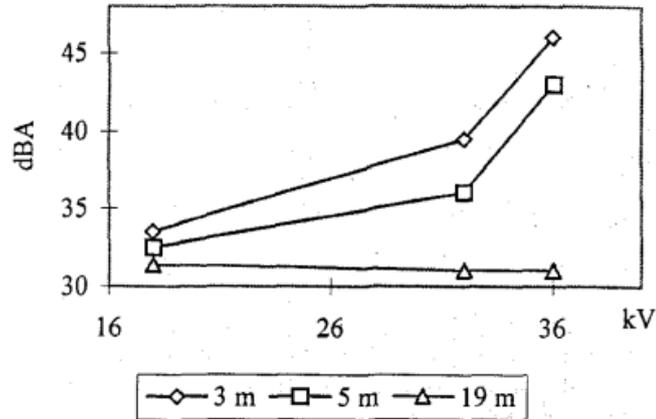
A inspeção da rede de distribuição utilizando a técnica do ultrassom tem razoável assertividade e é segura por ser executada pelo operador fora da área de risco da rede elétrica. Além disso, Lundgaard (1992a) destaca também as vantagens de que os métodos acústicos para detecção de descargas parciais são não-invasivos (a rede elétrica continua funcionando normalmente durante a inspeção) e imunes a ruído eletromagnético.

Um sério problema que influencia na assertividade deste método é a dependência da experiência audível do operador. Ou seja, diferentes operadores podem chegar a diagnósticos distintos.

Um estudo de Lundgaard (1992b) relata a influência que a distância entre a fonte de ruído e o equipamento de medição tem sobre o resultado da medição. Quando essa distância é muito grande, haverá excesso de interferência ambiente, não permitindo a localização precisa da fonte das descargas parciais. Além disso, nesse artigo Lundgaard (1992b) conclui que a combinação das técnicas acústica e elétrica para detecção de descargas parciais mostra-se muito efetiva para evitar alarmes falsos.

Jermendy et al (1998) apresentam uma discussão sobre resultados de testes feitos em isoladores de pino de vidro e porcelana sob condições de laboratório. De acordo com seus experimentos, as técnicas de detecção ultrassônica e sistema de visão noturna são recomendadas como métodos diagnósticos para isoladores de pino de porcelana. Além do mais, nesse artigo os autores identificaram que o melhor resultado produzido utilizando a técnica do ultrassom foi detectando a descarga parcial a uma distância de 1,5m da fonte da descarga, numa faixa de frequências de 35 a 45kHz. Outro resultado interessante, que pode ser visualizado no gráfico da Figura 18, apresenta a correlação entre a intensidade do ultrassom em função da tensão aplicada e da distância do sensor de ultrassom da fonte da descarga parcial. De acordo com os resultados, pode ser estabelecido que os valores dos parâmetros acústicos aumentam com o aumento do nível de tensão. A localização acústica dos ruídos de uma grande distância representa um problema, pois a sensibilidade da medição é notavelmente reduzida.

Figura 18: Intensidade do ultrassom em função da tensão aplicada e da distância do sensor de ultrassom.



Fonte: [45].

2.5.3 Termovisão

A termografia baseia-se no fenômeno físico de que todo objeto com temperatura acima de zero absoluto ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), emite radiação eletromagnética em função da excitação das moléculas pelas quais é constituído. Quanto maior for a temperatura, maior é a excitação molecular e, conseqüentemente, maior é a intensidade da radiação emitida. Assim, a temperatura de um objeto pode ser determinada pela intensidade da radiação emitida por sua superfície, fato utilizado pela termografia para realizar medidas de temperatura e visualizar a distribuição térmica de uma determinada superfície, sem a necessidade de contato físico [47].

Isoladores com falha irão possibilitar passagem de corrente elétrica entre o potencial da rede e a terra, porém exercerão um comportamento de resistência naquele ponto e ocorrerá dissipação de calor no isolador devido ao efeito Joule [39].

A transferência de calor por radiação eletromagnética é invisível a olho nu, pois acontece em comprimentos de ondas na faixa do infravermelho ($0,7$ a $1000\text{ }\mu\text{m}$). Nesse caso são utilizadas câmeras especiais, chamadas de termovisores, cuja função é converter essa radiação em imagem visível ao ser humano [48]. A Figura 19 mostra um termovisor.

Figura 19: Termovisor NEC modelo TH 5100.



Fonte: [5].

A inspeção de redes de distribuição com termovisores é realizada com o equipamento instalado sobre um veículo que se desloca com uma velocidade média de 20 km/h. Ao se identificar um ponto quente nas estruturas, o veículo para e novas imagens são feitas para se confirmar o ponto quente [5]. A Figura 20 mostra o trabalho de inspeção de redes de distribuição com a utilização do termovisor.

Figura 20: Inspeção de redes de distribuição com termovisor.



Fonte: [49].

Na Figura 21 pode-se observar a imagem termográfica de isoladores em uma linha de distribuição, sendo que o primeiro isolador de disco da cadeia apresenta um aquecimento se comparado aos demais isoladores e cabos [31].

Figura 21: Imagem termográfica de cadeia de isoladores em uma linha de distribuição.



Fonte: [31].

A inspeção de isoladores utilizando a técnica de termovisão apresenta vantagens como: verificação em tempo real, trabalho à distância em local seguro e boa sensibilidade dos termovisores. Por outro lado, somente consegue-se detectar falhas nos isoladores com alto nível de falha e há uma dependência da experiência do operador e das condições climáticas [39].

3 METODOLOGIA

Como já mencionado na Seção 1.1, o objetivo deste trabalho é demonstrar o padrão das curvas de pulsos de descargas parciais. Para obter a forma de onda de uma descarga parcial, precisou-se simular a ocorrência dessa descarga, portanto foi montada uma bancada de ensaios descrita a seguir. Para captar a descarga parcial, utilizou-se um microfone de ultrassom, pois ela emite sons em frequências acima das audíveis pelo ouvido humano.

Este capítulo apresenta os componentes, equipamentos e *softwares* que foram utilizados para montar a bancada de ensaios para simular e captar descargas parciais. Além disso, expõe as condições ambientais que foram simuladas. Por fim, é mostrada a forma de tratamento dos dados obtidos com o microfone de ultrassom.

3.1 EXPERIMENTAL

A simulação da ocorrência de uma descarga parcial foi feita aplicando tensão contínua em dois eletrodos metálicos, um pontiagudo e o outro plano em formato circular, conforme ilustrado na Figura 9, formando o chamado conjunto de eletrodos ponta-plano.

3.1.1 Equipamentos, eletrodos e softwares utilizados

Foram utilizados dois eletrodos para os ensaios, ambos forjados em aço inoxidável e sem rebarbas ao longo da superfície, para evitar a criação de campos elétricos indesejáveis. O eletrodo ponta (Figura 22:Figura 22) tem diâmetro do corpo de 8mm e altura de 8cm. O eletrodo plano (Figura 23) tem formato de disco com 25cm de diâmetro e 3mm de espessura.

Figura 22: Eletrodo ponta.



Fonte: do Autor.

Figura 23: Eletrodo plano.



Fonte: do Autor.

A parte de cima do eletrodo ponta e a parte de baixo do eletrodo plano foram rosqueadas a isoladores de resina da classe de 25kV (Figura 24), pois serão aplicadas tensões da ordem de até 10kV.

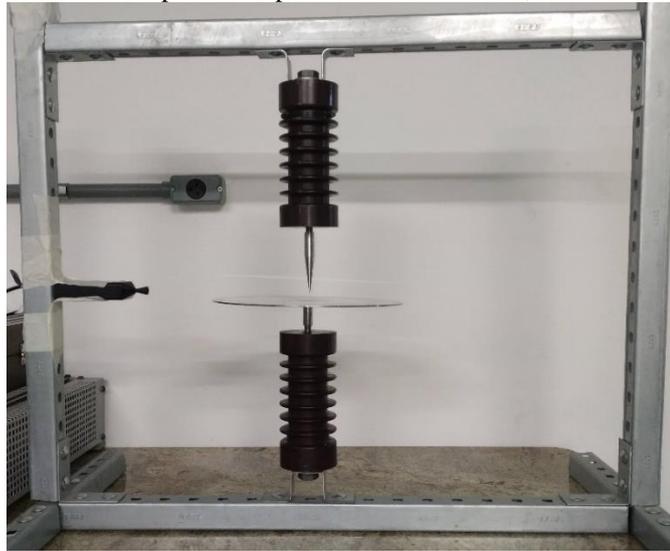
Figura 24: Isoladores de resina classe 25kV.



Fonte: do Autor.

Para fixar os isoladores, os eletrodos e o microfone de ultrassom, foi montada uma estrutura de perfilados (Figura 25). Assim, com os eletrodos rosqueados aos isoladores, pode-se controlar a distância (*gap*) entre os eletrodos simplesmente rosqueando mais ou menos. Para medir essa distância, foram utilizadas placas de compensado com diferentes espessuras.

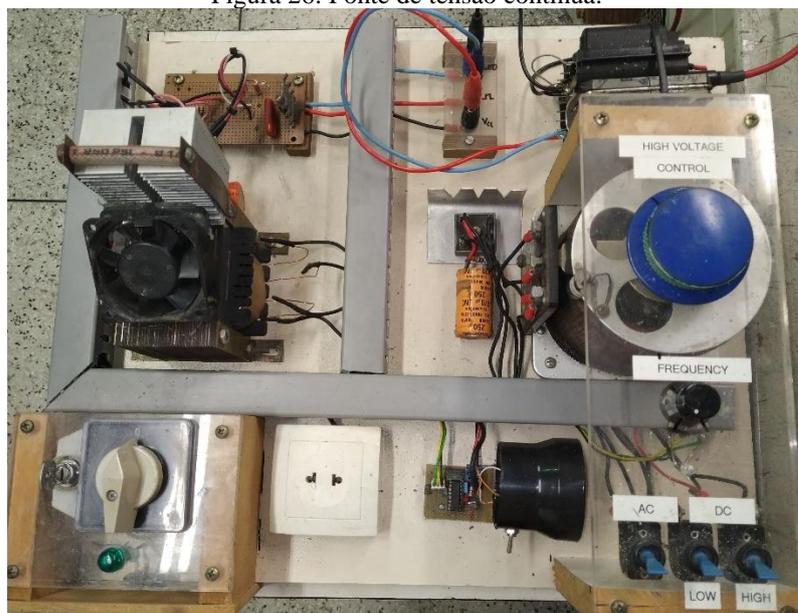
Figura 25: Estrutura de perfilados para fixar os isoladores, eletrodos e microfone.



Fonte: do Autor

Para aplicar tensão nos eletrodos metálicos foi utilizada uma fonte de tensão contínua (Figura 26) disponibilizada pelo Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Regional de Blumenau (FURB). A fonte consegue atingir uma tensão contínua de até 13kV. O pólo positivo da fonte foi ligado ao eletrodo ponta e o pólo negativo (terra) foi ligado ao eletrodo plano. Se o pólo negativo fosse ligado ao eletrodo ponta, seriam necessárias tensões maiores para que a descarga parcial iniciasse. A tensão da fonte foi elevada lentamente até atingir a tensão de ignição da descarga parcial.

Figura 26: Fonte de tensão contínua.



Fonte: do Autor.

Para medir a tensão da fonte que estava sendo aplicada nos eletrodos, utilizou-se uma ponta de prova para alta tensão (Figura 27), modelo PPA-440, marca Instrutherm. A tensão máxima da ponta de prova é de 40kV DC/ 40kV AC (pico) ou 28kV AC (rms). A relação de transformação da ponta de prova é de 1000:1V, ou seja, quando a fonte estiver aplicando 1000V nos eletrodos, o multímetro mostrará 1V.

Figura 27: Ponta de prova PPA-440 Instrutherm.



Fonte: [52].

A ponteira da ponta de prova foi ligada ao eletrodo ponta (positivo), o cabo “jacaré” ao eletrodo plano (terra) e os outros dois cabos foram ligados em um multímetro (Figura 28) modelo ET-1610 da marca Minipa.

Figura 28: Multímetro ET-1610 Minipa.



Fonte: do Autor.

Para captar os sons emitidos pelas descargas foi utilizado o microfone de ultrassom da marca Pettersson, modelo M500 (Figura 29). Seguem especificações [50]:

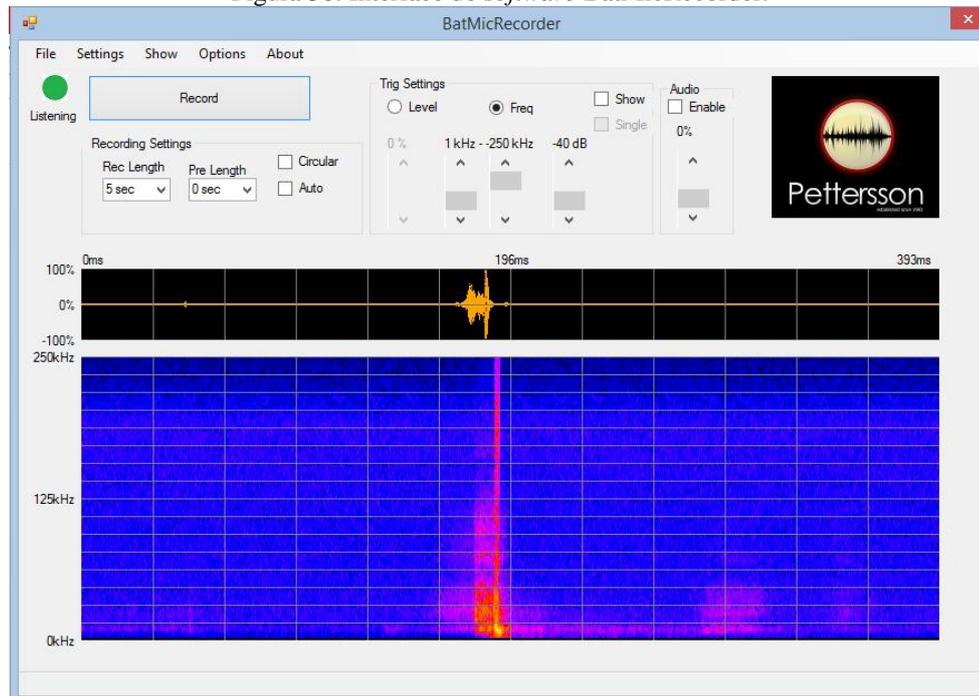
- Microfone: eletreto avançado;
- Frequência de amostragem: 500 kHz;
- Resolução ADC: 16 bits;
- Faixa de frequência: 10kHz – 210kHz;
- Interface: USB 2.0, alta velocidade, OTG / host;
- Filtro anti-aliasing: 8ª ordem, 210 kHz;
- Monitoramento em tempo real: Através da placa de som do PC (*down-sampling*);
- Tamanho: 43 x 114 x 13 mm (incluindo microfone chifre);
- Peso: 60 g;
- Alimentação: barramento USB;
- Sistema operacional: Windows 7, Windows 8, Windows 8.1, Windows 10.

Figura 29: Microfone ultrassônico M500 Pettersson.



Fonte: [50].

O microfone de ultrassom possui um *software* próprio para gravar a emissão de ruídos. O *software* chama-se BatMicRecorder (Figura 30) e os ruídos são gravados em arquivo de extensão *.wav*, que pode ser processado por outros *softwares* como o *Matlab* e o *LABView*.

Figura 30: Interface do *software* BatMicRecorder.

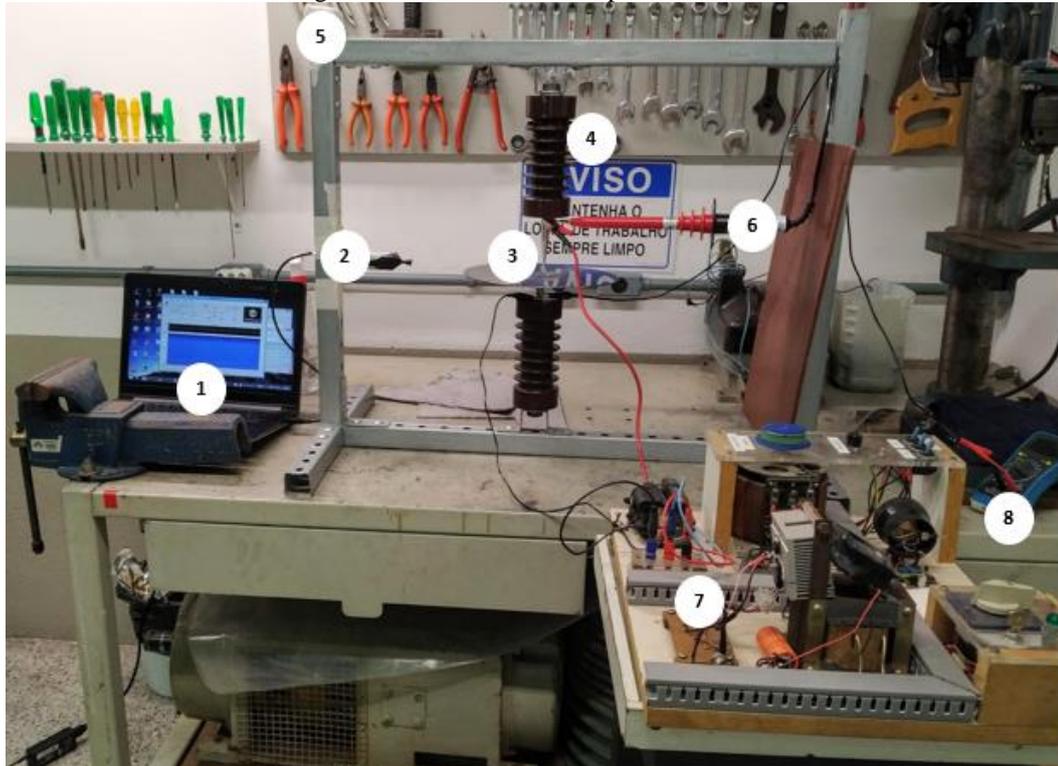
Fonte: do Autor.

Para a manipulação dos dados dos arquivos *.wav* foi utilizado o *software Matlab* versão R2015a em conjunto com o Microsoft Excel 2016. O computador utilizado tem o sistema operacional Windows 8.1, 64 bits, processador Intel Core i7, memória RAM de 8,00GB e HD de 1TB.

3.1.2 Montagem da bancada para os ensaios

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Alta Tensão da FURB. O arranjo para os ensaios foi montado de modo que a estrutura de perfilados sustentasse o conjunto dos isoladores e eletrodos. O microfone foi fixado na estrutura de perfilados a uma distância de 21 cm da ponta do eletrodo cônico. Ao lado do arranjo foi posicionada a fonte de tensão, sendo que o terminal de alta tensão foi ligado ao eletrodo ponta e o terra ao eletrodo plano. Para medir a tensão aplicada, foi utilizada a ponta de prova em conjunto com o multímetro. Ao lado do arranjo ficou posicionado o computador, em cuja entrada USB foi conectado o microfone. A Figura 31 mostra a bancada montada e a Tabela 2 apresenta uma relação de todos os elementos utilizados para o experimento.

Figura 31: Bancada montada para os ensaios.



Fonte: do Autor.

Tabela 2: Itens para a montagem da bancada de ensaios.

Item	Descrição
1	Computador
2	Microfone ultrassônico
3	Eletrodos ponta e plano
4	Isoladores
5	Estrutura para suporte
6	Ponta de prova
7	Fonte de tensão contínua
8	Multímetro

Fonte: do Autor.

3.1.3 Condições ambientais simuladas

A constante exposição dos isoladores a intempéries ambientais pode fazer com que as descargas parciais ocorram mais facilmente e, como consequência, a degradação do equipamento ocorrerá de forma mais rápida. Alguns exemplos de intemperismos naturais são: poluição do ambiente no qual o isolador está instalado e condições atmosféricas como temperatura, umidade, chuva, maresia e exposição aos raios ultravioleta (UV). Como os isoladores estão constantemente expostos a condições como essas, os ensaios foram feitos simulando três condições ambientais diferentes: local seco e limpo, local úmido e com salinidade e local úmido e sujo.

Os ensaios com poluição artificial em isoladores de vidro e porcelana utilizados em sistemas de alta tensão em corrente contínua são normalizados pela ABNT NBR 16724 [53]. Antes de cada ensaio, o isolador deve ser cuidadosamente limpo, de forma que todos os vestígios de impurezas sejam removidos [53].

Segundo a norma ABNT NBR 16724 (2018), são recomendados os seguintes métodos de ensaio de poluição:

- a) Ensaio de névoa salina, onde o isolador é submetido a uma poluição ambiental especificada;
- b) Ensaio da camada sólida, onde uma camada razoavelmente uniforme de poluição sólida especificada é depositada sobre a superfície do isolador.

O procedimento de ensaio de névoa salina simula a poluição quando uma camada líquida condutiva cobre a superfície do isolador. Na prática, esta camada não contém qualquer quantidade significativa de material insolúvel. A solução salina deve ser feita com cloreto de sódio (NaCl) de pureza comercial e água potável. A salinidade utilizada deve ter um dos seguintes valores (em quilogramas por metro cúbico) [53]:

2,5 – 3,5 – 5 – 7 – 10 – 14 – 20 – 28 – 40 – 56 – 80 – 112 – 160 – 224.

A névoa é produzida na câmara de ensaio por meio de um número determinado de bicos nebulizadores que atomizam ou pulverizam a solução por meio de uma corrente de ar comprimido fluindo em ângulo reto em relação ao bico condutor da solução [53].

A norma ABNT NBR 16724 (2018) determina que o procedimento de ensaio da camada sólida simula uma poluição na qual uma camada sólida, contendo sais e materiais inertes, se estabelece na superfície do isolador. Quando umidificada, esta camada se torna

condutora. A suspensão contaminante deve ser preparada usando a seguinte composição: 40g de caulim, 1000g de água potável e uma quantidade adequada de NaCl de pureza comercial. Essa suspensão deve ser aplicada por pulverização ou gotejamento sobre o isolador seco e previamente limpo, para obter uma camada razoavelmente uniforme.

Como não se dispunha de câmara de névoa, os ensaios simulando diferentes condições ambientais foram realizados utilizando-se:

- a) Uma solução de NaCl a 5% borrifada sobre os eletrodos, para simular a névoa salina;
- b) Uma mistura de lama fina e água para sujar os eletrodos e simular a condição de ambiente úmido e poluído.

Além disso, também foram feitos ensaios com os isoladores limpos e secos, para comparar os resultados.

3.1.3.1 Eletrodos secos e limpos

As primeiras medidas foram feitas com os eletrodos secos e limpos (Figura 32). Essa situação seria a ideal.

Figura 32: Eletrodos secos e limpos.



Fonte: do Autor.

3.1.3.2 Eletrodos molhados com solução salina

Após as medidas realizadas com os eletrodos secos e limpos, borrifou-se sobre eles uma solução salina a 5%, como indica a norma ABNT NBR 16724 (2018), para simular um ambiente próximo ao mar.

Figura 33: Eletrodos molhados com solução salina.



Fonte: do Autor.

3.1.3.3 Eletrodos sujos com lama

No que se refere aos aspectos ambientais, pode-se considerar que a poluição e a sujeira podem acumular-se na superfície dos isoladores, tornando-a condutiva quando em contato com a umidade da atmosfera e, por conseguinte, reduzindo suas características isolantes. Esse fenômeno é conhecido como *tracking* e se trata de circulação de corrente sobre a superfície do isolador. O *tracking* causa aquecimento, que desencadeia em danos na isolação. Devido à existência desse fenômeno, a terceira bateria de ensaios foi feita com os eletrodos sujos com lama fina e bem molhada (Figura 34) para simular um isolador com poluição acumulada.

Figura 34: Eletrodos sujos com lama.



Fonte: do Autor.

3.2 ANÁLISE DOS DADOS

3.2.1 Rotina para leitura dos dados e plotagem dos gráficos no domínio do tempo

A rotina para análise dos dados foi feita no *software Matlab* versão R2015a. Na primeira linha do código tem-se a função *wavread*, responsável por ler o arquivo *.wav* gerado pelo microfone de ultrassom.

```
[y,fs]=wavread('nome do arquivo .wav');
```

A função *wavread* retorna os dados amostrados na variável *y*, à taxa de amostragem na variável *fs*. Os dados de *y* variam de -1 a 1, pois o *Matlab* não capta os dados de amplitude do arquivo *.wav*. O número de dados captados em *y* corresponde à multiplicação da frequência de amostragem (500kHz) pelo tempo de gravação (em segundos). O tempo de gravação do arquivo *.wav* foi definido como sendo de 10 segundos no *software* BatMicRecorder (Figura 30). Portanto o número de dados de *y* será de $500000 \times 10 = 5000000$.

A próxima linha de código cria o vetor de tempo para plotar o gráfico em função do tempo.

```
t=linspace(0,length(y)/fs,length(y));
```

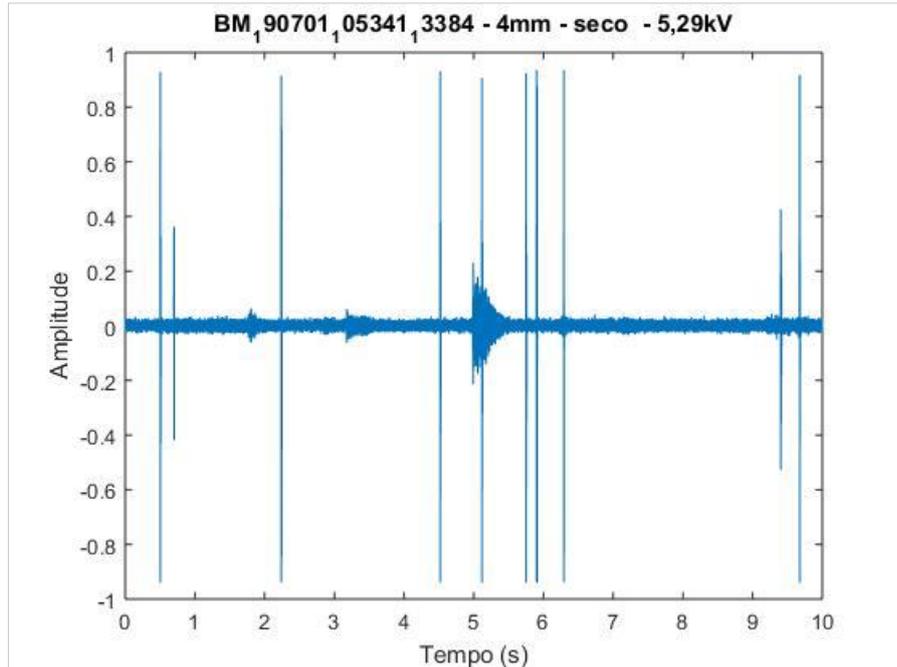
O tempo inicial será de 0s. O tempo final é $length(y)/fs$, ou seja, o número de dados de *y* dividido pela frequência de amostragem. Esse valor é igual ao tempo de gravação (em segundos) do arquivo *.wav*, no caso 10 segundos. O número de pontos é $length(y)$, ou seja, o mesmo número de amostras de *y*, para que os dois vetores tenham o mesmo tamanho, possibilitando a plotagem do gráfico *t x y*.

Agora, tendo os vetores *t* e *y* do mesmo tamanho, é só plotar o gráfico usando a função *plot*.

```
plot(t,y);
```

Esse gráfico representará o tempo total de gravação e nele será possível observar vários pulsos de descargas parciais. Na Figura 35 é mostrado um gráfico extraído da gravação *BM_190701_105341_13384.wav*, com pulsos de descargas parciais obtidos em condições de eletrodos secos, com distância de 4mm entre eles e tensão de 5,29kV.

Figura 35: Gráfico obtido da gravação de pulsos de descargas parciais com distância de 4mm entre os eletrodos e tensão de 5,29kV.



Fonte: do Autor.

A Figura 35 apresenta um gráfico com vários pulsos de descargas parciais, porém para analisar o espectro de frequências de um pulso é necessário isolar os pulsos individualmente. Para isso foi criada uma rotina que isola um só pulso.

3.2.2 Rotina para leitura e análise de um pulso de descarga parcial

Para uma análise mais precisa dos gráficos foi necessário isolar os pulsos de descarga parcial. Isso foi feito diminuindo-se o tempo de análise para o tempo em que efetivamente ocorre o pulso. Assim, cada pulso de descarga foi analisado separadamente. O tempo que foi definido para análise de um pulso foi de 2ms.

Foi utilizada a função *wkeep*, que serve para manter somente uma parte de um vetor ou matriz. Essa função extrai um subvetor do vetor *y*, com tamanho *s*, começando do ponto *FIRSTR* e terminando no ponto *FIRSTC*.

```
y=wkeep(y,s,[FIRSTR FIRSTC]);
```

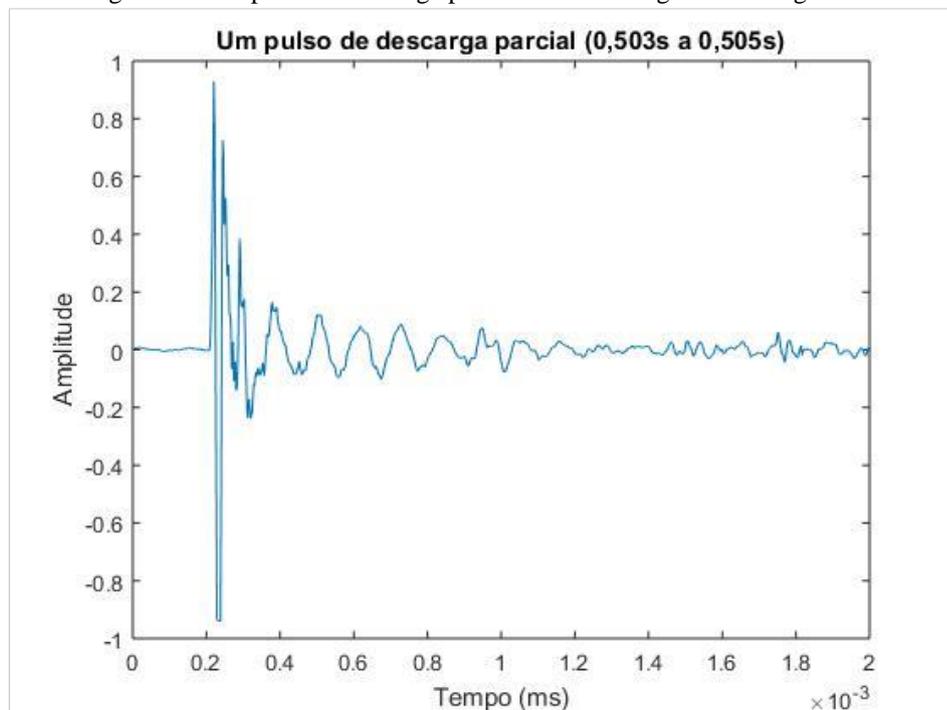
Como foi criado um novo vetor *y*, é necessário criar também um novo vetor *t* para plotar o gráfico no domínio do tempo.

```
t=linspace(0,length(y)/fs,length(y));
plot(t,y)
```

A Figura 36 mostra um pulso isolado do gráfico da Figura 35. O pulso dura do instante 0,503 até 0,505 segundos, com duração de 2ms. Os pontos inicial e final podem ser obtidos através de uma regra de três: como o tempo total de gravação é 10 segundos e tem-se 5000000 pontos, então o instante 0,503 segundos é o ponto de número $\frac{0,503 \times 5000000}{10} = 251500$ e o instante 0,505 segundos corresponde ao ponto $\frac{0,505 \times 5000000}{10} = 252500$. O tamanho do novo vetor y será portanto de 1000 pontos. Então, para se obter o gráfico desse único pulso, a função *wkeep* é aplicada da seguinte forma:

```
y=wkeep(y,1000,[251500 252500]);
```

Figura 36: Um pulso de descarga parcial extraído do gráfico da Figura 35.



Fonte: do Autor.

Agora, isolado um pulso de descarga parcial, pode-se avançar para a etapa de análise no domínio da frequência.

3.2.3 Rotina para plotagem dos gráficos no domínio da frequência

O próximo passo é obter a resposta no domínio da frequência. Para isso serve a análise de Fourier, que converte um sinal no domínio do tempo para uma representação no domínio da frequência. Neste trabalho utilizou-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*), que é um algoritmo eficiente para se calcular a Transformada Discreta de Fourier

(DFT - *Discrete Fourier Transform*). A Equação 1 mostra a fórmula da Transformada Discreta de Fourier.

$$X_k = \sum_{i=0}^{n-1} x_i e^{-j2\pi ik/n} \quad \text{para } k = 0, 1, 2, \dots, n-1. \quad (1)$$

Na Equação 1, x é a sequência no domínio do tempo, X é a DFT e n é o número de amostras em ambos os domínios discretos de tempo e frequência. Implementar diretamente a DFT conforme a Equação 1 exige aproximadamente n^2 operações complexas. Entretanto, utilizando algoritmos computacionalmente eficientes consegue-se obter a transformada utilizando pouco mais de $n \log_2(n)$ operações. Esses algoritmos são as FFTs [51].

Para calcular a FFT no *Matlab*, deve-se primeiramente especificar o número de pontos para calcular a FFT, o *Nfft*. Neste caso, serão 1024 pontos de amostragem.

```
Nfft=1024;
```

O próximo passo é a criação do vetor de frequência para o gráfico no domínio da frequência.

```
f=linspace(0,fs,Nfft);
```

O vetor de frequência, f , varia de 0 até a frequência de amostragem, com 1024 pontos de amostragem.

Agora, pode-se realizar a FFT de *Nfft* pontos das amostras contidas em y . A função *abs* foi utilizada pois o que importa neste momento é somente o valor absoluto do sinal.

```
X=abs(fft(y,Nfft));
```

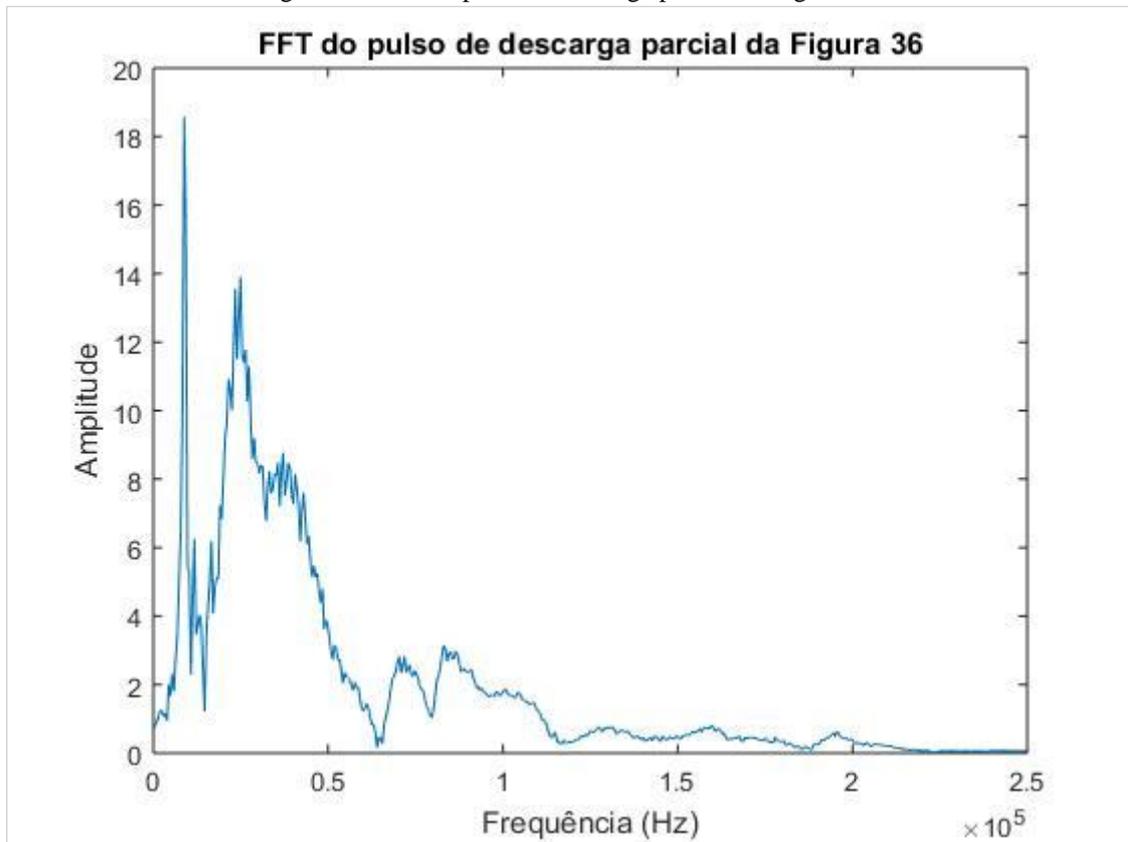
Pode-se finalmente plotar o gráfico no domínio da frequência.

```
figure ; plot(f(1:Nfft/2),X(1:Nfft/2))
```

O valor de *Nfft* foi dividido por 2, pois o gráfico seria espelhado após metade do valor da frequência de amostragem fs .

A Figura 37 apresenta o gráfico no domínio da frequência obtido a partir da curva no domínio do tempo mostrada na Figura 36.

Figura 37: FFT do pulso de descarga parcial da Figura 36.



Fonte: do Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

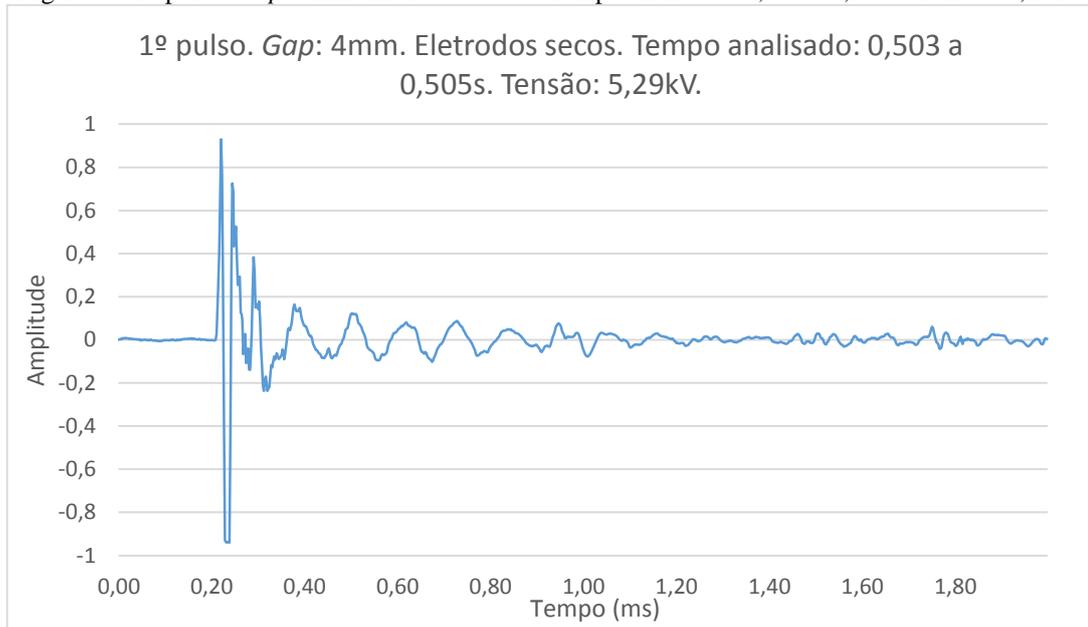
Este capítulo apresenta os resultados obtidos após a manipulação dos arquivos *.wav* obtidos do microfone de ultrassom e seguindo o passo a passo apresentado na Seção 3.2. Os ensaios foram feitos com os eletrodos: a) secos, b) molhados com solução salina, c) sujos com lama. As descargas parciais foram medidas com várias distâncias entre os eletrodos, de 2mm a 9mm. Porém, devido ao grande número de gráficos, foram escolhidos para serem mostrados aqui os resultados obtidos com as distâncias de 4mm e 6mm. Para a distância de 4mm, serão apresentadas adiante 3 amostras de pulsos de descargas parciais obtidas para cada condição ambiental simulada. Para a distância de 6mm também serão apresentadas 3 amostras de pulsos de descargas parciais obtidas para cada condição ambiental simulada.

4.1.1 Distância entre os eletrodos: 4mm. Eletrodos secos.

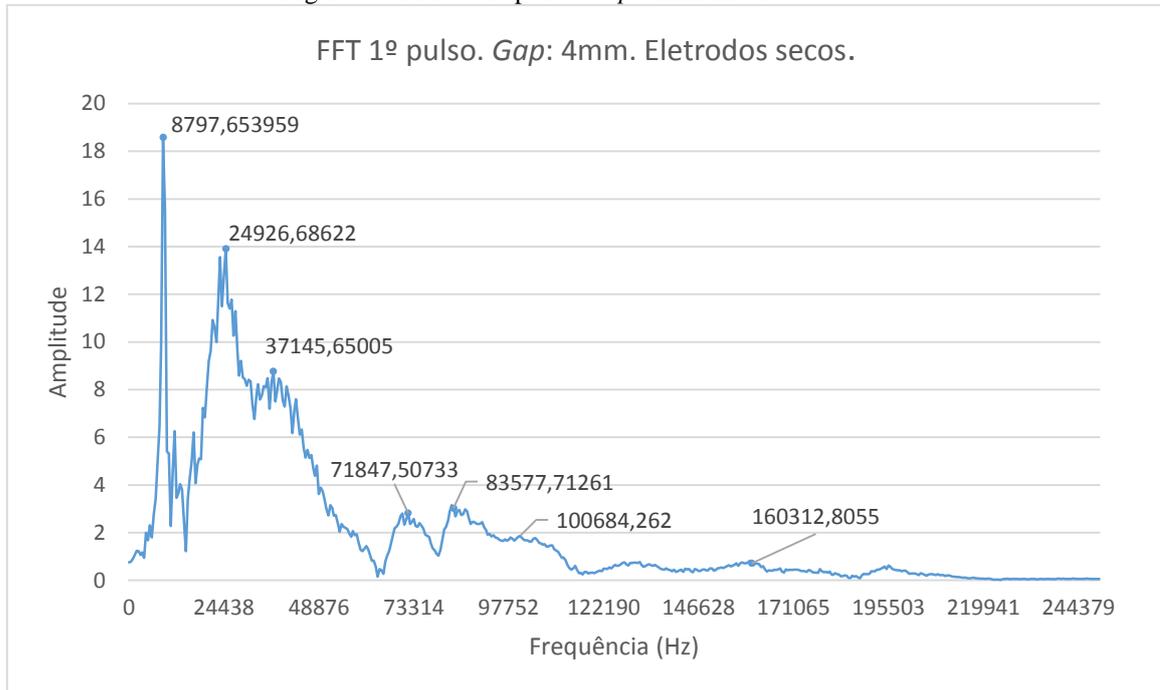
A tensão de ignição de descarga parcial para a distância (*gap*) de 4mm entre os eletrodos limpos e secos foi de 5,29kV. O tempo analisado em todas as amostras é de 2ms. O arquivo analisado é o *BM_190701_105341_13384.wav* e tem um tempo total de 10 segundos.

4.1.1.1 1º pulso

Figura 38: 1º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos secos. Tempo analisado: 0,503 a 0,505s. Tensão: 5,29kV

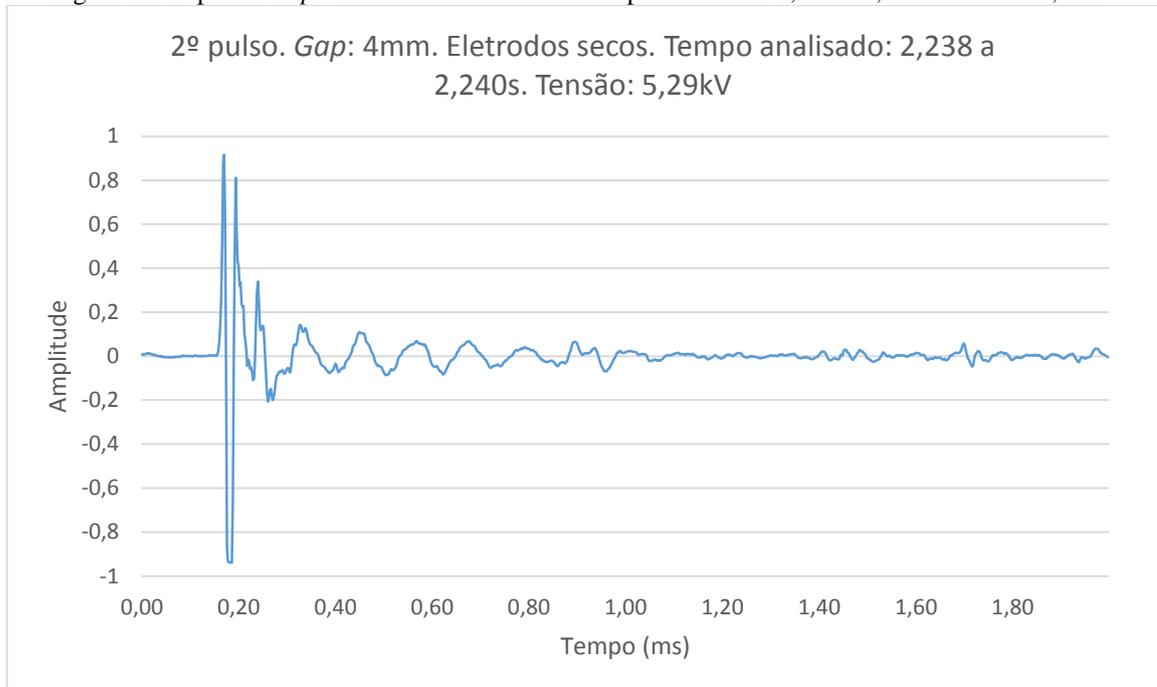


Fonte: do Autor.

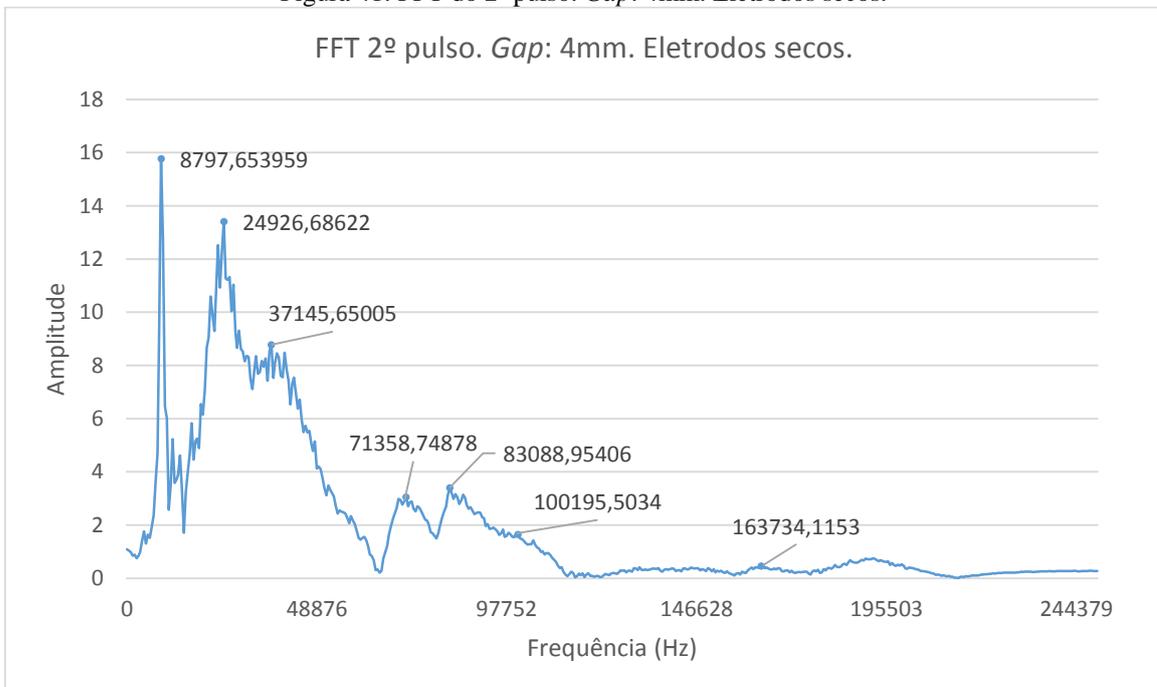
Figura 39: FFT do 1º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos secos.

Fonte: do Autor.

4.1.1.2 2º pulso

Figura 40: 2º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos secos. Tempo analisado: 2,238 a 2,240s. Tensão: 5,29kV

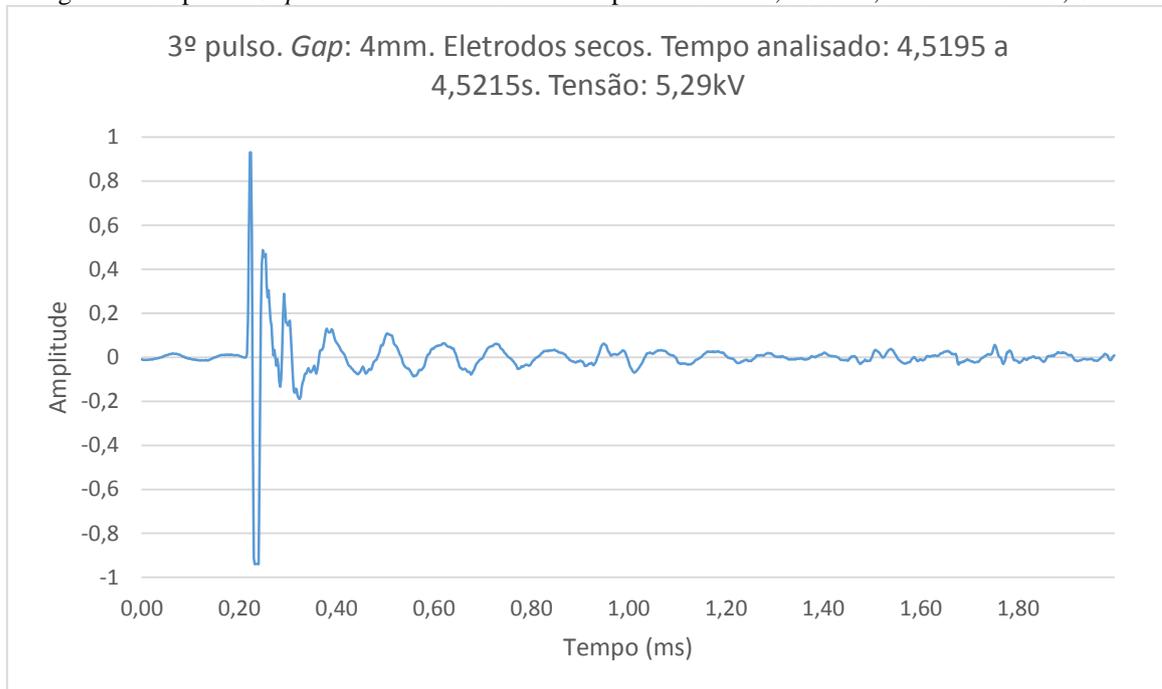
Fonte: do Autor.

Figura 41: FFT do 2º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos secos.

Fonte: do Autor.

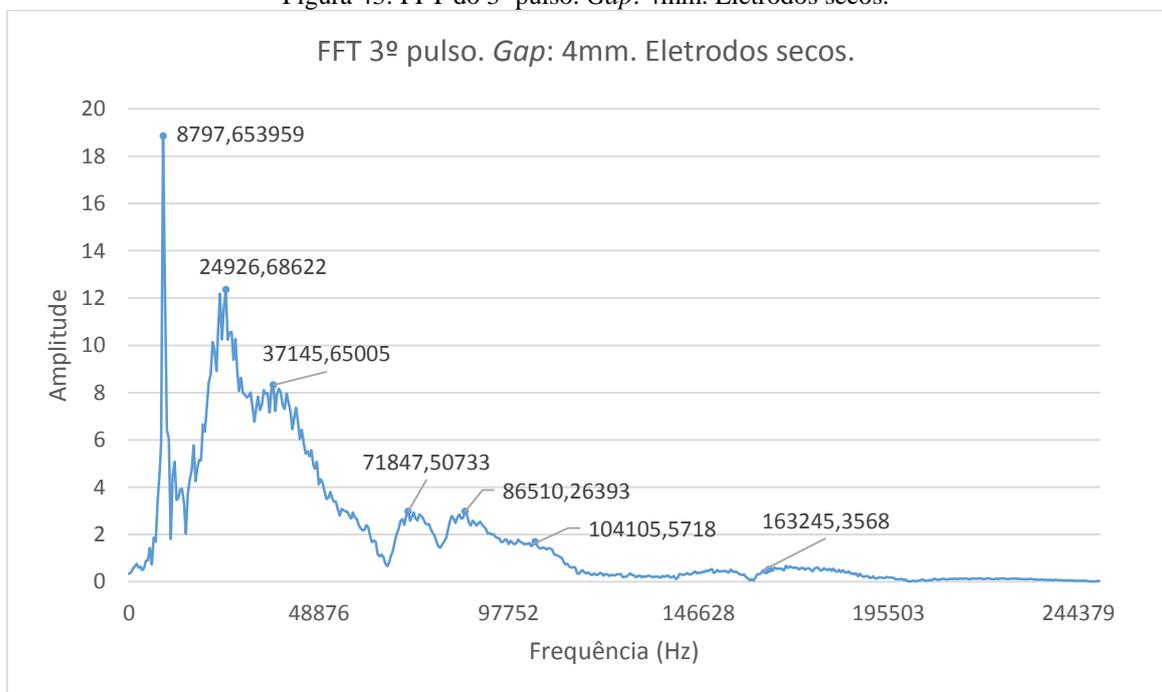
4.1.1.3 3º pulso

Figura 42: 3º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos secos. Tempo analisado: 4,5195 a 4,5215s. Tensão: 5,29kV.



Fonte: do Autor.

Figura 43: FFT do 3º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos secos.

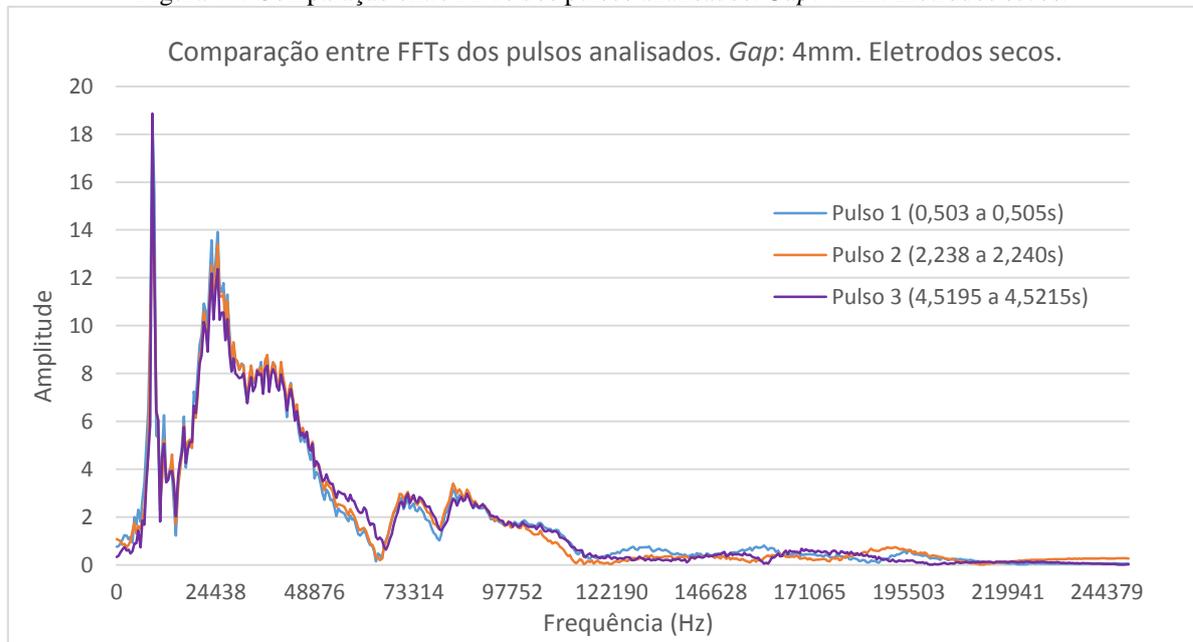


Fonte: do Autor.

4.1.1.4 Comparação entre as FFTs dos pulsos analisados. Distância entre os eletrodos: 4mm. Eletrodos secos.

Ao comparar os espectros de frequência dos três pulsos obtidos sob mesmas condições, mesma distância entre eletrodos e mesma tensão, pode-se observar que os três gráficos contêm frequências fundamentais muito parecidas. A Figura 44 apresenta uma sobreposição dos gráficos das FFTs dos pulsos analisados e comprova que as frequências se assemelham consideravelmente. O mesmo é observado através da Tabela 3, que exhibe quais são as principais componentes de frequências presentes nos pulsos analisados.

Figura 44: Comparação entre FFTs dos pulsos analisados. Gap: 4mm. Eletrodos secos.



Fonte: do Autor.

Tabela 3: Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). Gap: 4mm. Eletrodos secos.

Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). Gap: 4mm. Eletrodos secos.		
1º pulso	2º pulso	3º pulso
8797	8797	8797
24296	24296	24296
37145	37145	37145
71847	71358	71847
83557	83088	86510
100684	100195	104105
160312	163734	163245

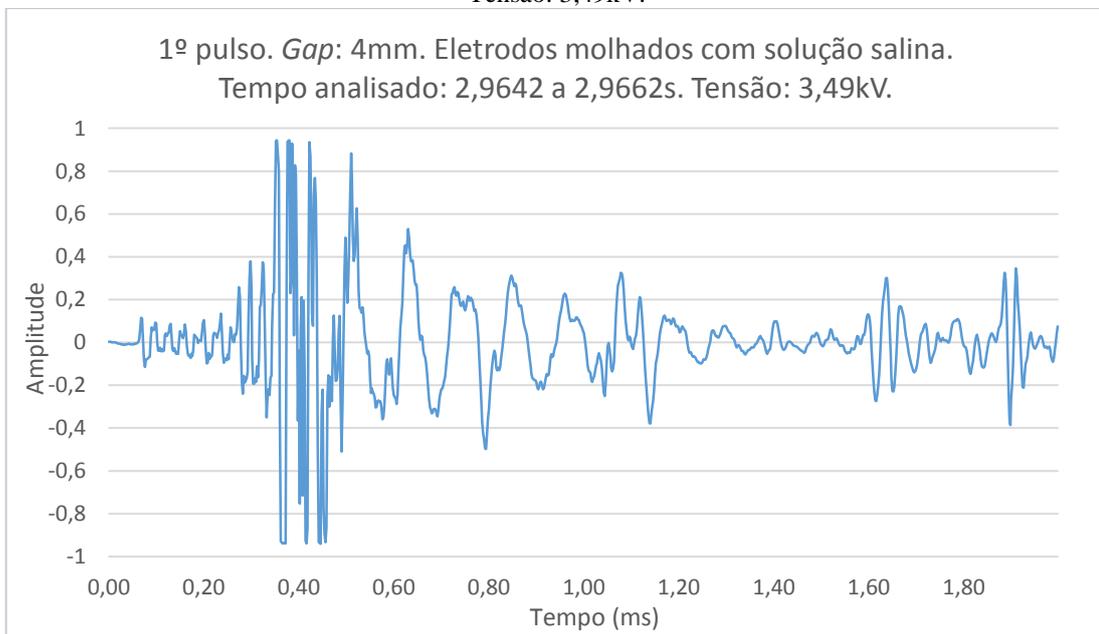
Fonte: do Autor.

4.1.2 Distância entre os eletrodos: 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.

A tensão de ignição de descarga parcial para a distância (*gap*) de 4mm entre os eletrodos molhados com solução salina foi de 3,49kV. O tempo analisado em todas as amostras é de 2ms. O arquivo analisado é o *BM_190701_105727_13384.wav* e tem um tempo total de 10 segundos.

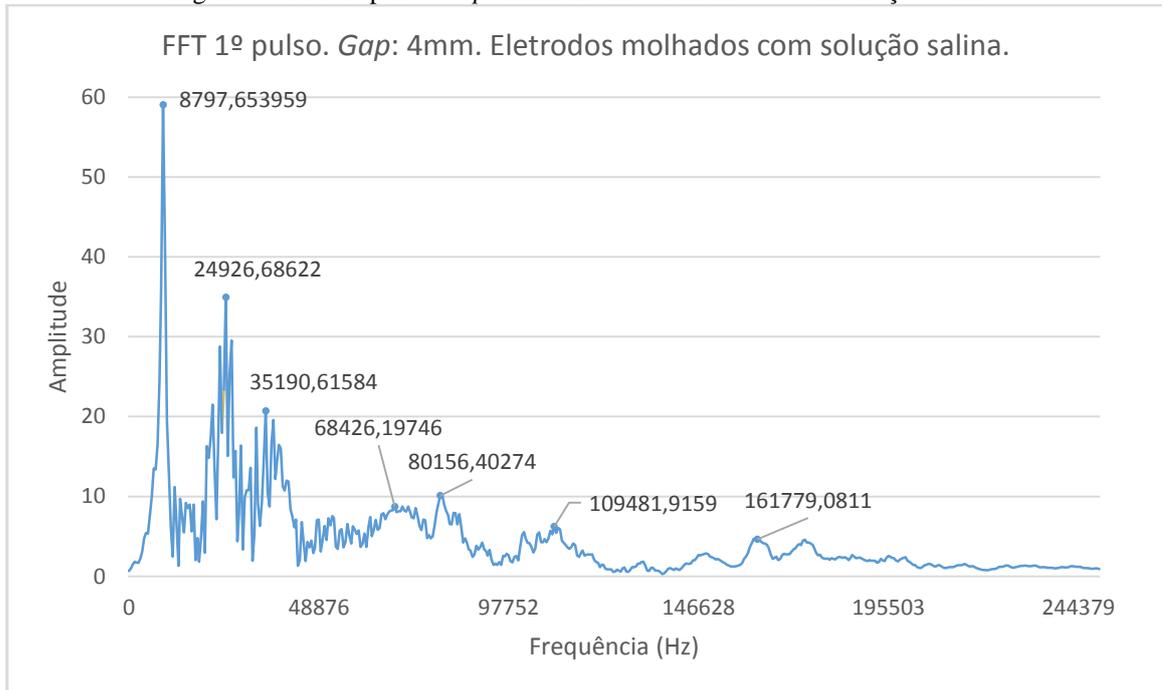
4.1.2.1 1º pulso

Figura 45: 1º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos molhados com solução salina. Tempo analisado: 2,9642 a 2,9662s. Tensão: 3,49kV.



Fonte: do Autor

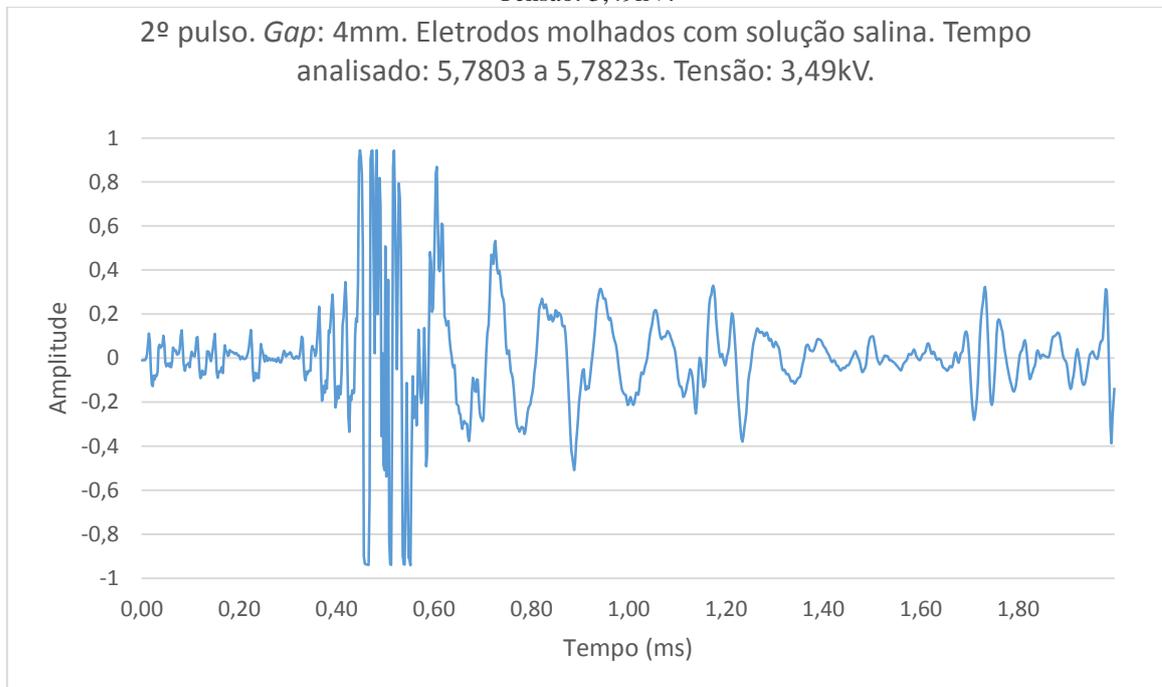
Figura 46: FFT 1º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.



Fonte: do Autor.

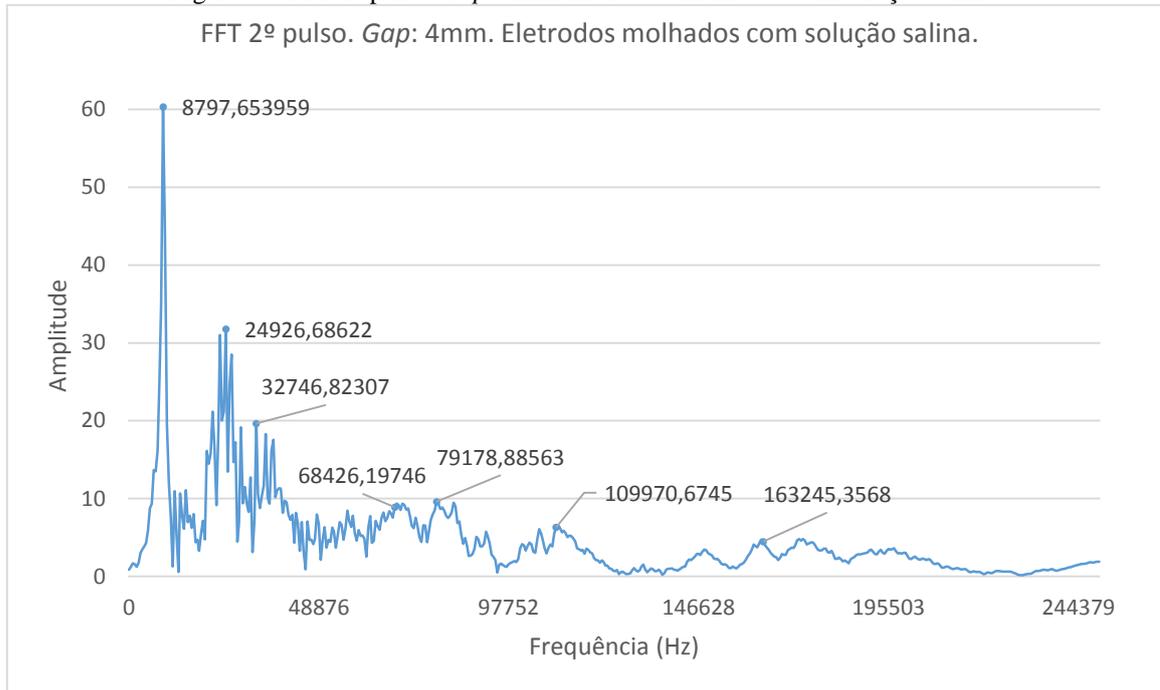
4.1.2.2 2º pulso

Figura 47: 2º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos molhados com solução salina. Tempo analisado: 5,7803 a 5,7823s. Tensão: 3,49kV.



Fonte: do Autor.

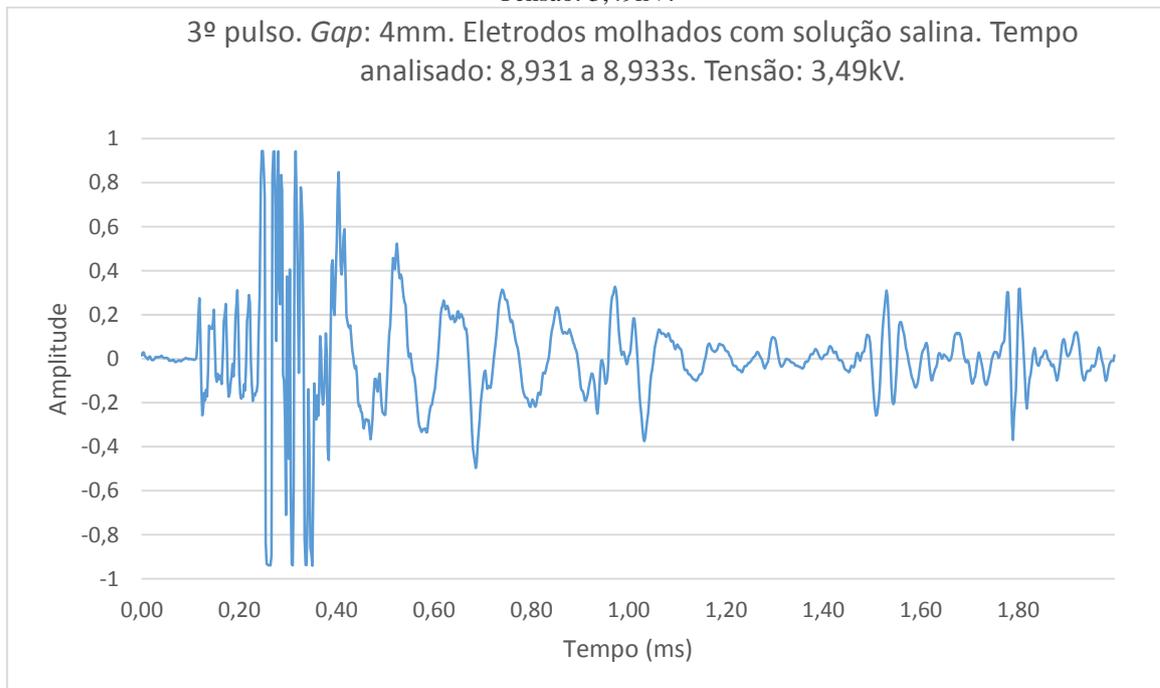
Figura 48: FFT 2º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.



Fonte: do Autor.

4.1.2.3 3º pulso

Figura 49: 3º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos molhados com solução salina. Tempo analisado: 8,931 a 8,933s. Tensão: 3,49kV.



Fonte: do Autor.

Figura 50: FFT 2º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.



Fonte: do Autor.

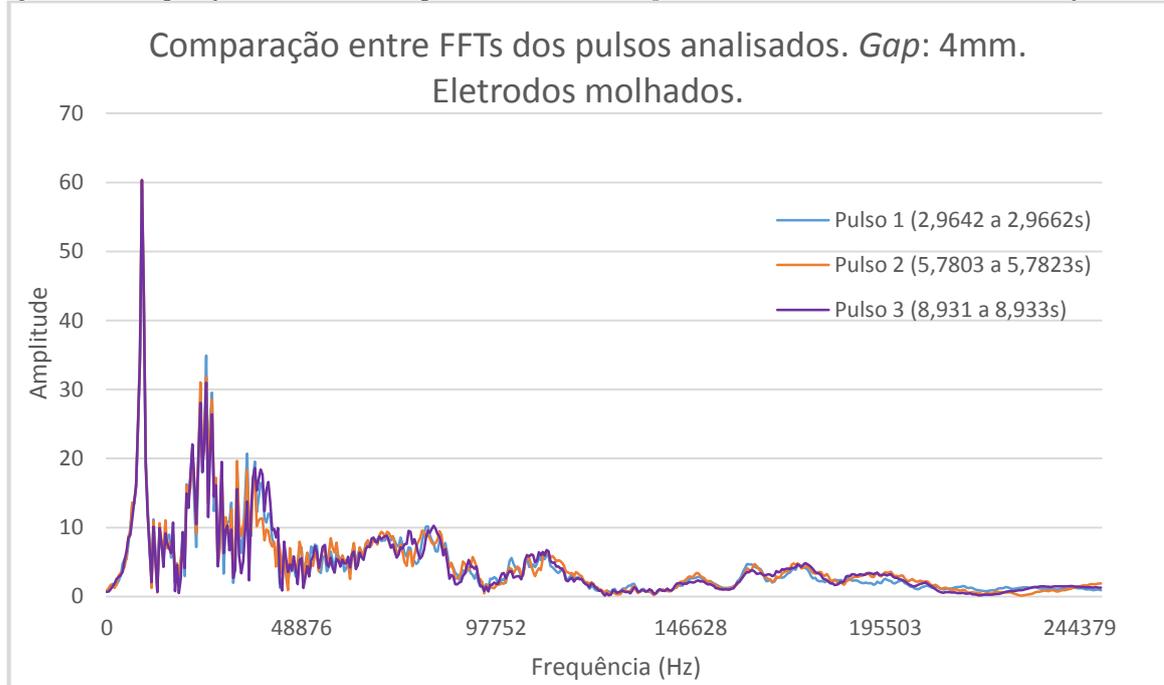
4.1.2.4 Comparação entre as FFTs dos pulsos analisados. Distância entre os eletrodos: 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.

Ao comparar os espectros de frequência dos três pulsos obtidos com os eletrodos molhados com solução salina, pode-se observar que os três gráficos contêm frequências fundamentais muito parecidas. A Figura 51 apresenta uma sobreposição dos gráficos das FFTs dos pulsos analisados e comprova que as frequências se assemelham consideravelmente. O mesmo é observado através da Tabela 4, que exhibe quais são as principais componentes de frequências presentes nos pulsos analisados.

Percebe-se uma alteração significativa nas curvas dos pulsos em função do tempo, uma vez que visivelmente não ocorreu somente um pulso de descarga no período analisado de 2ms. Observa-se que houve também descargas com amplitudes menores ocorrendo nesse período, o que afetou os valores das amplitudes dos gráficos da FFT. Porém, mesmo com essa ocorrência, os valores de frequências fundamentais e os formatos dos espectros mostram-se muito similares aos da situação de eletrodos secos.

Além disso, pode-se notar que a tensão de ignição das descargas para a condição de eletrodos molhados com solução salina foi de 3,49kV. Como esperado, esse valor é menor do que o da tensão de ignição para a condição de eletrodos secos, 5,29kV.

Figura 51: Comparação entre FFTs dos pulsos analisados. *Gap*: 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.



Fonte: do Autor.

Tabela 4: Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). *Gap*: 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.

Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). Gap: 4mm. Eletrodos molhados com solução salina.		
1º pulso	2º pulso	3º pulso
8797	8797	8797
24296	24296	24296
35190	32746	37145
68426	68426	69403
80156	79178	82111
109481	109970	110459
161779	163245	162756

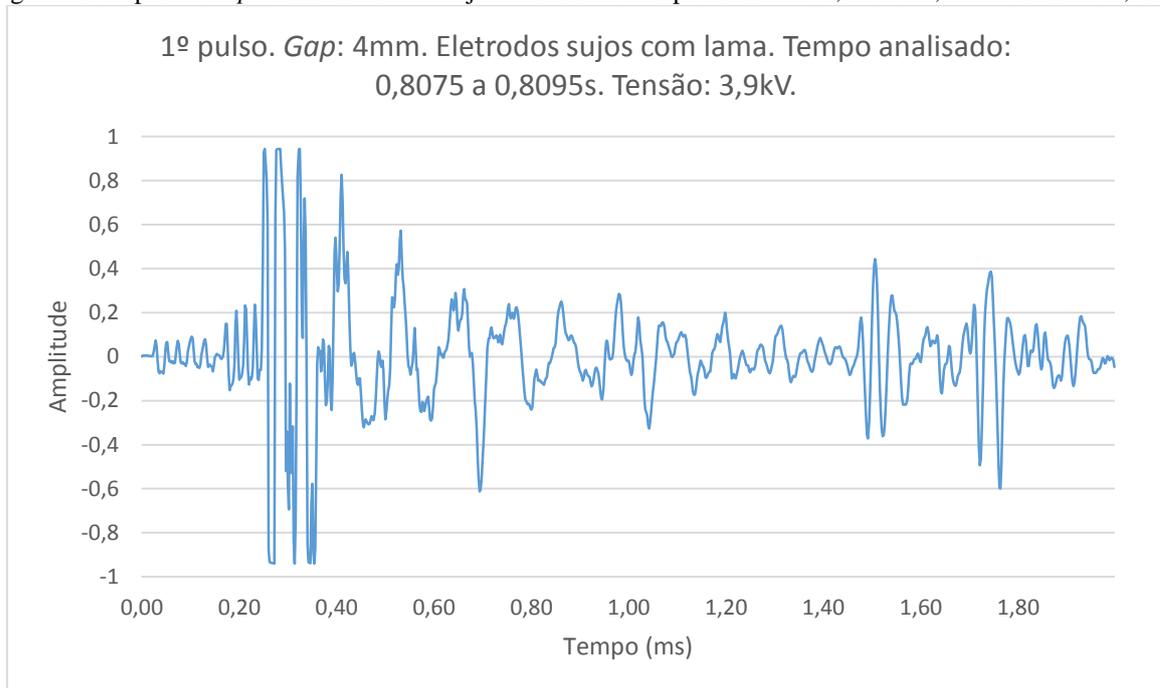
Fonte: do Autor.

4.1.3 Distância entre os eletrodos: 4mm. Eletrodos sujos com lama.

A tensão de ignição de descarga parcial para a distância (*gap*) de 4mm entre os eletrodos sujos com lama foi de 3,9kV. O tempo analisado em todas as amostras é de 2ms. O arquivo analisado é o *BM_190701_165822_13384.wav* e tem um tempo total de 10 segundos.

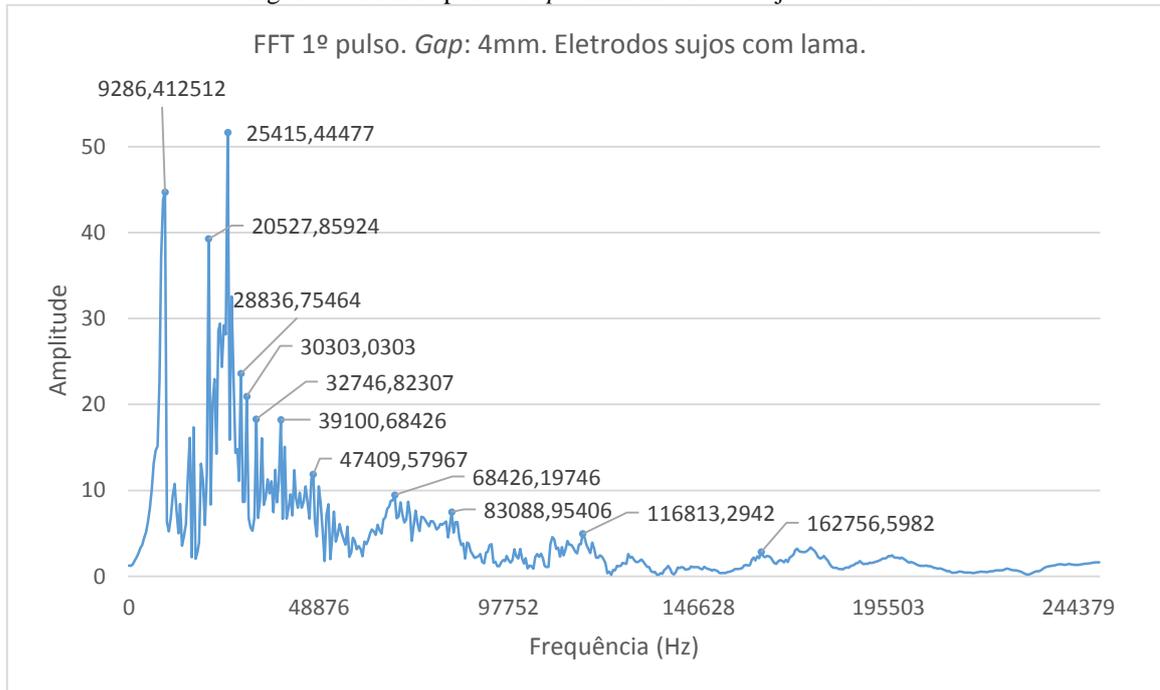
4.1.3.1 1º pulso

Figura 52: 1º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos sujos com lama. Tempo analisado: 0,8075 a 0,8095s. Tensão: 3,9kV.



Fonte: do Autor.

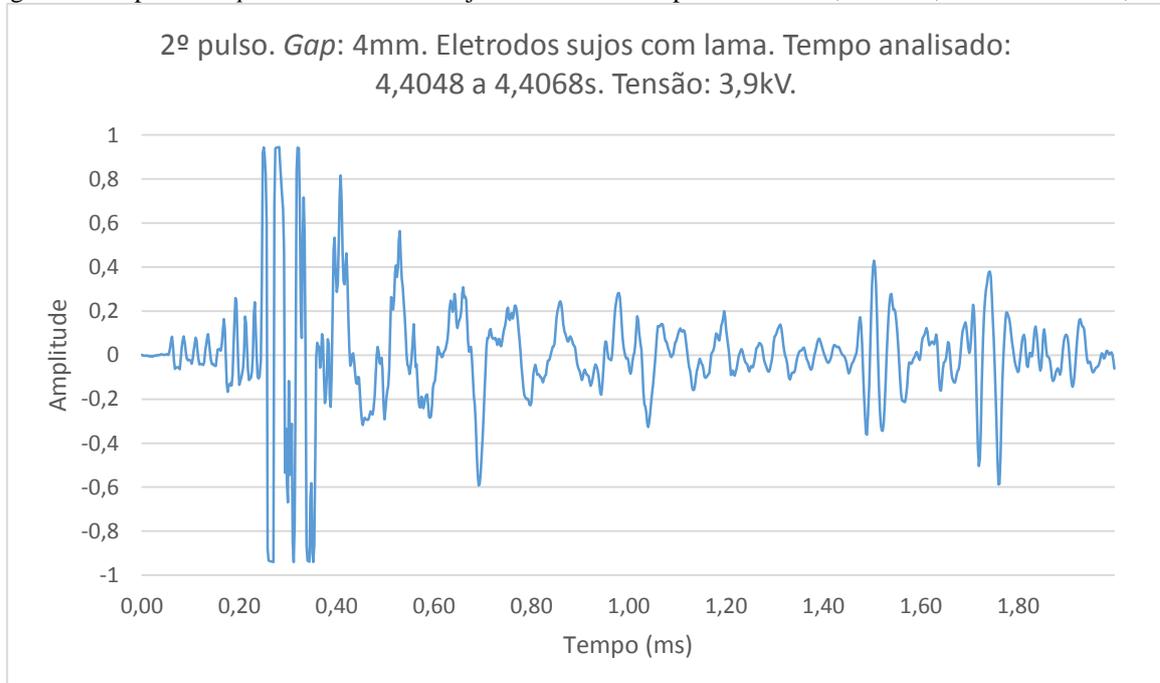
Figura 53: FFT 1º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos sujos com lama.



Fonte: do Autor.

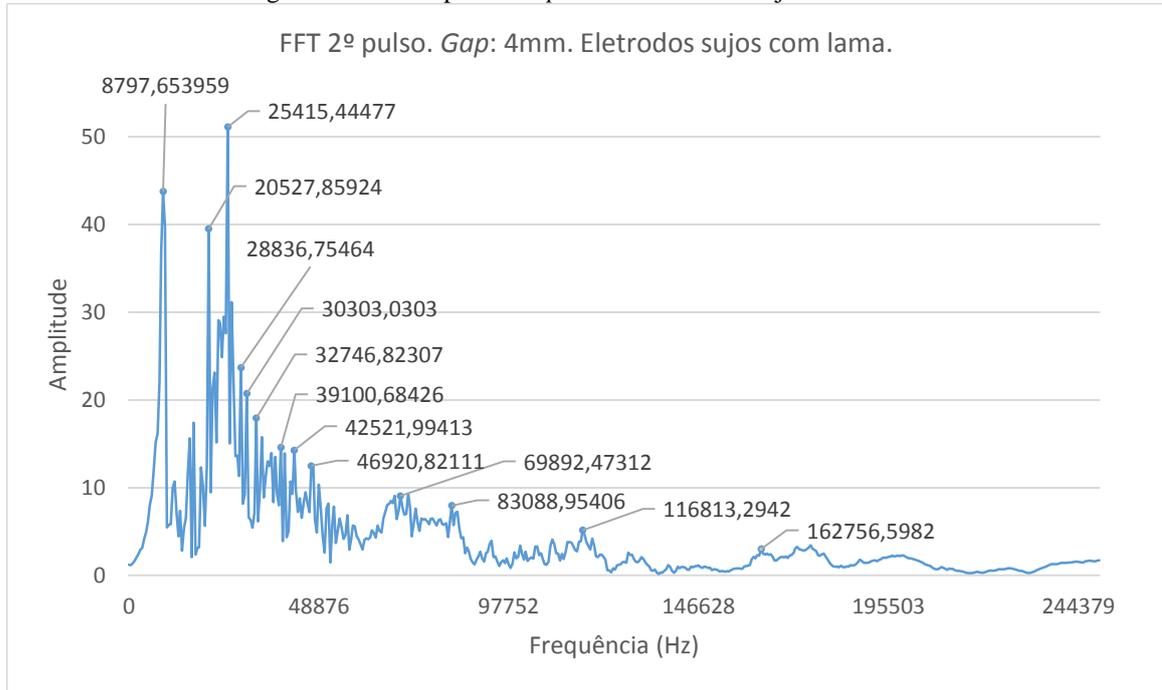
4.1.3.2 2º pulso

Figura 54: 2º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos sujos com lama. Tempo analisado: 4,4048 a 4,4068s. Tensão: 3,9kV.



Fonte: do Autor.

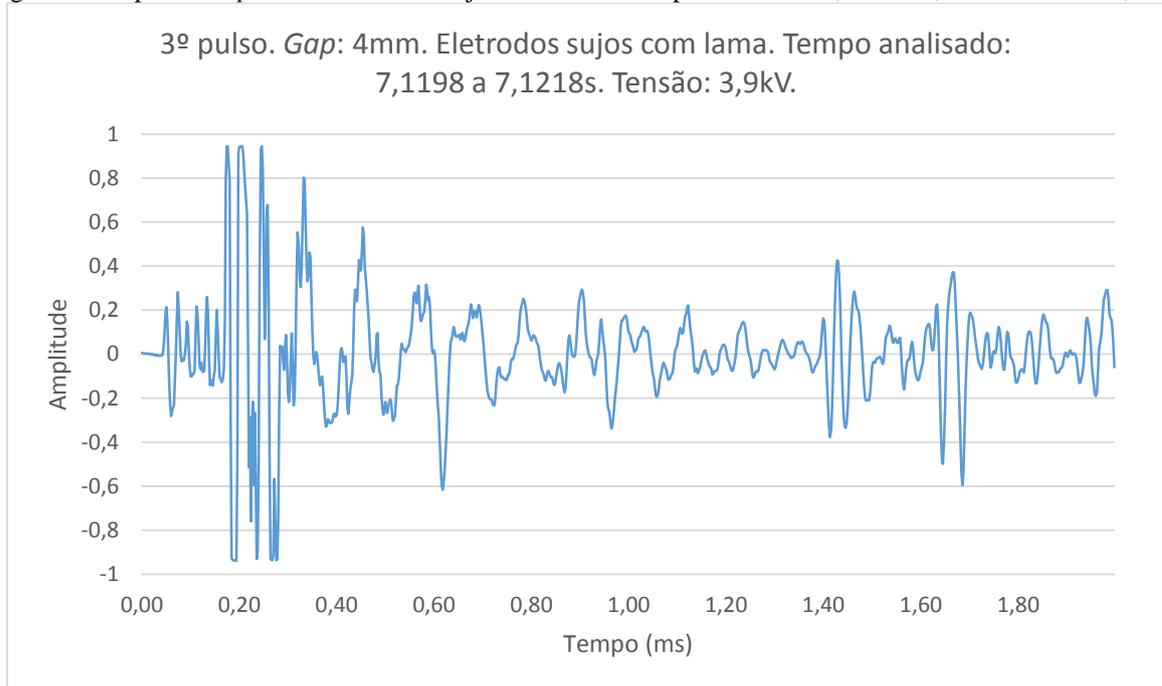
Figura 55: FFT 2º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos sujos com lama.



Fonte: do Autor.

4.1.3.3 3º pulso

Figura 56: 3º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos sujos com lama. Tempo analisado: 7,1198 a 7,1218s. Tensão: 3,9kV.



Fonte: do Autor.

Figura 57: FFT 3º pulso. *Gap*: 4mm. Eletrodos sujos com lama.



Fonte: do Autor.

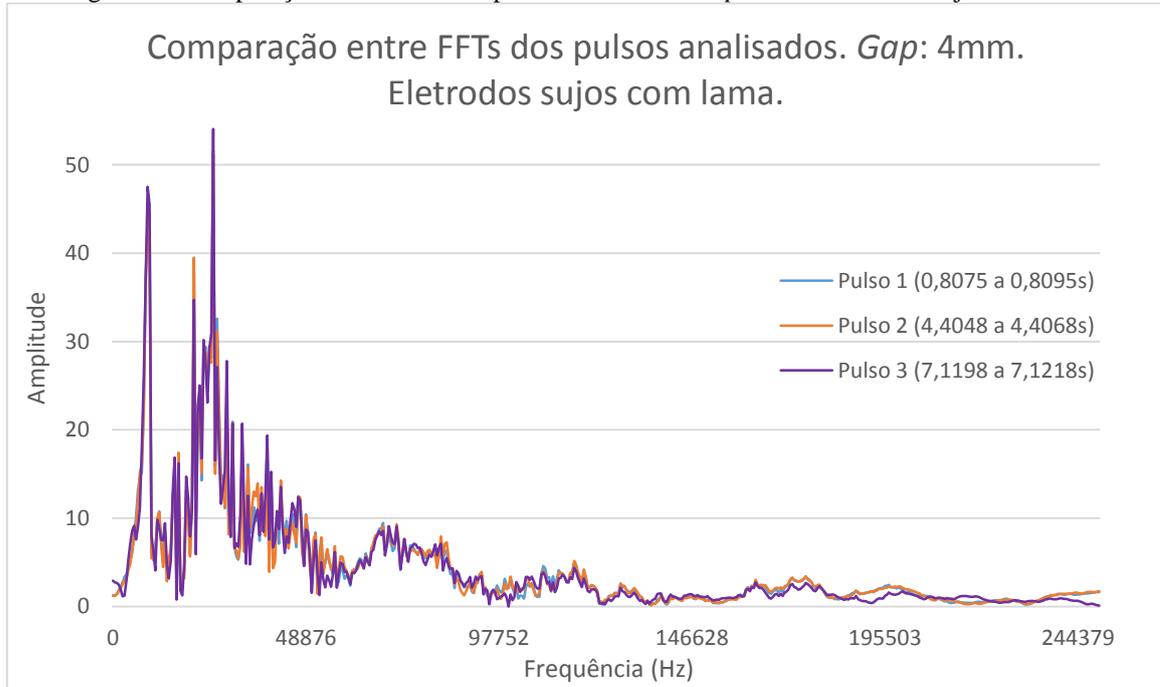
4.1.3.4 Comparação entre as FFTs dos pulsos analisados. Distância entre os eletrodos: 4mm. Eletrodos sujos com lama.

Ao comparar os espectros de frequência dos três pulsos obtidos com os eletrodos sujos de lama, pode-se observar que os três gráficos contêm frequências fundamentais muito parecidas. A Figura 58 apresenta uma sobreposição dos gráficos das FFTs dos pulsos analisados e comprova que as frequências se assemelham consideravelmente. O mesmo é observado através da Tabela 5, que exhibe quais são as principais componentes de frequências presentes nos pulsos analisados.

Observando as curvas no domínio do tempo, pode-se notar que os pulsos de descargas parciais ocorreram muito próximos entre si, portanto não foi possível isolar um único pulso durante o intervalo de 2ms. Dentro desse intervalo pôde-se observar a ocorrência de outros pulsos menos intensos, o que teve impacto nos gráficos das FFTs. Isso tornou as amplitudes das curvas de frequência um pouco diferentes das mesmas curvas sob as condições de isoladores secos e molhados com solução salina. Porém, pode-se notar uma similaridade tanto no formato quanto nas principais frequências do espectro.

Além disso, conforme esperado, a tensão de ignição das descargas parciais com os eletrodos sujos foi de 3,9kV, valor menor do que o da tensão de ignição com os eletrodos secos, 5,29kV.

Figura 58: Comparação entre FFTs dos pulsos analisados. *Gap*: 4mm. Eletrodos sujos com lama.



Fonte: do Autor.

Tabela 5: Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). *Gap*: 4mm. Eletrodos sujos com lama.

Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). Gap: 4mm. Eletrodos sujos com lama.		
1º pulso	2º pulso	3º pulso
9286	8797	8797
20527	20527	20527
25415	25415	25415
28836	28836	28836
30303	30303	30303
32746	32746	32746
39100	39100	39100
47409	46920	46920
68426	69892	69892
83088	83088	83088
116813	116813	116813
162756	162756	162756

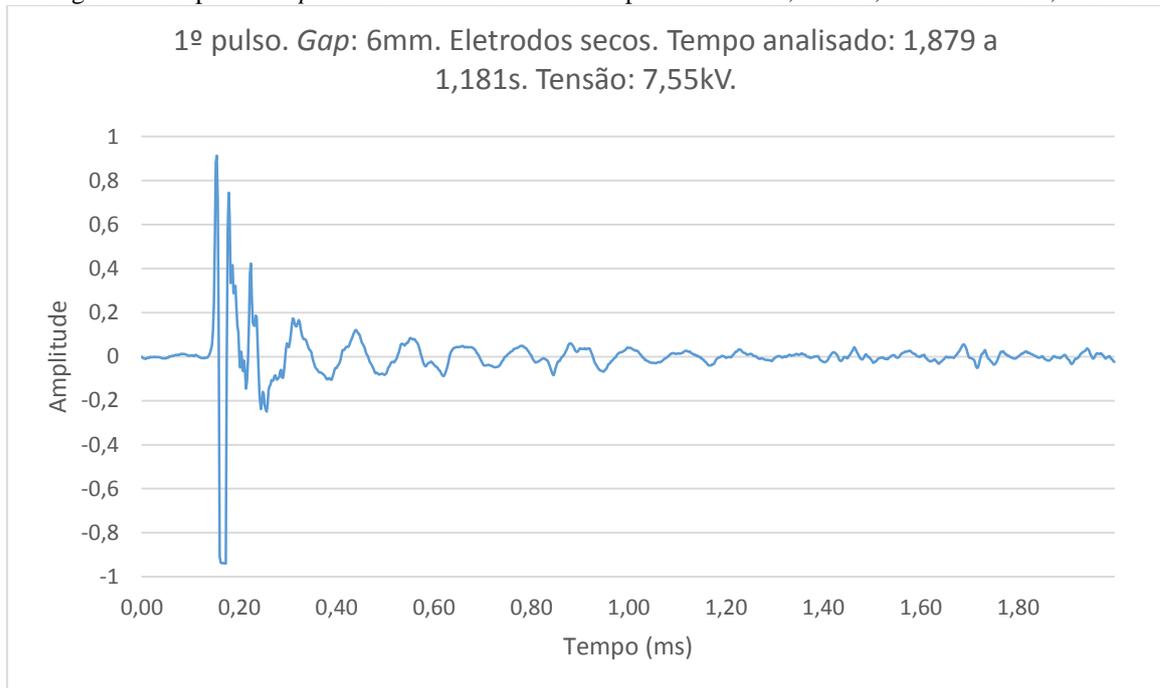
Fonte: do Autor.

4.1.4 Distância entre os eletrodos: 6mm. Eletrodos secos.

A tensão de ignição de descarga parcial para a distância (*gap*) de 6mm entre os eletrodos limpos e secos foi de 7,55kV. O tempo analisado em todas as amostras é de 2ms. O arquivo analisado é o *BM_190701_111307_13384.wav* e tem um tempo total de 10 segundos.

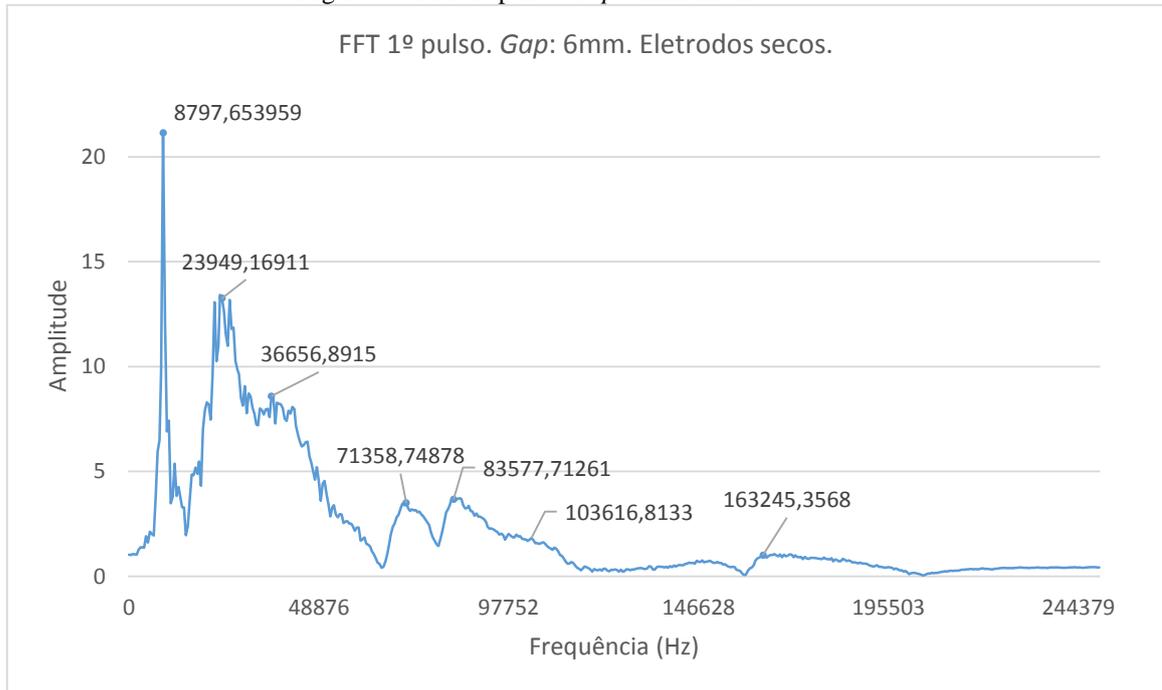
4.1.4.1 1º pulso

Figura 59: 1º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos secos. Tempo analisado: 1,879 a 1,181s. Tensão: 7,55kV.



Fonte: do Autor.

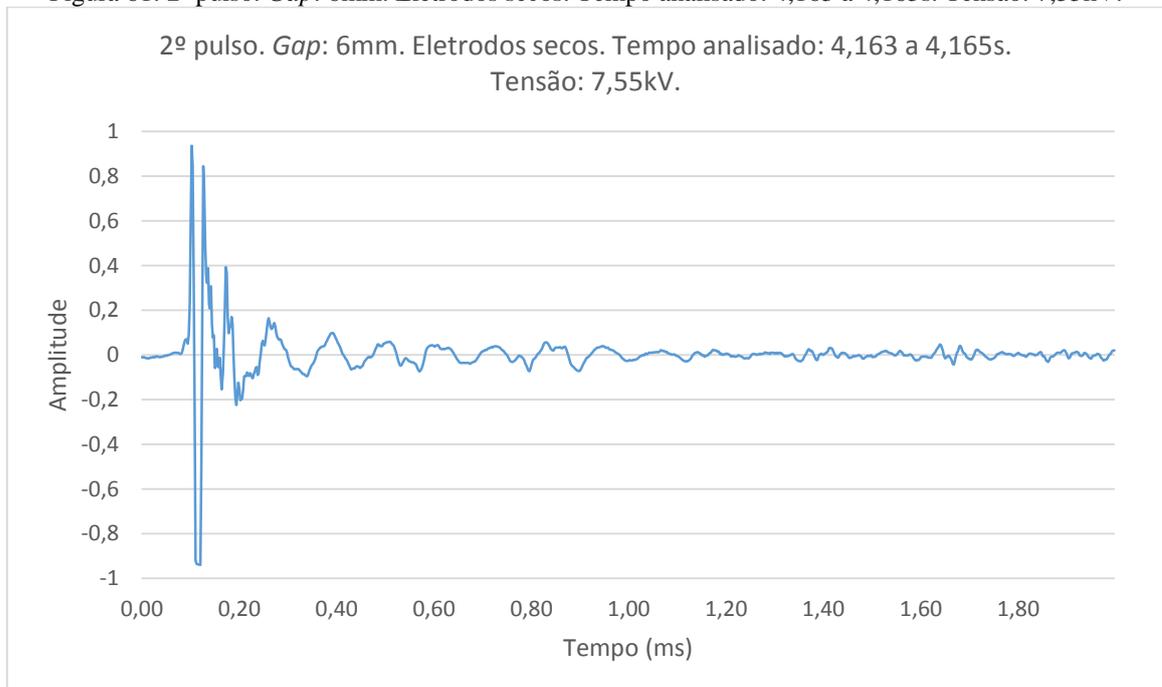
Figura 60: FFT 1º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos secos.



Fonte: do Autor.

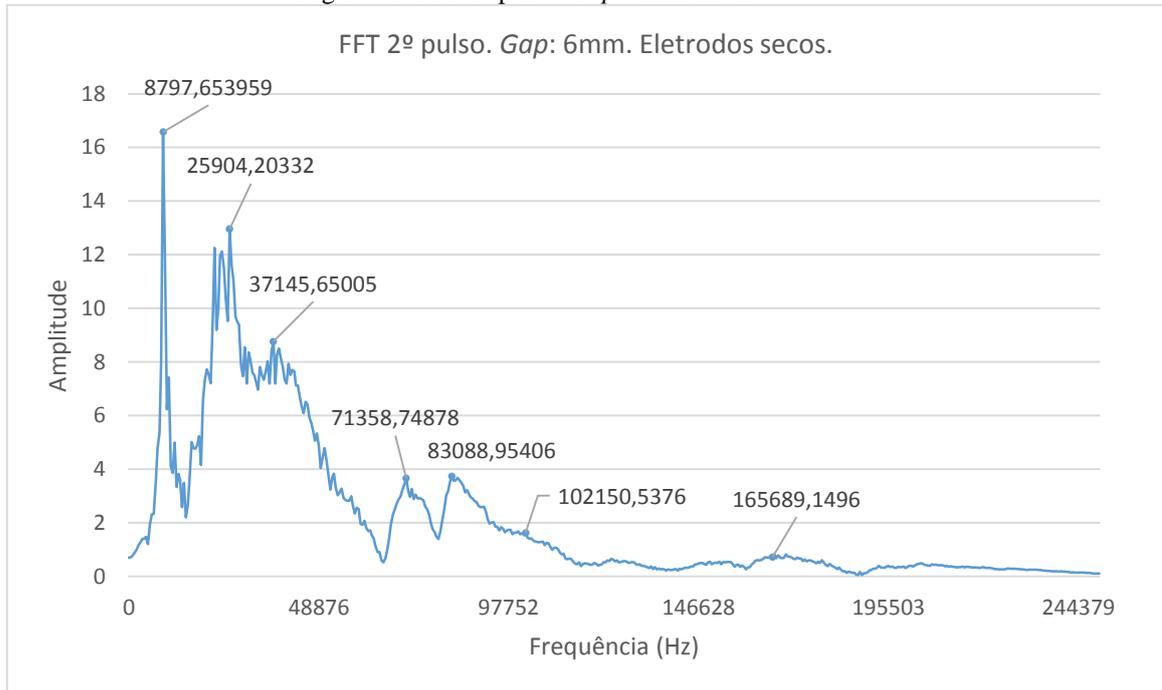
4.1.4.2 2º pulso

Figura 61: 2º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos secos. Tempo analisado: 4,163 a 4,165s. Tensão: 7,55kV.



Fonte: do Autor.

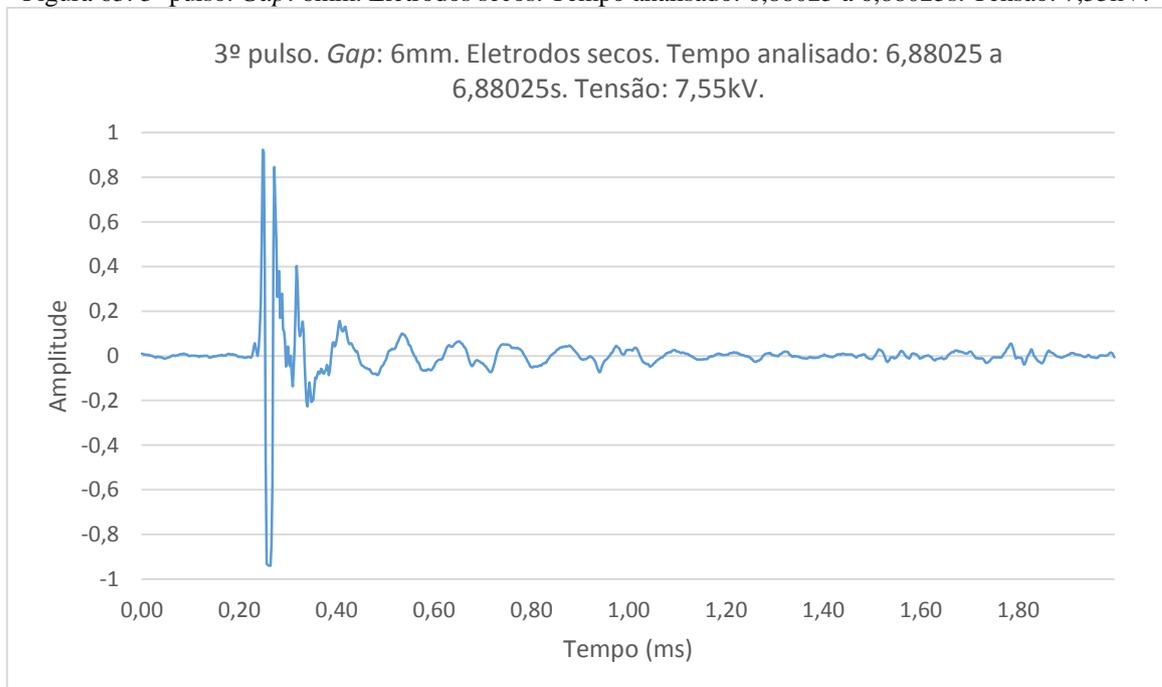
Figura 62: FFT 2º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos secos.



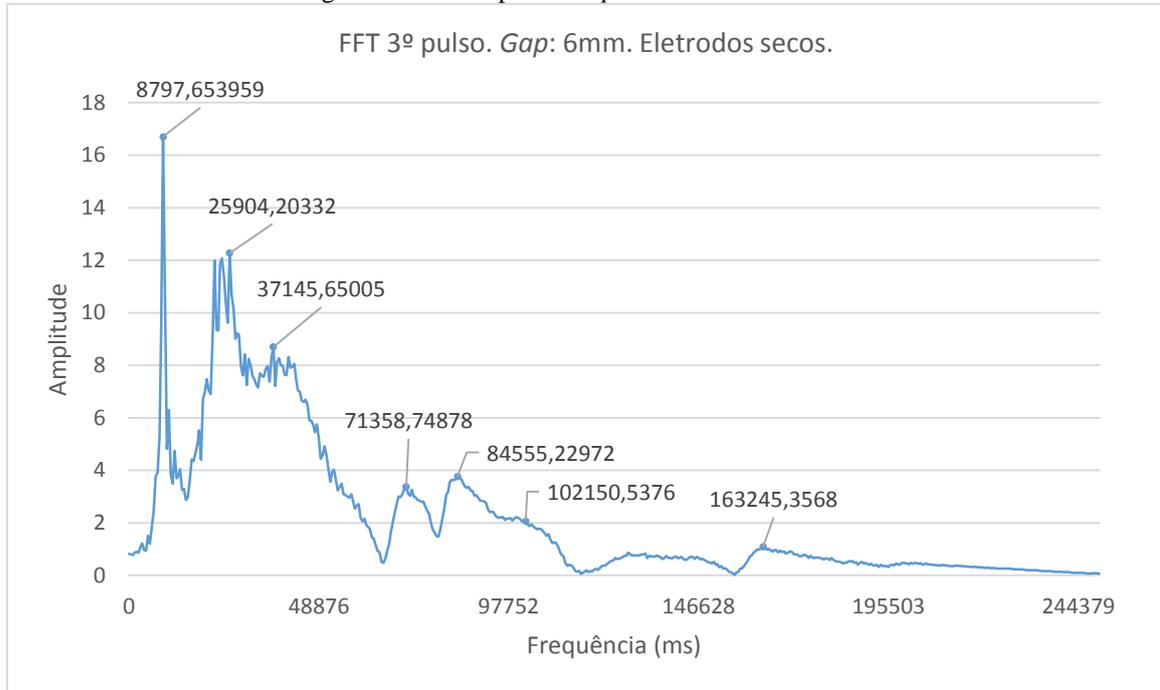
Fonte: do Autor.

4.1.4.3 3º pulso

Figura 63: 3º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos secos. Tempo analisado: 6,88025 a 6,88025s. Tensão: 7,55kV.



Fonte: do Autor.

Figura 64: FFT 3º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos secos.

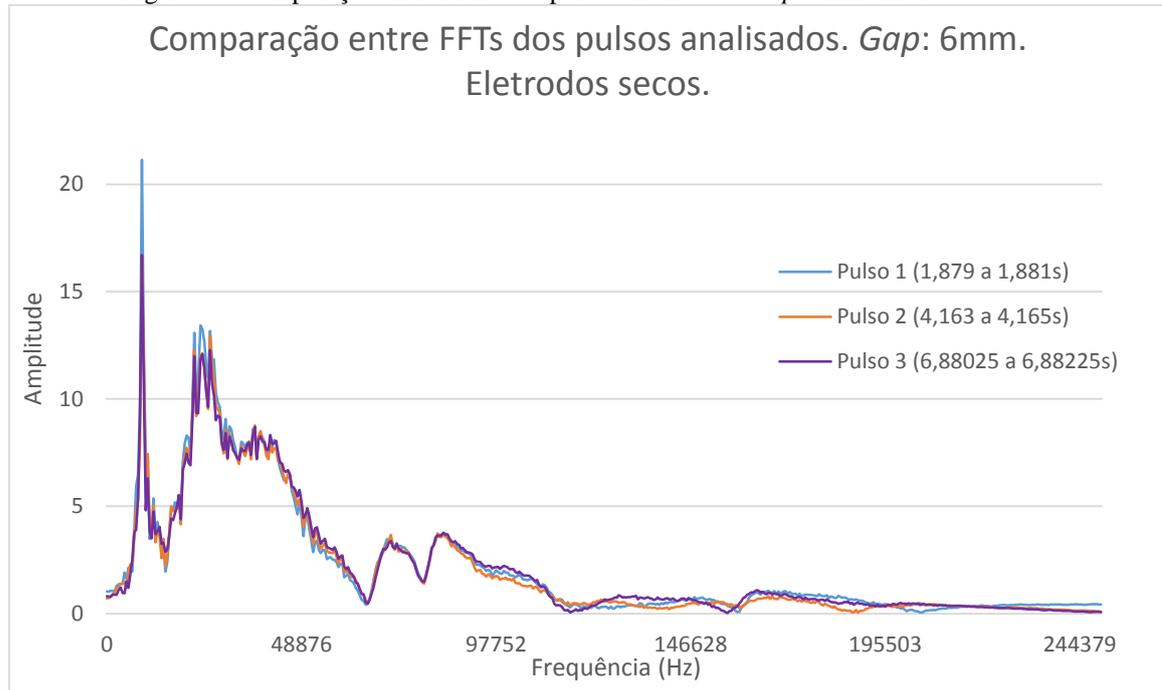
Fonte: do Autor.

4.1.4.4 Comparação entre as FFTs dos pulsos analisados. Distância entre os eletrodos: 6mm. Eletrodos secos.

Comparando os espectros de frequência dos três pulsos obtidos com os eletrodos secos e distantes de 6mm, pode-se observar que os três gráficos contêm frequências fundamentais muito parecidas. A Figura 65 apresenta uma sobreposição dos gráficos das FFTs dos pulsos analisados e comprova que as frequências se assemelham consideravelmente. O mesmo é observado através da Tabela 6, que exhibe quais são as principais componentes de frequências presentes nos pulsos analisados.

Além disso, a tensão de ignição é maior quando comparada à tensão de ignição com o *gap* de 4mm. Quanto maior for a distância entre os eletrodos (sob mesmas condições atmosféricas), maior será a tensão de ignição de uma descarga parcial no espaço entre eles.

Figura 65: Comparação entre FFTs dos pulsos analisados. *Gap*: 6mm. Eletrodos secos.



Fonte: do Autor.

Tabela 6: Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). *Gap*: 6mm. Eletrodos secos.

Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). Gap: 6mm. Eletrodos secos.		
1º pulso	2º pulso	3º pulso
8797	8797	8797
23949	25904	25904
36656	37145	37145
71358	71358	71358
83577	83088	84555
103616	102150	102150
163245	165689	163245

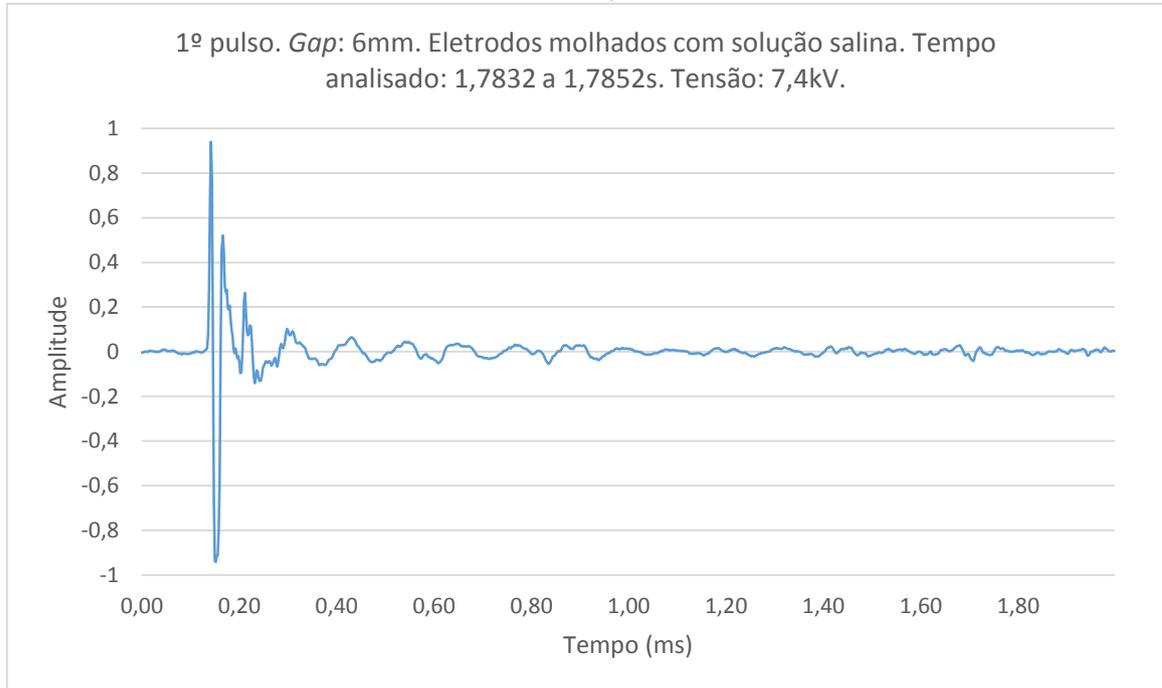
Fonte: do Autor.

4.1.5 Distância entre os eletrodos: 6mm. Eletrodos molhados com solução salina.

A tensão de ignição de descarga parcial para a distância (*gap*) de 6mm entre os eletrodos molhados com solução salina foi de 7,4kV. O tempo analisado em todas as amostras é de 2ms. O arquivo analisado é o *BM_190701_111928_13384.wav* e tem um tempo total de 10 segundos.

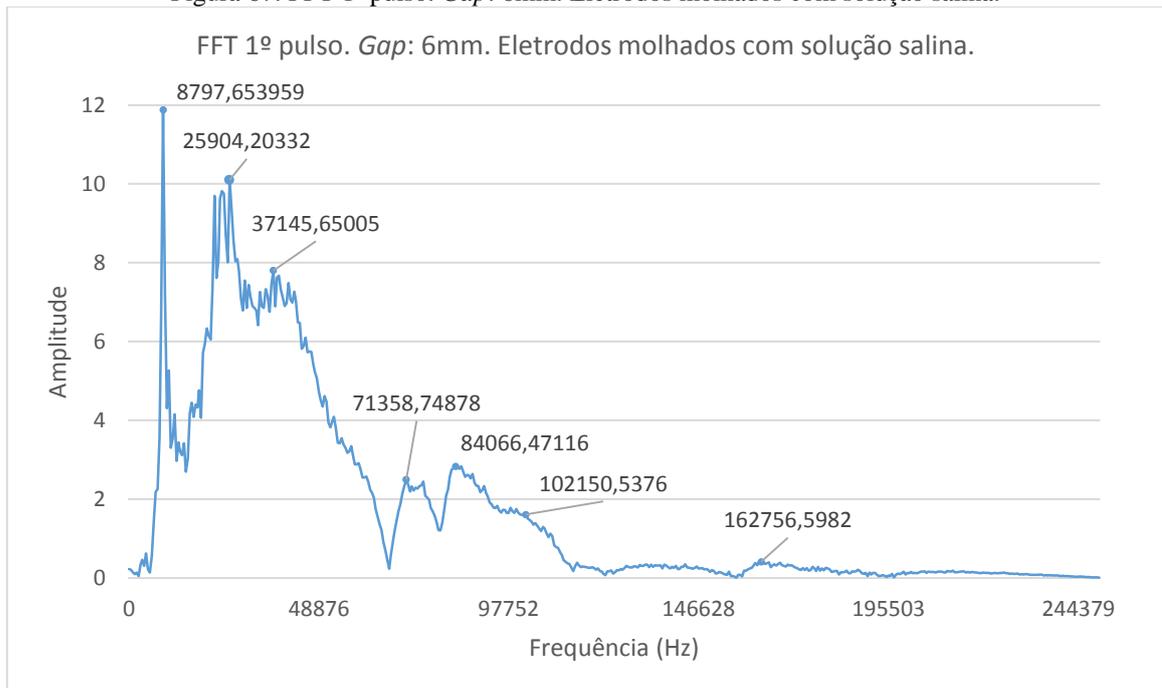
4.1.5.1 1º pulso

Figura 66: 1º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos molhados com solução salina. Tempo analisado: 1,7832 a 1,7852s. Tensão: 7,4kV.



Fonte: do Autor.

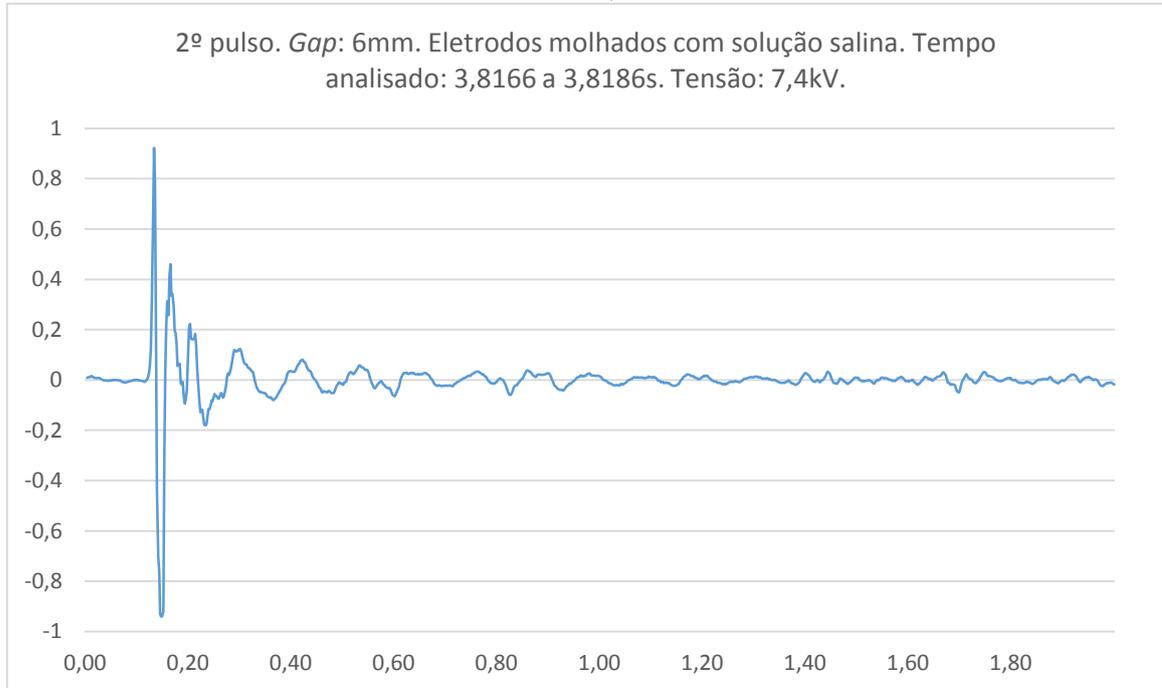
Figura 67: FFT 1º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos molhados com solução salina.



Fonte: do Autor.

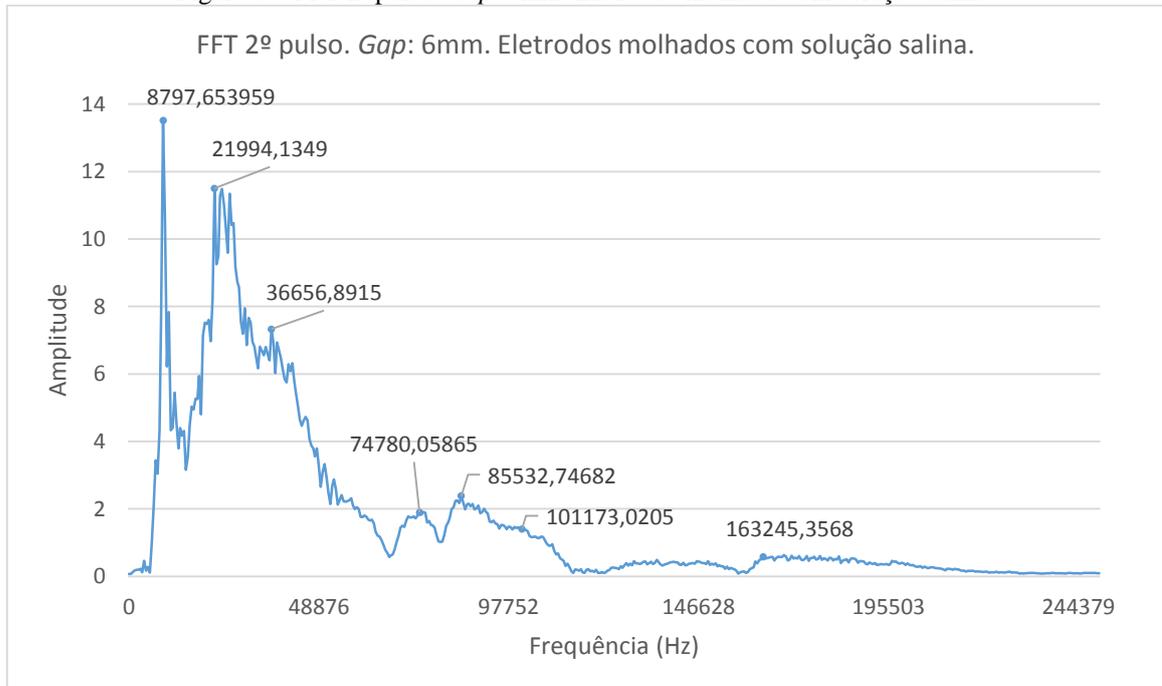
4.1.5.2 2º pulso

Figura 68: 2º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos molhados com solução salina. Tempo analisado: 3,8166 a 3,8186s. Tensão: 7,4kV.



Fonte: do Autor.

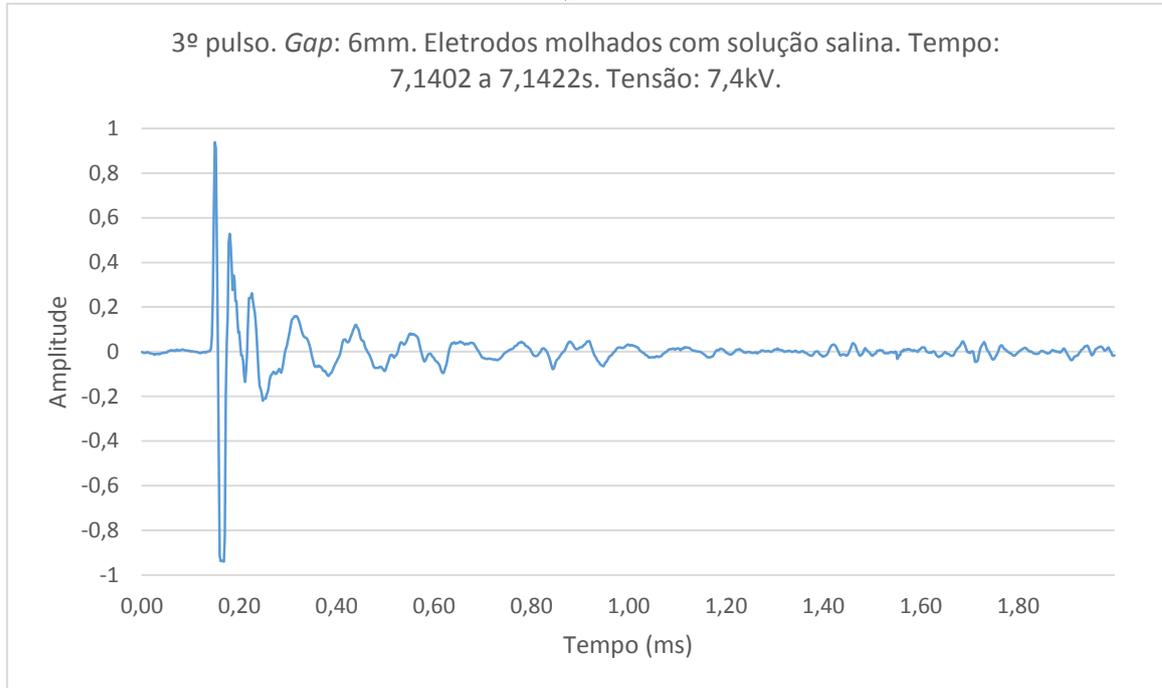
Figura 69: FFT 2º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos molhados com solução salina.



Fonte: do Autor.

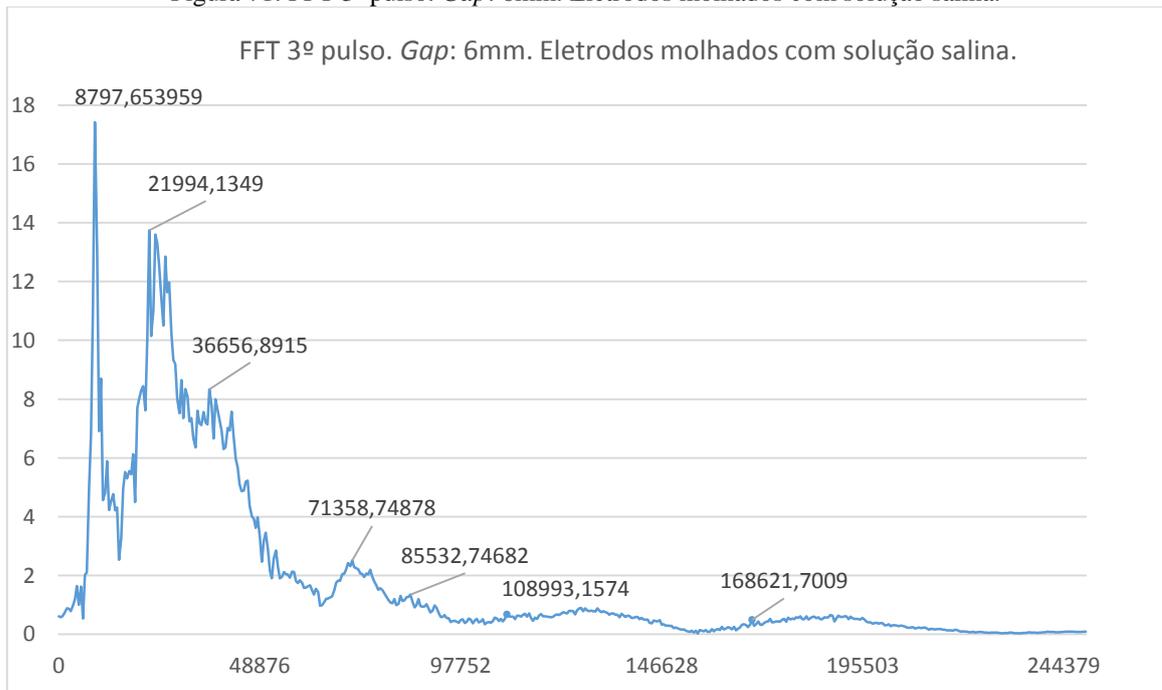
4.1.5.3 3º pulso

Figura 70: 3º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos molhados com solução salina. Tempo: 7,1402 a 7,1422s. Tensão: 7,4kV.



Fonte: do Autor.

Figura 71: FFT 3º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos molhados com solução salina.



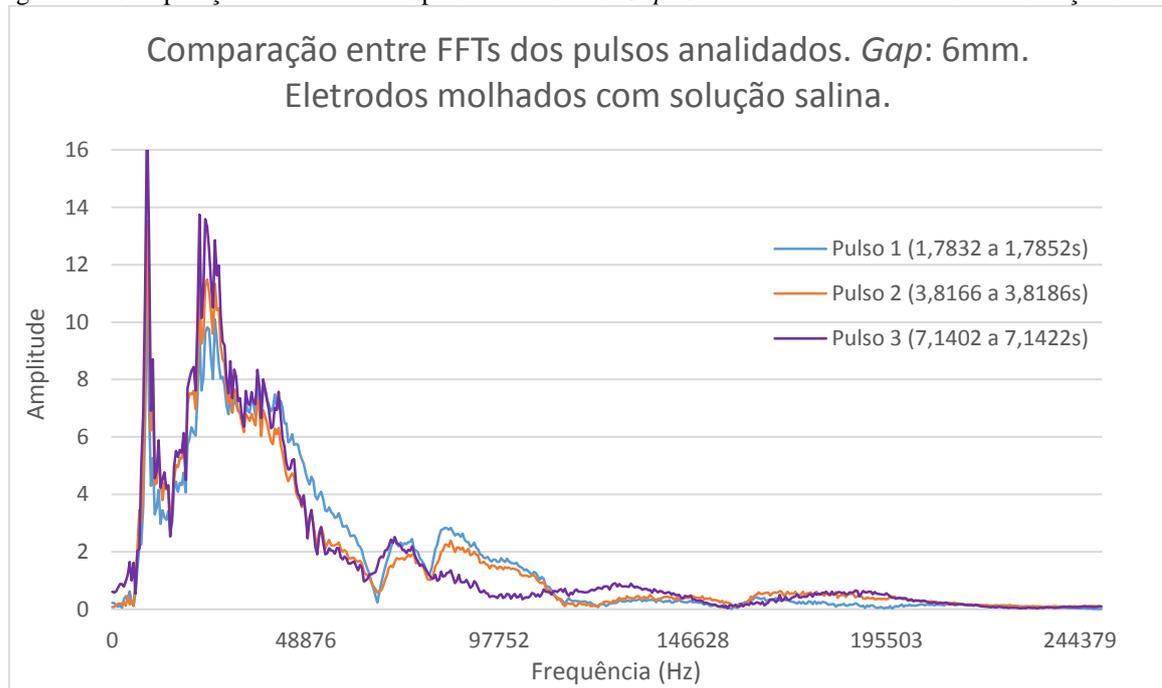
Fonte: do Autor.

4.1.5.4 Comparação entre as FFTs dos pulsos analisados. Distância entre os eletrodos: 6mm. Eletrodos molhados com solução salina.

Comparando os espectros de frequência dos três pulsos obtidos com os eletrodos molhados com solução salina e distantes de 6mm, pode-se observar que os três gráficos contêm frequências fundamentais muito parecidas. A Figura 72 apresenta uma sobreposição dos gráficos das FFTs dos pulsos analisados e comprova que as frequências se assemelham consideravelmente. O mesmo é observado através da Tabela 7, que exibe quais são as principais componentes de frequências presentes nos pulsos analisados.

A tensão de ignição das descargas ocorreu aos 7,4kV, valor um pouco menor do que a tensão de 7,55kV, que foi o de ignição para a condição de eletrodos secos.

Figura 72: Comparação entre FFTs dos pulsos analisados. *Gap*: 6mm. Eletrodos molhados com solução salina.



Fonte: do Autor.

Tabela 7: Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). Gap: 6mm. Eletrodos molhados com solução salina.

Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). Gap: 6mm. Eletrodos molhados com solução salina.		
1º pulso	2º pulso	3º pulso
8797	8797	8797
25904	21994	21994
37145	36656	36656
71358	74780	71358
84066	85532	85532
102150	101173	108993
162756	163245	168621

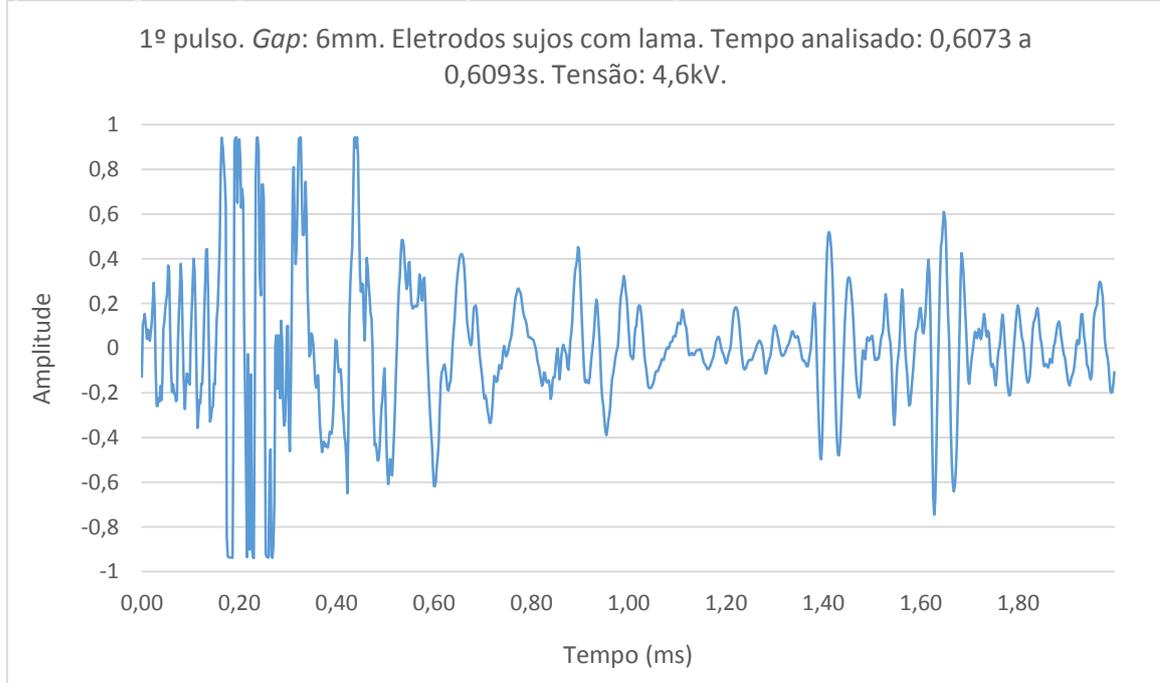
Fonte: do Autor

4.1.6 Distância entre os eletrodos: 6mm. Eletrodos sujos com lama.

A tensão de ignição de descarga parcial para a distância (*gap*) de 6mm entre os eletrodos sujos com lama foi de 4,6kV. O tempo analisado em todas as amostras é de 2ms. O arquivo analisado é o *BM_190701_170600_13384.wav* e tem um tempo total de 10 segundos.

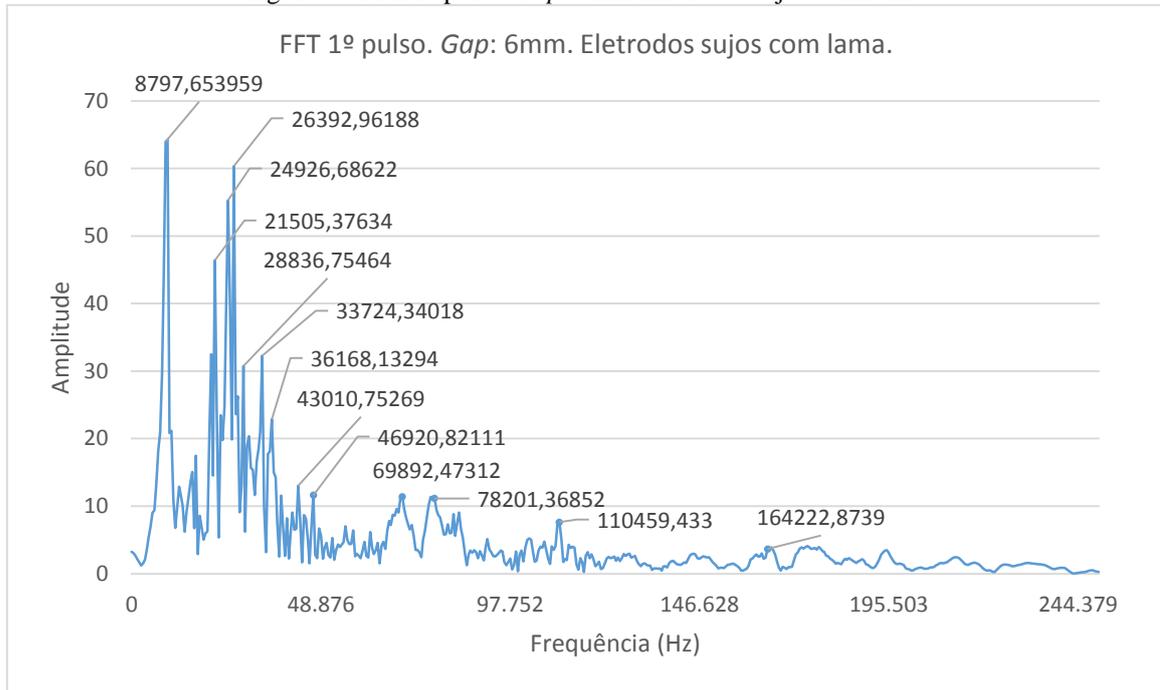
4.1.6.1 1º pulso

Figura 73: 1º pulso. Gap: 6mm. Eletrodos sujos com lama. Tempo analisado: 0,6073 a 0,6093s. Tensão: 4,6kV.



Fonte: do Autor.

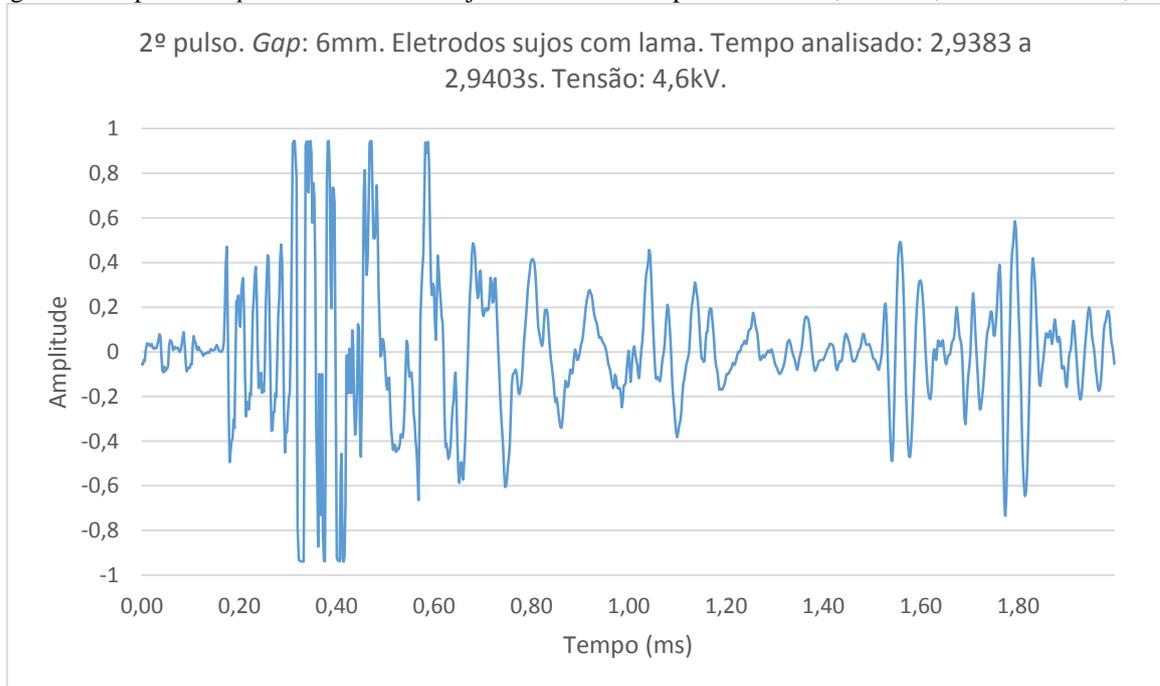
Figura 74: FFT 1º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos sujos com lama.



Fonte: do Autor.

4.1.6.2 2º pulso

Figura 75: 2º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos sujos com lama. Tempo analisado: 2,9383 a 2,9403s. Tensão: 4,6kV.



Fonte: do Autor.

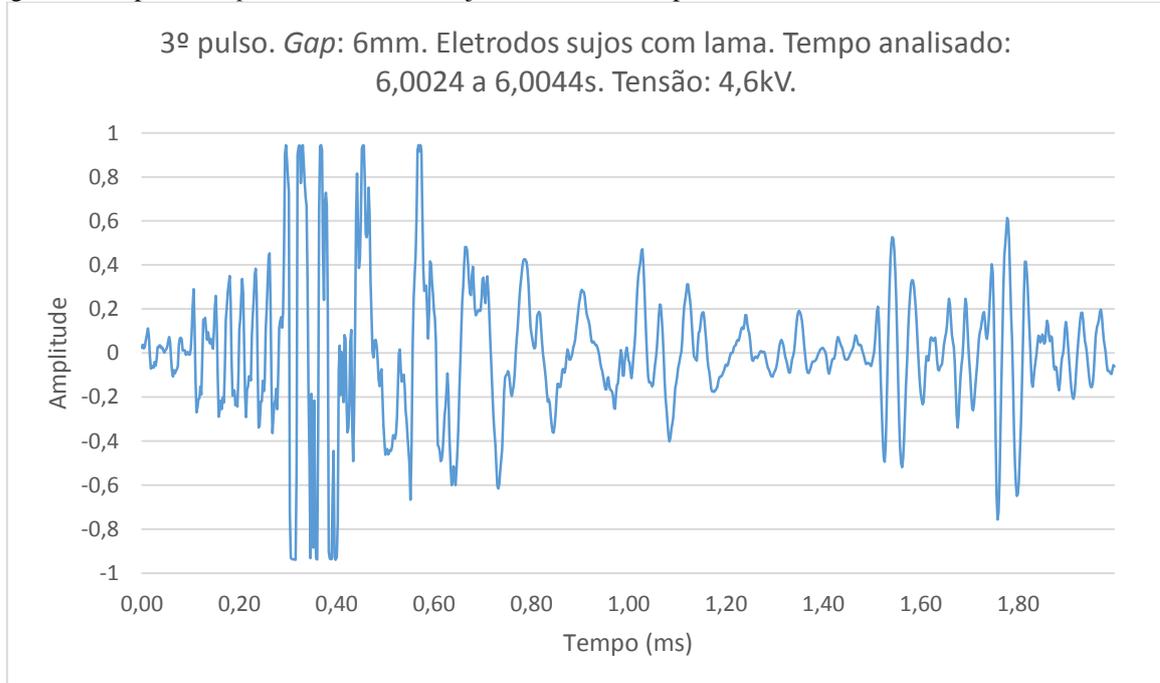
Figura 76: FFT 2º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos sujos com lama.



Fonte: do Autor.

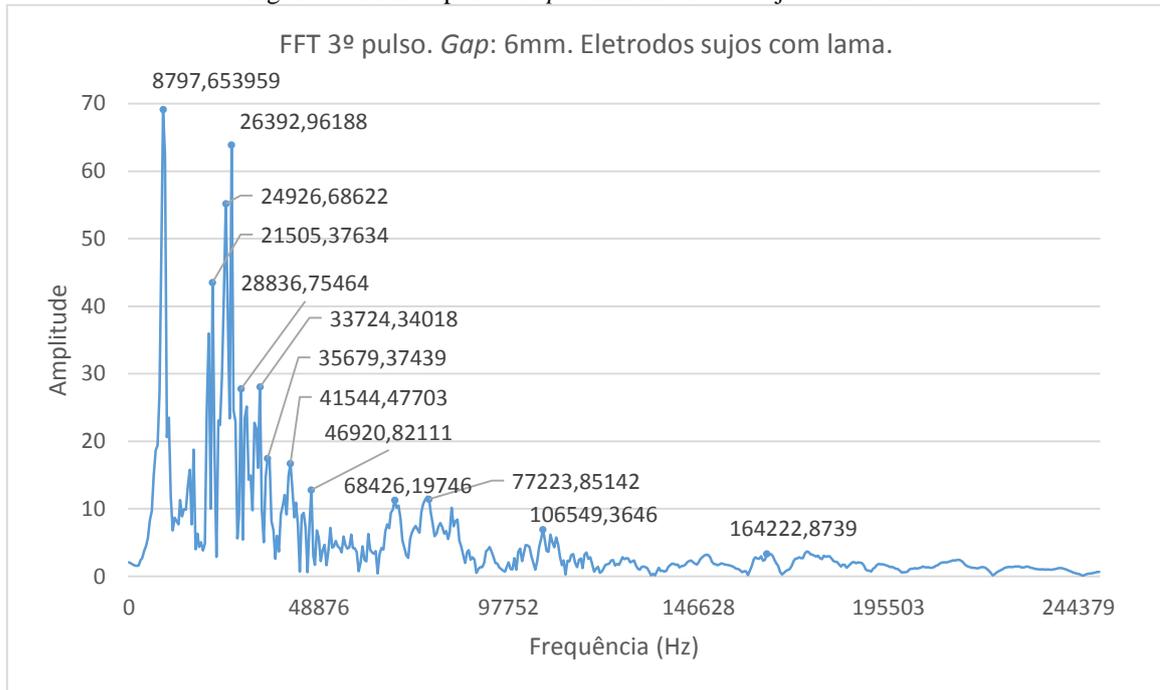
4.1.6.3 3º pulso

Figura 77: 3º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos sujos com lama. Tempo analisado: 6,0024 a 6,0044s. Tensão: 4,6kV.



Fonte: do Autor.

Figura 78: FFT 3º pulso. *Gap*: 6mm. Eletrodos sujos com lama.



Fonte: do Autor.

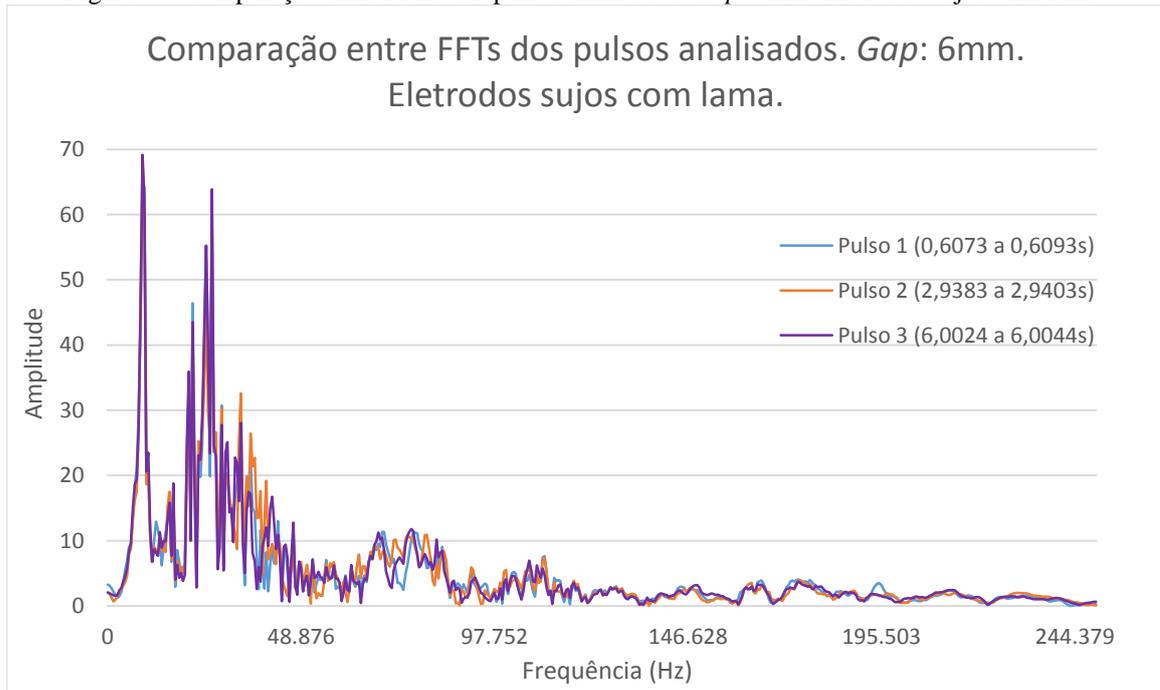
4.1.6.4 Comparação entre as FFTs dos pulsos analisados. Distância entre os eletrodos: 6mm. Eletrodos sujos com lama.

Comparando os espectros de frequência dos três pulsos obtidos com os eletrodos sujos de lama e distantes de 6mm, pode-se observar que os três gráficos contêm frequências fundamentais muito parecidas. A Figura 79 apresenta uma sobreposição dos gráficos das FFTs dos pulsos analisados e comprova que as frequências se assemelham consideravelmente. O mesmo é observado através da Tabela 8, que exhibe quais são as principais componentes de frequências presentes nos pulsos analisados.

Observando as curvas no domínio do tempo, pode-se notar que os pulsos de descargas parciais ocorreram muito próximos entre si, portanto não foi possível isolar um único pulso durante o intervalo de 2ms. Dentro desse intervalo pôde-se observar a ocorrência de outros pulsos menos intensos, o que teve impacto nos gráficos das FFTs. Isso tornou as amplitudes das curvas de frequência um pouco diferentes das mesmas curvas sob as condições de isoladores secos e molhados com solução salina. Porém, pode-se notar uma similaridade tanto no formato quanto nas principais frequências do espectro.

A tensão de ignição das descargas ocorreu aos 4,6kV, valor bem menor do que as tensões de 7,55kV e 7,4kV, tensões de ignição para as condições de eletrodos secos e molhados com solução salina, respectivamente.

Figura 79: Comparação entre FFTs dos pulsos analisados. *Gap*: 6mm. Eletrodos sujos com lama.



Fonte: do Autor.

Tabela 8: Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). *Gap*: 6mm. Eletrodos sujos com lama.

Principais frequências presentes nas FFTs dos pulsos analisados (valores em Hz). Gap: 6mm. Eletrodos sujos com lama.		
1º pulso	2º pulso	3º pulso
8797	8797	8797
21505	21505	21505
24926	24926	24926
26392	26392	26392
28836	28836	28836
33724	33724	33724
36168	36168	35679
43010	40078	41544
46920	46920	46920
69892	72336	68426
78201	80156	77223
110459	110459	106549
164222	162756	164222

Fonte: do Autor.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou sobre uma possível solução para o problema de detecção de isoladores defeituosos. Como as concessionárias de energia buscam associar o aumento da confiabilidade do sistema à redução de custos de manutenção da rede elétrica, torna-se cada vez mais necessário encontrar uma alternativa para a inspeção de isoladores. O procedimento proposto baseia-se em utilizar a técnica da análise de sinais de ultrassom através do seu espectro de frequências e mostrar um padrão das frequências fundamentais de pulsos de descargas parciais. O gráfico dos pulsos de descargas em função do tempo foram obtidos com o auxílio de um microfone ultrassônico. Para realizar a análise no domínio da frequência, utilizou-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT).

A maioria dos trabalhos neste ramo de pesquisa utiliza aparelhos detectores de ultrassom que captam, filtram e amplificam o sinal para torná-lo audível ao ser humano. Porém essa técnica depende da experiência do operador e diferentes operadores podem chegar a diagnósticos distintos. A utilização de um microfone de ultrassom é uma técnica inovadora, uma vez que o ruído da descarga é captado e não passa por nenhum tipo de filtro ou amplificação.

Ao observar os resultados obtidos e compará-los, pode-se notar uma repetição dos espectros dos pulsos de descargas parciais, confirmando a hipótese levantada no início deste trabalho. Além disso, mesmo sob condições distintas (eletrodos secos, molhados com solução salina e sujos com lama), o padrão das frequências também se manteve. Outro ponto importante a ser destacado é que as tensões de ignição das descargas parciais com os eletrodos secos são maiores do que as com os eletrodos molhados com solução salina ou sujos com lama. Isso se deve ao fato de que a umidade combinada com salinidade ou sujeira é condutiva, fazendo com que as descargas ocorram em uma tensão menor e com mais frequência.

Um problema encontrado durante a obtenção e análise dos pulsos de descargas parciais foi que, em alguns casos, não foi possível isolar um único pulso. Isso ocorreu na situação dos eletrodos molhados com solução salina (somente com o *gap* de 4mm) e sujos com lama (com ambos os *gaps* de 4 e 6mm). Ocorreram vários pulsos muito próximos uns dos outros, o que interferiu nas amplitudes dos gráficos no domínio da frequência. Provavelmente esse problema ocorreu devido à sensibilidade do botão dial da fonte de tensão, pois não se conseguiu setar

uma tensão em que fossem obtidos poucos pulsos. Se o valor da tensão fosse levemente diminuído, as descargas cessavam. Se fosse levemente aumentado, já ocorria uma descarga completa entre os eletrodos. Isso seria facilmente resolvido com o uso de uma fonte de tensão contínua profissional, com a qual seria possível ter mais controle sobre o valor da tensão aplicada, porém não foi possível a utilização de uma fonte desse tipo neste trabalho. De qualquer forma, mesmo não obtendo todos os pulsos de descargas parciais isolados da forma desejada, os espectros de frequência para todas as situações e *gaps* simulados são muito semelhantes entre si no formato e nos valores de frequências fundamentais.

Portanto, o procedimento proposto para análise de descargas parciais por meio do ultrassom poderia tornar os diagnósticos de redes de distribuição mais assertivos e objetivos. Isso se aliaria às vantagens já existentes dessa técnica de inspeção: diretividade, segurança para o operador e não invasibilidade. Além do mais, a inspeção ocorreria de forma rápida, uma vez que o operador somente precisaria segurar o microfone apontado em direção ao elemento a ser inspecionado durante poucos segundos. Também, com o aumento da assertividade desse método de inspeção, haveria uma redução dos custos arcados pelas concessionárias com a manutenção de linhas de distribuição, pois além de indicar as substituições apenas dos isoladores necessários, também seriam evitados gastos com as substituições desnecessárias.

6 TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos mostraram que há uma repetição da curva do espectro de frequências quando ocorre um pulso de descarga parcial. Portanto, é de suma importância continuar as pesquisas nesta área, a fim de obter mais dados que possam demonstrar um padrão nas curvas das descargas parciais. Esses dados podem ser obtidos através da utilização de outros eletrodos metálicos e também de outras distâncias entre os eletrodos. Também pode-se pensar em realizar os ensaios em ambiente isolado acusticamente, para obter dados com o mínimo possível de ruído externo. Além disso, ensaios utilizando uma classe de tensão mais alta também se mostram interessantes, pois é possível observar melhor fenômenos como a arborescência elétrica e o efeito corona.

Após a obtenção de mais informações e confirmação do padrão das descargas com essas novas amostras, o próximo passo importante seria criar um algoritmo para detectar, através do sinal de ultrassom, se há descargas parciais ocorrendo em um equipamento ou não, sem a necessidade de intervenção humana na análise.

Além disso, seria pertinente uma análise comparativa entre os resultados obtidos pelos detectores de ultrassom atualmente utilizados pelas concessionárias de energia e os obtidos através dos sinais de ultrassom provenientes da captação do microfone. Ademais, há de se pensar em realizar um estudo comparativo entre os resultados obtidos utilizando o microfone de ultrassom e os obtidos através da utilização de outras técnicas de inspeção adotadas pelas concessionárias, como a termovisão.

Outra possibilidade para trabalhos futuros é a inserção desta linha de pesquisa em programas de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) de concessionárias de energia elétrica em conjunto com as universidades. Isso possibilitaria aplicar em campo, e não só em laboratório, as pesquisas desenvolvidas sobre o tema.

REFERÊNCIAS

- [1]: MADRUGA, G. G. et al. **DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA PARA IDENTIFICAÇÃO DE ISOLADORES DEFEITUOSOS ATRAVÉS DO USO DE ULTRASSOM**. Foz do Iguaçu: [s.l.], 2013.
- [2]: BEZERRA, J. M. B. **Caracterização de Atributos de Sinais para Utilização de Técnicas de Reconhecimento de Padrões na Avaliação do Isolamento de Instalações e Equipamentos Elétricos**. Tese de Doutorado, UFCG, 2004.
- [3]: STEFENON, S. F. **Estudo das Técnicas de Inspeção de Redes de Distribuição para Identificação e Classificação de Defeitos em Isoladores Através do Uso do Ultrassom**. 2015. 92p. Dissertação de Mestrado – FURB, Blumenau, 2015.
- [4]: MARKS, Frederico Salvador Cabral. **INTERPRETAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS UTILIZANDO MICROFONE PARA ULTRASSOM**. 2017. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Tecnológicas, Furb, Blumenau, 2017.
- [5]: ALESSI, Lincon Pereira; OGAWA, Silvio Katsuo. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS APLICADAS À INSPEÇÃO INSTRUMENTALIZADA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. 2010. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Ufpr, Curitiba, 2010.
- [6]: BORGES, Cícero Lefort. **UMA ABORDAGEM ALTERNATIVA PARA INSPEÇÃO PREDITIVA NÃO INVASIVA EM LINHA AÉREA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO NA ÁREA RURAL**. 2012. 116 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.
- [7]: KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.; ROBBA, E.; **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

- [8]: SRD. **Regulação dos Serviços de Distribuição**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao>>. Acesso em: 06 maio 2019.
- [9]: MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 1215 p.
- [10]: GORUR, Ravi S.; CHERNEY, Edward A.; BURNHAM, Jeffrey T. **Outdoor Insulators**. Phoenix: Ravi S. Gorur, 1999. 262 p.
- [11]: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5032: Isoladores para linhas aéreas com tensões acima de 1000V - Isoladores de porcelana ou vidro para corrente alternada**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014. 61 p.
- [12]: SILVA, Leandro H.. **Aplicação de Reconhecimento de Padrões para Detecção de Chuva e Melhoria em Sistema de Classificação de Risco de Flashover em Linhas de Transmissão de Alta Tensão**. 2013. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Computação, Universidade de Pernambuco, Recife, 2013.
- [13]: LUSHNICOFF, N; PARNELL, T. **The Effects of Pollution and Surface Discharges on the Impulse Strength of Line Insulation**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-90, no. 4, pp. 1619 – 1627, Jul. 1971.
- [14]: KARAGIANNPOULOS, C. G. **A model for dielectrics experiencing partial discharges under high electric fields**. Journal of Electrostatics, vol. 65, no. 8, pp. 535 – 541, Jul. 2007.
- [15]: INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60270: High voltage test techniques - Partial discharge measurements**. 3.1 ed. Geneva, Switzerland, 2015.

- [16] KRUEGER, F. H. **Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment**. 1.ed. London: Butterworths, 1989.
- [17]: PAULINO, M. E. C.; GIACCHETTA, L. B. **Avaliação de Descargas Parciais com Medição de Múltiplos Canais Sincronizados**. XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Florianópolis, 2011.
- [18]: KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering: Fundamentals**. 2. ed. Woburn: Butterworth-heinemann, 2000. 552 p.
- [19]: HOLTZHAUSEN, Jp; VOSLOO, Wl. **High Voltage Engineering: Practice and Theory**. 2014. (ISBN: 978 - 0 - 620 - 3767 - 7).
- [20]: RIBEIRO JÚNIOR, Sebastião. **ANÁLISE DA RUPTURA DIELÉTRICA EM MATERIAIS ISOLANTES ELÉTRICOS DE CABOS ISOLADOS XLPE E EPR POR TOMOGRAFIA 2D E 3D**. 2008. 184 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- [21]: PALITÓ, Thamyres Tânulla Cavalcante. **Detecção Acústica de Descargas Parciais com Transdutor Piezoelétrico**. 2015. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- [22]: CUENCA, Walter Martin Huamán. **Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a partir de Modelos Experimentais**. 2005. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- [23]: FAIER, José Márcio. **CURVAS PRINCIPAIS APLICADAS NA IDENTIFICAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM EQUIPAMENTOS DE POTÊNCIA**. 2006. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

[24]: OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza. **Parâmetros físicos e astronômicos**. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/dados.htm>>. Acesso em: 16 maio 2019.

[25]: MASON, John H.. **Enhancing the significance of PD measurements**. Ieee Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation, Harlow, Uk, v. 2, n. 5, p.876-889, out. 1995.

[26]: GUTNIK, Yvan. **Estudo dos piezoletretos na detecção de descargas parciais em transformadores**. 2014. 308 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014

[27]: PILLING, J. **Ein beitrag zur interpretation der Lebensdauer Kennlinien von Feststoffisolierungen**. Thesis (Habilitation) – Technical University Dresden, Dresden, 1976.

[28]: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 8., 2005, Águas de Lindóia. **A ARBORESCÊNCIA EM SÓLIDOS DIELÉTRICOS ANALISADA COMO UM TÍPICO CASO DE DIFUSÃO**. Águas de Lindóia. 2005.

[29]: GULSKI, Edward. **Digital analysis of partial discharges**. Ieee Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation, Netherlands, v. 2, n. 5, p.822-837, out. 1995.

[30]: MELLO, D. R; BARBOSA, F. B; MENDOÇA, J. R; OLIVEIRA, J. L. **Trilhamento e Erosão de Isoladores e Para-Raios Poliméricos**. CIDEL. Argentina, 2010.

[31]: KOWALSKI, E.L et al. **Sistema de inspeção instrumental para detecção de falhas em isoladores nas linhas de distribuição**, Projeto 2866-032. Curitiba : s.n., 2006.

[32]: BORGES, Victor Salvino. **Estudo e Desenvolvimento de Detector de Isoladores com Falhas**. 2011. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

- [33]: MACHADO, Rafael Pires et al. **Metodologia para a inspeção instrumentalizada de isoladores de pino de redes de distribuição por RFI e ultrassom**. In: VI CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2011, Fortaleza. Anais. Fortaleza: s.n., 2011. p. 1 - 2.
- [34]: Loftness, Marv. **AC Power Interference Handbook**. 2nd Edition, Tumwater, Percival Technology, 2003.
- [35]: Shihab, S.; Wong, K.L. **Detection of faulty components on power lines using radio frequency signatures and signal processing techniques**. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Cingapura, v.4, p.2449-2452, 23-27 Jan., 2000.
- [36]: MARTIN, Mike. **How to Locate Power-Line Noise**. Disponível em: <<http://www.arrl.org/power-line-noise>>. Acesso em: 29 maio 2019.
- [37]: MÜHLEN, Sérgio Santos. **Interferência e Compatibilidade Eletromagnética**. Alemanha 2002.
- [38]: LEÃO, R. M. **Rádio Interferência Proveniente de Linhas de Alta Tensão**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008. 146 p.
- [39]: OLIVEIRA, Anderson Bernardino. **PROPOSTA DE DISPOSITIVO PARA IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM ISOLADORES DE PINO APLICADOS A REDES DE MÉDIA TENSÃO**. 2018. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- [40]: OLIVEIRA, H.R.P.M. et al. **Evaluation of the insulation of 15 kV-25 kV feeders and procedures for substitution of damaged units**. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION, 2006, Toronto. Conference Record. Toronto: Ieee, 2006. p. 126 - 131.

[41]: AMBROZIO, Dionísio Ribeiro; NAVOLAR, Ivan. **Análise das técnicas de Ultrassom e Radio interferência para verificação da ocorrência de descargas parciais em isoladores**. 2009. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

[42]: **SDT 170**. Disponível em: <<http://www.engelight.com.br/tecnologia/5/sdt-170/>>. Acesso em: 06 jun. 2019.

[43]: LUNDGAARD, L.e. **Partial discharge. XIII. Acoustic partial discharge detection-fundamental considerations**. Ieee Electrical Insulation Magazine, [s.l.], v. 8, n. 4, p.25-31, jul. 1992a. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/57.145095>.

[44]: LUNDGAARD, L.e.. **Partial discharge. XIV. Acoustic partial discharge detection-practical application**. Ieee Electrical Insulation Magazine, [s.l.], v. 8, n. 5, p.34-43, set. 1992b. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/57.156943>.

[45]: JERMENDY, L. et al. **Insulation diagnostic methods**. Powercon '98. 1998 International Conference On Power System Technology. Proceedings (cat. No.98ex151), [s.l.], p.81-85, ago. 1998. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icpst.1998.728929>.

[46]: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Methods of SaltSpray (Fog) Testing**. March 29, 1973. (ASTM B-117). In: 1973 ANNUAL Boole of ASTM Standards, v. 03.02. p. 1-12.

[47]: SANTOS, Laerte dos. **Classificação e Modelagem de Fatores de Influência sobre Inspeções Termográficas em Ambientes Desabrigados**. 2012. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

[48]: CRONHOLM, M. **Curso de termografia nível I**. Infrared Training Center- publicação nº 1560063_E-pt/BR, 1º edição, Estocolmo/ Suécia: 2014.

[49]: COELBA. **Coelba inova com Carro de Termovisão para evitar interrupção de energia.** Disponível em: <<http://www.coelba.com.br/Noticias/Pages/Coelba-inova-com-Carro-de-Termovis%C3%A3o-para-evitar-interrup%C3%A7%C3%A3o-de-energia.aspx>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

[50]: PETTERSSON. **M500 USB Ultrasound Microphone.** Disponível em: <<https://www.batsound.com/?p=116>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

[51]: INSTRUMENTS, National. **Using Fast Fourier Transforms and Power Spectra in LabVIEW.** Disponível em: <<http://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/using-fast-fourier-transforms-and-power-spectra-in-labview.html>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

[52]: INSTRUTHERM. **PONTA DE PROVA P/ ALTA TENSÃO MOD. PPA-440.** Disponível em: <<https://www.instrutherm.net.br/ponta-de-prova-p-alta-tens-o-mod-ppa-440.html>>. Acesso em: 28 jun. 2019.

[53]: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16724: Ensaio com Poluição Artificial em Isoladores de Vidro e Porcelana Utilizados em Sistemas de Alta Tensão em Corrente Contínua.** 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2018. 45 p.

APÊNDICE A – Código de Matlab desenvolvido para análise dos dados coletados

```
%Matlab - FFT of an audio file
```

```

%READING THE FILE AND PLOTTING TIME DOMAIN CURVE
[y, fs]=wavread('C:\Users\Vivian\Documents\Pettersson\BatMicRecorder\Data\filen
ame');
%wavread = reads WAV-file
%y = samples
%fs = sampling frequency
t=linspace(0,length(y)/fs,length(y));
%linspace = funtion that creates time vector
%0= start time
%length(y)/fs = end time
%length(y) = number of samples in y
plot(t,y)

%TAKING PART OF VECTOR Y
y=wkeep(y,s,[FIRSTR FIRSTC]);
%wkeep = keeps part of vector or matrix
%s = size of the new vector
%FIRSTR, FIRSTC = first and last point of the vector
t=linspace(0,length(y)/fs,length(y));
plot(t,y)

%FFT
Nfft=1024;
%Nfft = length of fft
f=linspace(0,fs,Nfft);
%f =creating frequency vector
%0 = start time
%fs = End time
%Nfft = Length of the frequency vector
x=abs(fft(y,Nfft));
%x = the fft of the samples y in 1024 points
F=f(1:Nfft/2);
X=x(1:Nfft/2);
figure ; plot(F,X)

```