



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

EMANUELLE PEREIRA MOURA

**CLASSIFICAÇÃO DE SINAIS DE RADIOFREQUÊNCIA PARA  
DISCRIMINAÇÃO DE ISOLADORES DE ALTA TENSÃO**

Campina Grande, Paraíba  
Dezembro de 2015

EMANUELLE PEREIRA MOURA

CLASSIFICAÇÃO DE SINAIS DE RADIOFREQUÊNCIA PARA DISCRIMINAÇÃO DE ISOLADORES  
DE ALTA TENSÃO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Sinais

Orientador:

Professor Bruno Barbosa Albert, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Dezembro de 2015

EMANUELLE PEREIRA MOURA

CLASSIFICAÇÃO DE SINAIS DE RADIOFREQUÊNCIA PARA DISCRIMINAÇÃO DE ISOLADORES  
DE ALTA TENSÃO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Sinais

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Bruno Barbosa Albert, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de exprimir todo o meu reconhecimento ao professor Bruno Barbosa Albert, pelo tempo que dedicou à orientação desse trabalho. Sou profundamente grata por seus ensinamentos, incentivos e conselhos.

Agradeço à instituição de ensino UFCG, responsável pela minha formação acadêmica e profissional. Ao professor Glauco Fontgalland, que também contribuiu na realização deste projeto. Agradeço também a CEAL, pelo seu apoio e confiança no nosso trabalho.

Agradeço a toda minha família, em especial aos meus pais que sempre se esforçaram para garantir minha educação.

Enfim, agradeço aos meus amigos pela paciência e pelo apoio nas mais diversas situações.

## RESUMO

Isoladores elétricos quando submetidos a tensões elevadas emitem sinais de radiofrequência da ordem de MHz devido, principalmente, a ocorrência do efeito corona. Este efeito é intensificado na presença de ambiente poluído, comprometendo o funcionamento dos isoladores.

Este trabalho apresenta um meio de classificação do estado de poluição de isoladores de alta tensão de uma linha de transmissão aérea a partir dos sinais de radiofrequência emitidos pelos mesmos. Apresentamos diferentes métodos para estimar o estado limpo ou poluído em que o isolador se encontra com base na análise estatística do espectro, onde se avaliou a média e o desvio padrão dos sinais.

A fim de obter os dados necessários para a análise foram realizados três experimentos com isoladores em diferentes condições de conservação, sendo a maioria cedidos pela CEAL.

**Palavras-chave:** Isoladores de alta tensão, Classificadores, Estatística, Radiofrequência.

# ABSTRACT

High voltage electrical insulators when subjected to high voltages emit RF signals due, mainly, to the occurrence of corona. This effect is enhanced by a polluted environment, compromising the insulators' functionalities.

This paper presents a means for classifying the state of insulators used in high voltage aerial transmission lines based on the radio frequency signals emitted by them. We present a method for estimating clean or polluted state in which the insulator is. These methods are based on statistical analysis of the spectrum, where it evaluates the average and standard deviation of the signals.

In order to obtain the necessary data for the analysis were performed three experiments using insulators which were in different use conditions, most of them donated by CEAL.

**Keywords:** High voltage insulators, Classifiers, Statistics, Radio Frequency.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Isoladores de linhas de transmissão aérea.....	11
Figura 2. Alguns isoladores utilizados nos experimentos. 1. Isolador limpo 2. Isolador sujo .....	18
Figura 3. Analisador de Espectro. ....	18
Figura 4. (a) Antena Bicônica (b) Antena Log Periódica.....	19
Figura 5. Sala em que foi realizado o primeiro experimento. 1. Isolador; 2. Antena; 3. Analisador de espectro.....	20
Figura 6. Isoladores sendo submetidos à aplicação de alta tensão.....	21
Figura 7. Sinais emitidos pelos isoladores limpo e sujo na faixa de frequência de 30 a 130MHz.....	24
Figura 8. Antena Bicônica na posição horizontal quando aplicado 12 kV no isolador. Faixa 30MHz a 330MHz.....	25
Figura 9. Antena Bicônica na posição vertical quando aplicado 12 kV no isolador. Faixa 30MHz a 330MHz.....	25
Figura 10. Antena Log Periódica na posição horizontal quando aplicado 12 kV no isolador .....	26
Figura 11. Faixa de 30MHz a 330MHz com a antena na posição horizontal. Os níveis de tensão de 8kV, 12kV e 15kV.....	26
Figura 12. Pontos obtidos nas faixas de 30MHz a 130MHz. Antena na posição horizontal e quando aplicado 8kV, 12kV e 15kV. ....	27
Figura 13. Dados referentes ao experimento 2.....	28
Figura 14. Dados obtidos no experimento 2 na subfaixa 1. ....	29
Figura 15. Dados do experimento 2. Todas as subfaixas. ....	30
Figura 16. Dados do experimento 2 em todas as subfaixas analisadas. ....	30
Figura 17. Dados do experimento 2 e 3. Todas as subfaixas .....	31
Figura 18. Sinais emitidos pelos isoladores limpo e sujo na faixa de frequência de 30 a 130MHz. Experimento 3. ....	32
Figura 19. Diagrama de espalhamento do conjunto de dados da tabela 5.....	33
Figura 20. Dados do coeficiente de correlação do experimento 2.....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Grau de correlação .....	16
Tabela 2. Faixas de frequências varridas pela antena 1 .....	22
Tabela 3. Faixas de frequências varridas pela antena 2 .....	22
Tabela 4. Subfaixas de frequências selecionadas .....	28
Tabela 5. Exemplo ilustrativo do procedimento para cálculo do coeficiente de correlação.....	33

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LT	Linhas de Transmissão
RF	Radiofrequência
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LEMA	Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicadas

# SUMÁRIO

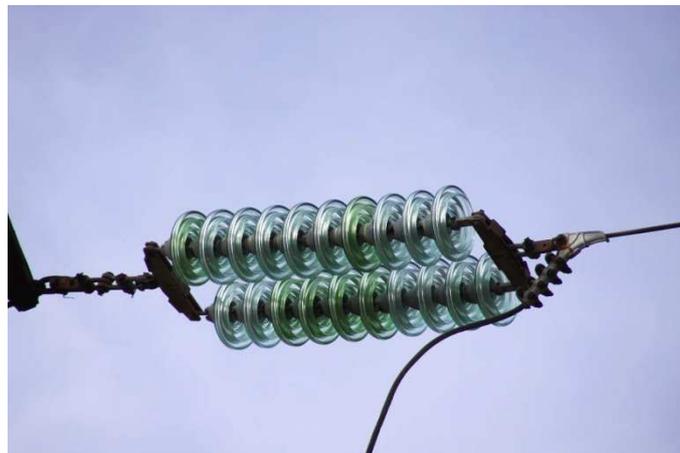
1	Introdução .....	11
1.1	Objetivos .....	12
1.1.1	Objetivos Gerais .....	12
1.1.2	Objetivos Específicos .....	12
1.2	Estrutura do trabalho .....	13
2	Fundamentação Teórica .....	14
2.1	Estatística Descritiva .....	15
3	Procedimentos Experimentais .....	17
3.1	Material Utilizado .....	17
3.1.1	Isolador de Vidro .....	17
3.1.2	Analisador de Espectro .....	18
3.1.3	Amplificador de 20dB .....	19
3.1.4	Antenas .....	19
3.2	Experimentos .....	19
3.2.1	Experimento 1 .....	20
3.2.2	Experimento 2 e Experimento 3 .....	23
4	Resultados .....	24
4.1	Resultados dos experimentos 2 e 3 .....	27
5	Conclusões .....	35
	Bibliografia .....	36

# 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica produzida nas unidades geradoras é transportada em tensões elevadas por meio de Linhas de Transmissão (LT) aérea. A tensão de trabalho das LT é muito elevada, chegando a 765 kV nas linhas que fazem a interconexão entre sistemas. Dessa forma estas precisam ser bem isoladas eletricamente para evitar a ocorrência de curtos-circuitos ou descargas elétricas entre o solo e a linha.

Os cabos de transmissão de energia devem ser suspensos por altas torres, de modo a mantê-los a uma distância segura do solo. Para dar suporte aos cabos e garantir o isolamento elétrico das LT recorre-se ao uso de cadeias de isoladores elétricos, que são necessários para garantir o bom funcionamento do sistema sem a ocorrência de interrupções do fornecimento de energia elétrica.

Figura 1. Isoladores de linhas de transmissão aérea



Fonte: <http://www.torange-pt.com>

Alguns tipos de isoladores, como o isolador de vidro, têm seu funcionamento comprometido em ambiente poluído. Embora de baixo custo quando comparado a outros componentes das LT, falhas nesses equipamentos ou mesmo um mal estado de conservação podem gerar muitas perdas para o sistema.

Quando submetidos a altas tensões os isoladores geram campos eletromagnéticos a níveis de MHz devido, principalmente, a ocorrência do efeito corona. Tal efeito ocorre em outros pontos da linha de transmissão, em subestações e

em sistemas de distribuição, podendo ser indicativo que um equipamento defeituoso está prestes a falhar.

Além da identificação de equipamentos defeituosos o efeito corona é intensificado pela poluição do ambiente ao qual o equipamento está exposto. Nesse sentido, este trabalho foi proposto visando a determinação do estado de poluição de isoladores elétricos, utilizando para tal a irradiação eletromagnética emanada pelo isolador.

Os testes foram realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT) usando isoladores de vidro cedidos pela CEAL.

## 1.1 OBJETIVOS

O trabalho desenvolvido teve os seguintes objetivos gerais e específicos.

### 1.1.1 OBJETIVOS GERAIS

- Classificar o nível de poluição com base na irradiação eletromagnética emanada pelo isolador;
- Desenvolver um método de estimação de estado do isolador quanto aos níveis de poluição utilizando métodos estatísticos e com isso indicar se há necessidade de troca ou não da cadeia.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o ruído eletromagnético gerado pelo efeito corona em uma ampla faixa de frequência;
- Identificar a faixa em que melhor se distinga o isolador de vidro sujo do limpo, correlacionando os níveis de ruído eletromagnético com os níveis de poluição dos isoladores;
- Identificar a antena adequada e a sua polarização para a captação dos sinais irradiados pelo isolador;

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 serão discutidas sucintamente o efeito corona, suas causas e seus produtos. Discutiremos também as técnicas propostas para a classificação dos isoladores.

As descrições dos materiais utilizados e dos experimentos realizados ao longo do desenvolvimento do projeto são descritas no capítulo 4. Os resultados e as análises desses experimentos podem ser encontrados no capítulo 5.

Por fim, no capítulo 6, será discutida uma série de conclusões sobre qual antena e em qual posição deveremos usá-la na captação do sinal oriundo do isolador, qual a faixa é a mais adequada e qual o nível de tensão a ser utilizado, etc.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Devido à presença de capacitâncias parasitas a distribuição da tensão ao longo da cadeia de isoladores não é uniforme. Essa não uniformidade do campo pode ocasionar correntes de fuga e descargas elétricas, principalmente nos primeiros isoladores da cadeia, uma vez que a tensão sobre estes é maior do que sobre os isoladores intermediários.

Sendo o campo elétrico em torno da cadeia de isoladores não uniforme a divergência do campo exerce influência adicional e qualquer partícula de impureza (como poeira, por exemplo) funciona como uma fonte pontual de carga, intensificando o campo naquela região.

O efeito corona surge na superfície de isoladores de uma linha de transmissão quando o valor da densidade de campo elétrico nesse componente excede o valor crítico disruptivo do ar. O valor da tensão disruptiva sofre influência de diversos fatores, tais como a pressão do ar, a umidade, tipo de tensão aplicada, fotoionização incidente, partículas de poeira e poluição.

Com o ar ligeiramente ionizado surgem pequenas descargas elétricas em torno do componente energizado, conhecidas como descargas corona. Além disso, a energia provinda do campo elétrico da linha é liberada e irradiada na forma de luminescência, emissão de sinais de radiofrequência e TV, formação de ozônio e ruído audível.

A intensificação do efeito corona em isoladores, e conseqüentemente o aumento da emissão de radiofrequência está correlacionado com o grau de poluição presente no isolador.

Com o intuito de minimizar as perdas no sistema, o monitoramento do estado do uso de isoladores em linhas de transmissão é indispensável uma vez que falhas nesses equipamentos podem acarretar danos significativos ao sistema. Uma vez detectado o estado dos isoladores, se limpo ou poluído, são empregadas técnicas de manutenção como a lavagem ou a troca das cadeias de isoladores defeituosas.

O método mais usado para monitorar os isoladores é a inspeção visual (devido ao baixo custo), no entanto, para detecção de poluição esta é muito imprecisa. Sendo assim, outras técnicas de inspeção, periódicas ou em tempo real, vêm sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas para dar maior confiabilidade ao diagnóstico de poluição.

A seguir apresentamos a teoria sobre estatística descritiva, cuja análise dos dados foi utilizada como parâmetro de classificação.

## 2.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A estatística é a ciência que apresenta processos próprios para coletar, apresentar e interpretar adequadamente conjuntos de dados. Pode-se dizer que seu objetivo é o de apresentar informações sobre os dados em análise para que se tenha maior compreensão dos fatos que os mesmos representam. A estatística descritiva, como o próprio nome já diz se preocupa em descrever os dados.

A análise estatística do conjunto de dados presente no espectro dos sinais RF foi feita a partir do cálculo da média, do desvio padrão e do coeficiente de correlação dos pontos do gráfico.

A média amostral de uma variável é a soma de todos os dados dividida pelo número total de dados.

$$M = \frac{\sum_i^n x_i}{n} \quad (1)$$

Em que:

M - média amostral

$x_i$  - amostra  $i$  do conjunto de dados

$n$  - número de amostras no conjunto de dados

Como a média engloba todos os valores ela pode ser distorcida devido à presença de valores muito discrepantes. Nesse sentido as medidas de dispersão, como variância e o desvio padrão, permitem avaliar a dispersão de um conjunto de dados em torno da média. O desvio padrão é dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

Em que:

$\sigma$  - Desvio padrão

$x_i$  - amostra  $i$  do conjunto de dados

$\bar{x}$  - valor médio

$n$  - número de amostras no conjunto de dados

O coeficiente de correlação linear, denotado por  $\rho$ , é uma medida do grau de linearidade existente entre duas variáveis. Pode ser obtido da seguinte maneira:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X, Y)}{\sqrt{var(X) \cdot var(Y)}} \quad (3)$$

Em que:

$\rho$  - Coeficiente de correlação linear

$x_i$  - amostra  $i$  do conjunto de dados  $x$

$y_i$  - amostra  $i$  do conjunto de dados  $y$

$\bar{x}$  - valor médio do conjunto de dados  $x$

$\bar{y}$  - valor médio do conjunto de dados  $y$

$n$  - número de amostras no conjunto de dados

O valor de  $\rho$  está sempre no intervalo entre -1 e +1, quanto mais próximo desses valores mais forte é a correlação entre as duas variáveis. Já quanto mais próximo de zero for o valor de  $\rho$  mais fraca é a correlação entre as duas variáveis. A Tabela 1 descreve o grau de correlação de acordo com o valor de  $\rho$ .

Valores positivos significam que quando uma variável aumenta a outra aumenta também. Valores negativos significam que quando uma variável aumenta a outra diminui.

Tabela 1. Grau de correlação

<b>Valor de <math> \rho </math></b>	<b>Grau de correlação</b>
<b>0.00 a 0.19</b>	Muito Fraca
<b>0.20 a 0.39</b>	Fraca
<b>0.40 a 0.69</b>	Moderada
<b>0.70 a 0.89</b>	Forte
<b>0.90 a 1.00</b>	Muito Forte

## 3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Durante o desenvolvimento da pesquisa foram realizados três experimentos. Todos os ensaios foram realizados no LAT (Laboratório de Alta Tensão) com auxílio de equipamentos de medição do LEMA (Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicadas), ambos situados na Universidade Federal de Campina.

A seguir será descrito o material utilizado em seguida será discutido a realização dos experimentos.

### 3.1 MATERIAL UTILIZADO

Nesse tópico será listado o material que foi necessário para a realização dos experimentos.

#### 3.1.1 ISOLADOR DE VIDRO

A maioria dos isoladores utilizados nos experimentos foi cedida pela Eletrobrás Distribuição Alagoas. Assim foram empregados nos experimentos isoladores de vidro em diferentes condições de conservação, conforme são descritos:

- Isolador II: Isolador limpo e em bom estado de conservação.
- Isolador II C111: Isolador limpo e em bom estado de conservação. Sendo o primeiro isolador da cadeia 1, cadeia em que foi retirado.
- Isolador II3: Isolador limpo e em bom estado de conservação
- Isolador Ic: isolador poluído, retirado de uma região de canal da planta da CEAL.
- Isolador Ip C516: isolador poluído. Sendo o sexto isolador da cadeia 5 (cadeia que foi retirado).
- Isolador Ip C316: isolador poluído. Sendo o sexto isolador da cadeia 3 (cadeia que foi retirado).
- Isolador Ip C713: isolador poluído. Sendo o terceiro isolador da cadeia 7 (cadeia que foi retirado).

- Isolador Ip pel: Isolador fornecido pelo LAT e encontrava-se em estado poluído. Este foi recoberto com uma película protetora hidrofóbica, cuja função é evitar o acúmulo de impurezas na superfície do equipamento.
- Isolador Ip art1: Isolador poluído artificialmente no LAT. Cuja solução de poluição artificial possuía condutividades elétrica de 1,00 mS/cm.
- Isolador Ip art8: Isolador poluído artificialmente no LAT. Cuja solução de poluição artificial possuía condutividades elétrica de 8,00 mS/cm.

Figura 2. Alguns isoladores utilizados nos experimentos. 1. Isolador limpo 2. Isolador sujo



### 3.1.2 ANALISADOR DE ESPECTRO

Foi utilizado um analisador de espectro FSL (opera na faixa de 9 kHz a 6 GHz) da Rohde&Schwarz, conforme pode ser visto na Figura 3. Esse instrumento foi utilizado para análise de sinais no domínio da frequência.

Os dados obtidos eram salvos em um dispositivo de memória portátil, permitindo a análise posterior.

Figura 3. Analisador de Espectro.



### 3.1.3 AMPLIFICADOR DE 20dB

Um amplificador de 20dB foi utilizado para amplificar o sinal de entrada a fim de facilitar a análise do sinal originalmente captado. Este equipamento foi utilizado apenas no primeiro experimento.

### 3.1.4 ANTENAS

- ANTENA 1: BICÔNICA

Foi utilizada uma antena bicônica como mostrado na Figura 4(a) para captar o espectro de sinais na faixa de frequência de 30MHz a 330MHz.

- ANTENA 2: LOG PERIÓDICA

Foi utilizada uma antena log periódica como mostrado na Figura 4(b) para captar o espectro de sinais na faixa de frequência de 300MHz a 1080MHz.

Figura 4. (a) Antena Bicônica (b) Antena Log Periódica



## 3.2 EXPERIMENTOS

Foram realizados três experimentos no LAT, todos com arranjo similar ao pode ser visualizado na Figura 5. Cada experimento foi realizado de forma semelhante e em momentos distintos visando a aquisição de novos dados e testar os métodos que estavam sendo desenvolvidos.

Uma tensão entre 8 kV e 15 kV era aplicada ao isolador fazendo com que este emitisse sinais RF que eram captados por uma antena instalada dentro da grade de

proteção, tais sinais eram gravados e salvos através do analisador de espectro acoplado à antena.

Figura 5. Sala em que foi realizado o primeiro experimento. 1. Isolador; 2. Antena; 3. Analisador de espectro.



### 3.2.1 EXPERIMENTO 1

Esse experimento foi essencial para determinar parâmetros de base para os demais experimentos, pois era necessário inicialmente obter algumas informações relevantes nos ensaios, tais como: a melhor faixa para a classificação, a melhor posição da antena e o nível de tensão mais adequado.

Nesse ensaio foi utilizado dois isoladores de vidro (ST-254 V8 CB) em condições diferentes de conservação. O primeiro encontrava-se limpo e em bom estado (isolador II). O segundo encontrava-se em estado poluído (isolador Ic). Ambos foram obtidos de uma linha de transmissão da planta de distribuição da Eletrobrás Distribuição Alagoas.

Visando a análise da influência do nível de tensão na emissão de sinais RF, foram aplicados diferentes níveis de tensão 8 kV, 12 kV e 15 kV (em valores RMS) em um único isolador, simulando a aplicação de uma tensão 69 kV na cadeia toda. Também analisamos o ruído ambiente com o nível de 0 V.

Os níveis foram escolhidos tendo em vista as seguintes condições:

- 8 kV: sistema operando em condições normais e o isolador localizado no meio da cadeia de isoladores (8 kV);
- 12 kV: o sistema opera com sobretensão de 50% e o isolador sendo o primeiro da cadeia (12 kV);
- 15 kV: o sistema opera com sobretensão severa de 87,5% e o isolador é o primeiro isolador da cadeia.

Figura 6. Isoladores sendo submetidos à aplicação de alta tensão.



Foram usadas duas antenas para a captação dos dados, a primeira varria uma faixa de 30MHz a 330MHz, a segunda varria uma faixa mais ampla de 280MHz a 1080MHz. Pode-se ver nas Tabelas 2 e 3 a divisão das faixas de frequência dos dados adquiridos.

Foram realizadas medições com as antenas dispostas nas posições horizontal e vertical, com o intuito que verificar a influência da polarização da antena na captação dos dados.

As faixas de frequências varridas para ambas as polarizações foram idênticas, conforme explicitado nas Tabelas 2 e 3. Os dados foram obtidos pelo analisador de espectro.

Tabela 2. Faixas de frequências varridas pela antena 1

<b>Antena 1</b>	
<b>Faixa</b>	<b>Frequência</b>
<b>1</b>	30MHz a 80MHz
<b>2</b>	30MHz a 130MHz
<b>3</b>	80MHz a 180MHz
<b>4</b>	130MHz a 230MHz
<b>5</b>	180MHz a 280MHz
<b>6</b>	230MHz a 330MHz
<b>7</b>	280MHz a 330MHz

Tabela 3. Faixas de frequências varridas pela antena 2

<b>Antena 2</b>	
<b>Faixa</b>	<b>Frequência</b>
<b>8</b>	280MHz a 380MHz
<b>9</b>	330MHz a 430MHz
<b>10</b>	380MHz a 480MHz
<b>11</b>	430MHz a 530MHz
<b>12</b>	480MHz a 580MHz
<b>13</b>	530MHz a 630MHz
<b>14</b>	580MHz a 680MHz
<b>15</b>	630MHz a 730MHz
<b>16</b>	680MHz a 780MHz
<b>17</b>	730MHz a 830MHz
<b>18</b>	780MHz a 880MHz
<b>19</b>	830MHz a 930MHz
<b>20</b>	880MHz a 980MHz
<b>21</b>	930MHz a 1030MHz
<b>22</b>	980MHz a 1080MHz

### 3.2.2 EXPERIMENTO 2 E EXPERIMENTO 3

Novos ensaios foram realizados de maneira semelhante ao experimento 1, descrito no item 3.2.1, com o intuito de obter mais dados e avaliar o método estatístico proposto . Focou-se na análise apenas das faixas de frequências que possibilitaram melhor resultado de classificação (varridas pela antena 1 posicionada horizontalmente) e na tensão de 10kV.

No experimento 2 foram utilizados: o isolador limpo Il C111, os isoladores elétricos sujos Ip C516, Ip C316, Ip C713 e Ip pel. Para cada isolador foram feitos 5 medições.

No experimento três foi usado o isolador Il3 que estava limpo e dois que foram poluídos artificialmente no LAT: Ip art1 e Ip art8. Para cada isolador foram feitas 10 medições.

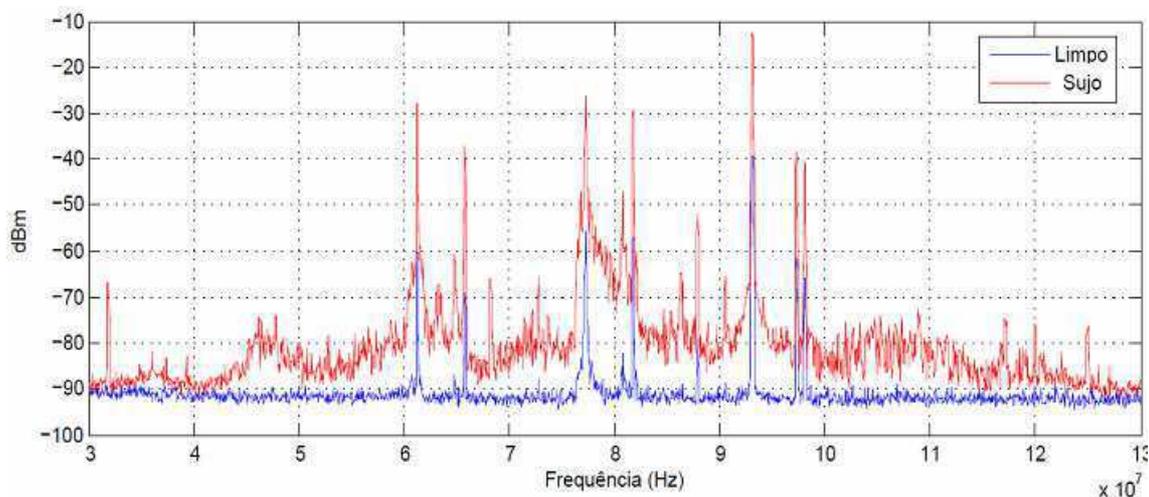
## 4 RESULTADOS

Com a realização do primeiro ensaio obtivemos 364 sinais nas mais diversas frequências (cobrindo uma faixa de 30MHz a 1030MHz), nível de tensão e polarização das antenas.

Cada sinal obtido foi salvo em um arquivo .dat contendo 2000 pontos. O tratamento e a análise dos sinais foram feitos utilizando o software MATLAB. De modo que foram gerados muitos gráficos, correspondentes às várias variáveis em estudo (faixa de frequência, antena, nível de tensão). São apresentados os gráficos que expressam o comportamento dos demais dados.

Na Figura 7 podemos observar o espectro de um sinal de um isolador limpo e de um sinal obtido a partir de um isolador sujo, onde podemos distinguir visualmente a diferença entre ambos. A análise foi feita calculando a média e o desvio padrão dos pontos correspondentes a cada sinal captado.

Figura 7. Sinais emitidos pelos isoladores limpo e sujo na faixa de frequência de 30 a 130MHz.



Inicialmente estudamos a influência da polarização da antena na captação dos sinais em laboratório. O efeito do posicionamento da antena no processo de classificação é evidenciado nos gráficos da Figura 8 e 9.

Cada ponto nos gráficos corresponde aos dados da média e desvio padrão de um sinal das faixas entre 1 a 7 (de 30 a 330MHz). Pode-se perceber que com os dados apresentados na Figura 8, é possível distinguir os sinais limpos dos sujos em frequências mais baixas. Já a antena polarizada na posição vertical, esteja em qualquer

faixa de frequência, não é capaz de classificar o estado do isolador, dado que visualmente não conseguimos separar os pontos pertencentes ao isolador limpo do sujo, ver Figura 9. Logo os resultados experimentais apontaram para melhores resultados obtidos com a antena posicionada na horizontal.

Figura 8. Antena Bicônica na posição horizontal quando aplicado 12 kV no isolador. Faixa 30MHz a 330MHz.

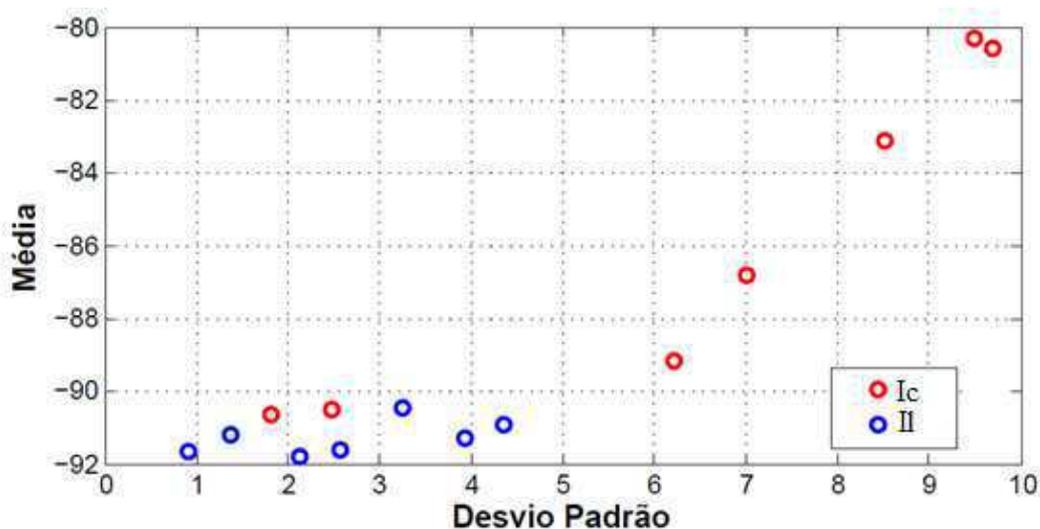
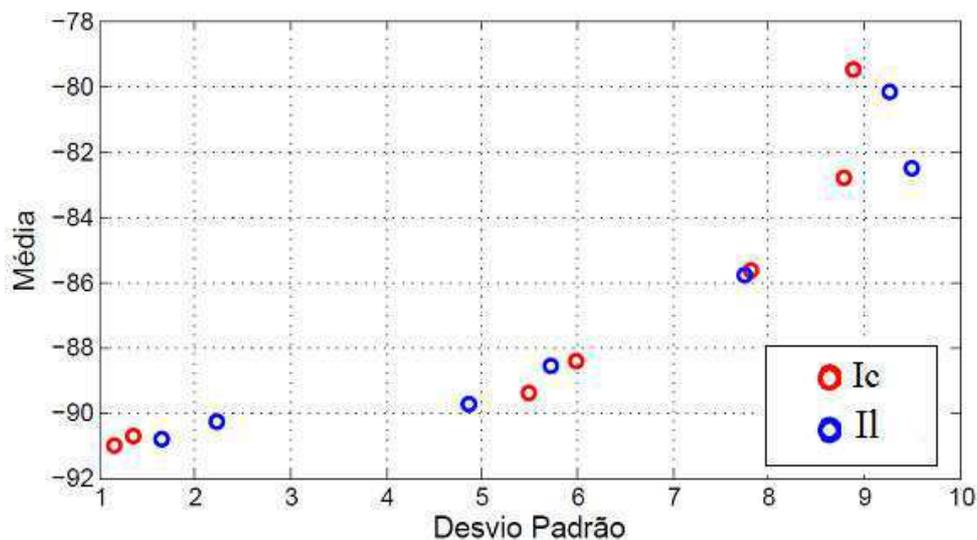
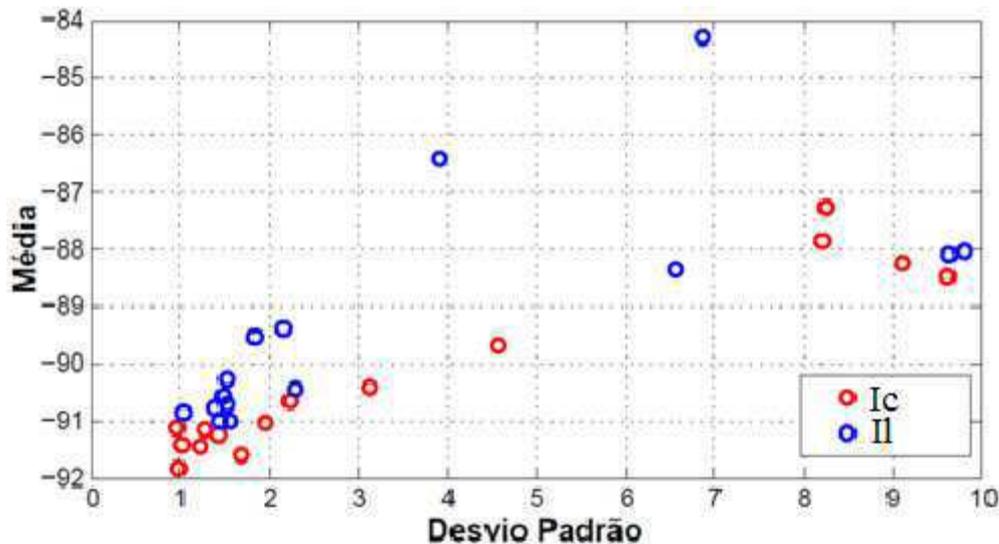


Figura 9. Antena Bicônica na posição vertical quando aplicado 12 kV no isolador. Faixa 30MHz a 330MHz.



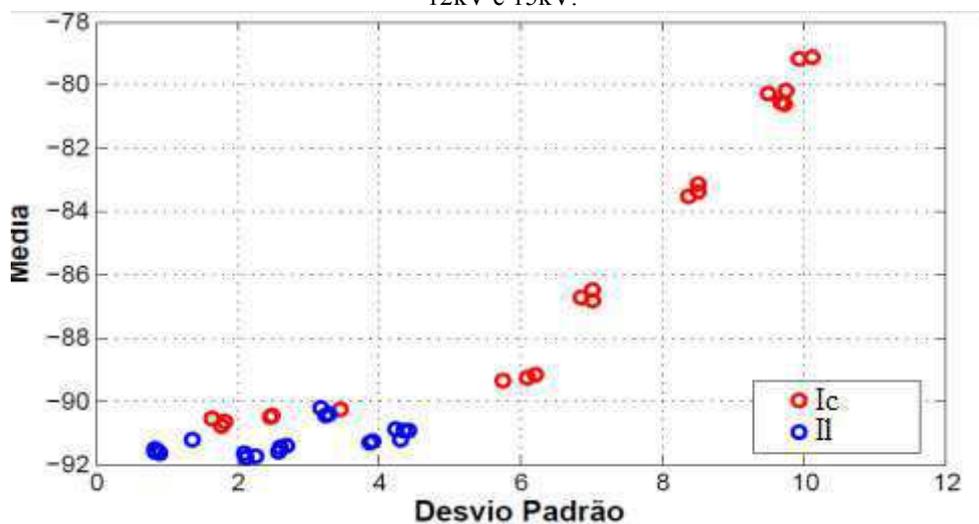
Os sinais obtidos pela antena 2 em frequências maiores (de 330MHz a 1030MHz) não forneceu resultados satisfatórios, pois não permitiu a separação dos pontos pertencentes ao isolador limpo do sujo, como evidencia a Figura 10.

Figura 10. Antena Log Periódica na posição horizontal quando aplicado 12 kV no isolador



Foi verificado também que o nível de tensão a que a cadeia de isoladores era submetida não exerceu influência sobre os resultados. Os valores da média e desvio padrão para os níveis 8 kV, 12 kV e 15 kV foram bem próximos, como podemos ver na Figura 11, que apresenta o conjunto de dados para todos os níveis de tensão.

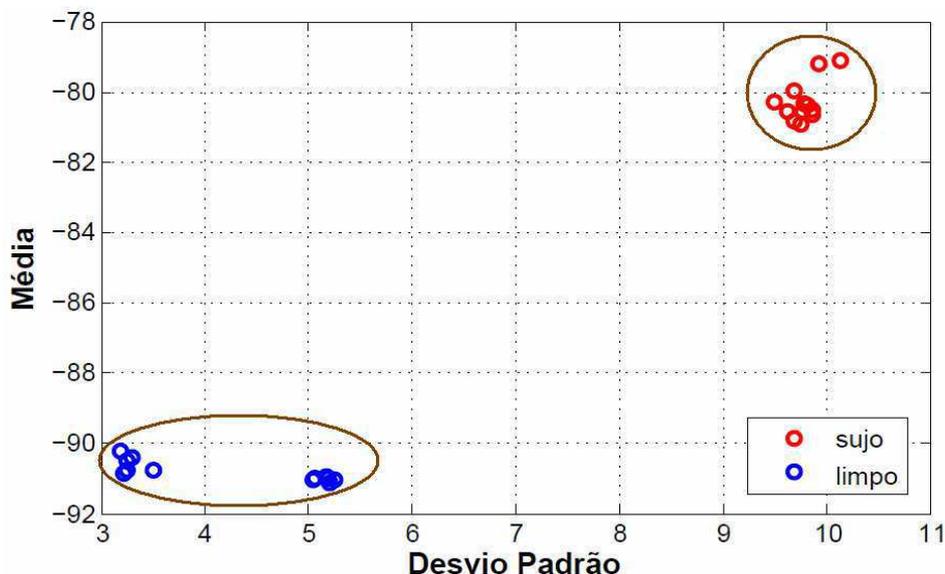
Figura 11. Faixa de 30MHz a 330MHz com a antena na posição horizontal. Os níveis de tensão de 8kV, 12kV e 15kV.



A partir da análise de todos os sinais RF foi possível delimitar a faixa de frequência de 30MHz a 130MHz onde a classificação seria possível (com a antena polarizada horizontalmente). Selecionando apenas os dados correspondentes a essa faixa de interesse, percebeu-se que os pontos dos sinais do isolador sujo estão todos agrupados na parte superior direita do gráfico da Figura 12. Já os pontos dos sinais do

isolador limpo estão agrupados na parte inferior esquerda, o que nos permitiu uma classificação bastante evidente dos padrões.

Figura 12. Pontos obtidos nas faixas de 30MHz a 130MHz. Antena na posição horizontal e quando aplicado 8kV, 12kV e 15kV.



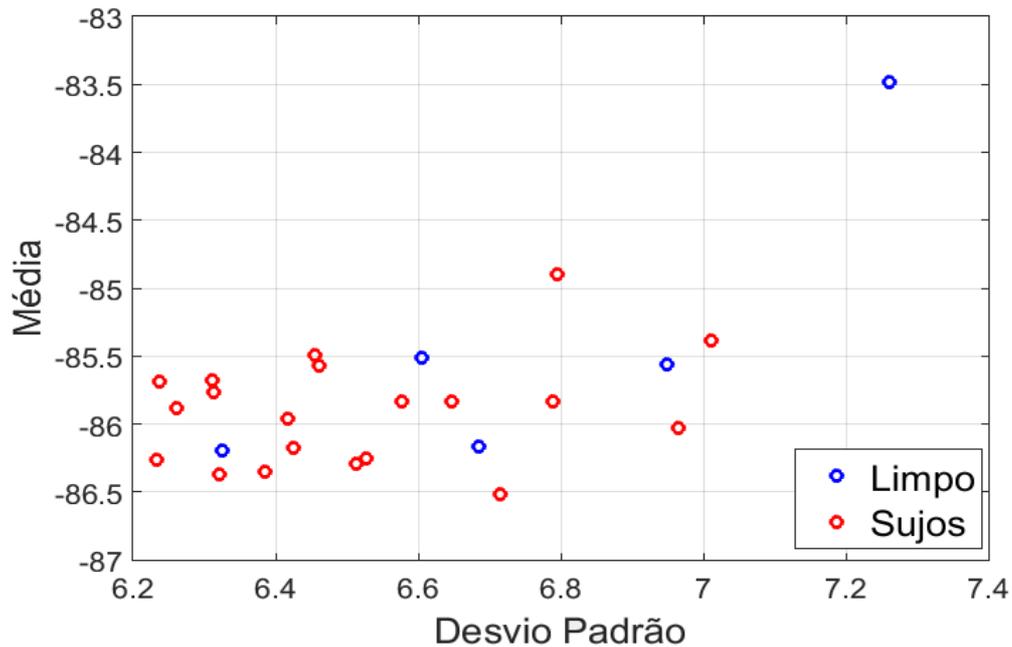
#### 4.1 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS 2 E 3

Nesses ensaios foram analisados apenas a faixa de frequência de 30 a 130MHz. Ao contrário dos resultados do ensaio anterior, a análise dos dados dos experimentos 2 e 3 não geraram resultados satisfatórios, como pode ser visto na Figura 13, onde não foi possível a separação dos pontos. Os pontos de todos os isoladores sujos são identificados pela cor vermelha e os do isolador limpo pela cor azul.

Foi proposto então outras abordagens que permitissem a separação dos dados, como a análise do coeficiente de correlação e a análise em faixas mais estreitas.

Inicialmente se dispunham de sinais entre 30MHz e 80MHz, no entanto o comportamento dos dados do desvio padrão e da média para toda essa faixa ainda não permitia a separação dos dados de forma satisfatória, de modo que foram selecionadas algumas subfaixas entre 30MHz e 80MHz.

Figura 13. Dados referentes ao experimento 2.



As subfaixas mais importantes para a discriminação (baseado nos dados do experimento 2) são:

Tabela 4. Subfaixas de frequências selecionadas

Subfaixas selecionadas	
Subfaixa	Frequência
1	30.5MHz a 33.5MHz
2	38.7MHz a 39.3MHz
3	50.3MHz a 50.7MHz
4	76MHz a 76.3MHz

No experimento 2 foram realizadas 5 medições com 4000 pontos para cada isolador. No experimento 3 foram feitas 10 medições com 16000 pontos para cada isolador. A faixa de frequência varrida foi de 30MHz a 80MHz. A nova abordagem consiste em seguir os seguintes passos:

1. Calcular o desvio padrão de cada frequência entre as N medições de um mesmo isolador.
2. Calcular o desvio padrão dos dados obtidos no passo 1 em uma subfaixa de interesse.

3. Calcular a média dos dados obtidos no passo 1 em uma subfaixa de interesse.

A classificação do isolador se deu com base no valor das etapas anteriores. O resultado desse método para a subfaixa 1 é mostrado na Figura 14, para todos os isoladores analisados.

Os resultados para todas as subfaixas analisadas podem ser observados na Figura 15. Foi observado que é possível delimitar uma região de separação em que seja possível discriminar os sinais.

Figura 14. Dados obtidos no experimento 2 na subfaixa 1.

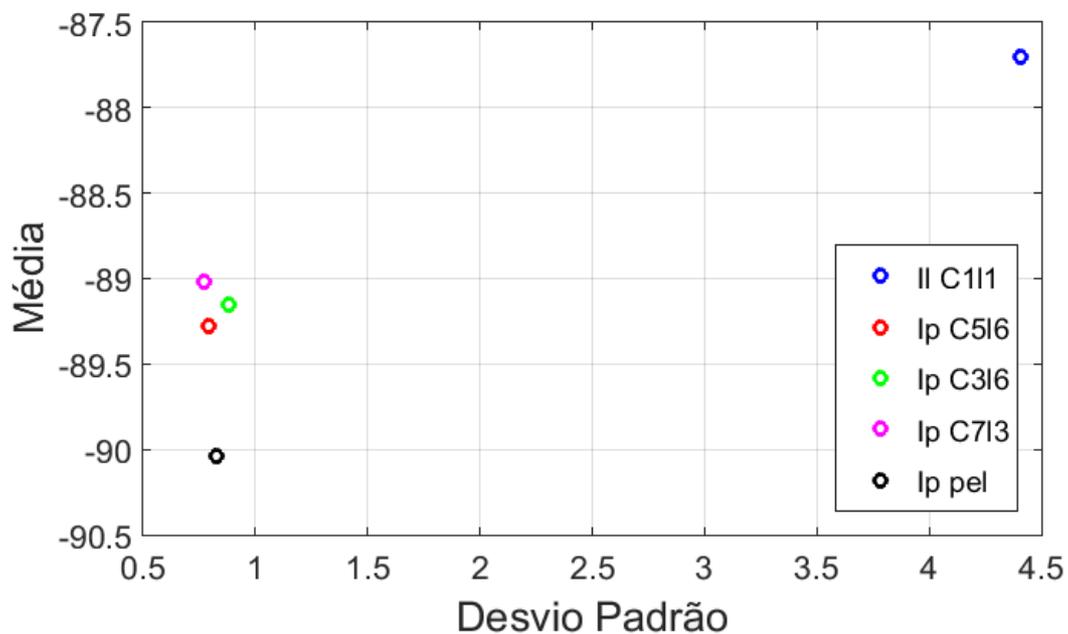
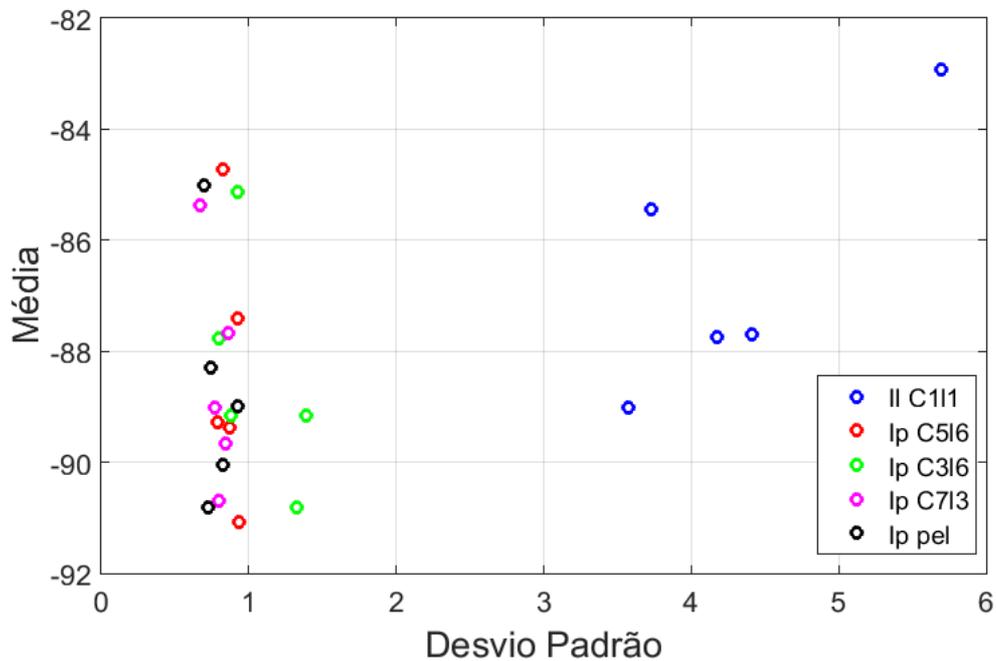
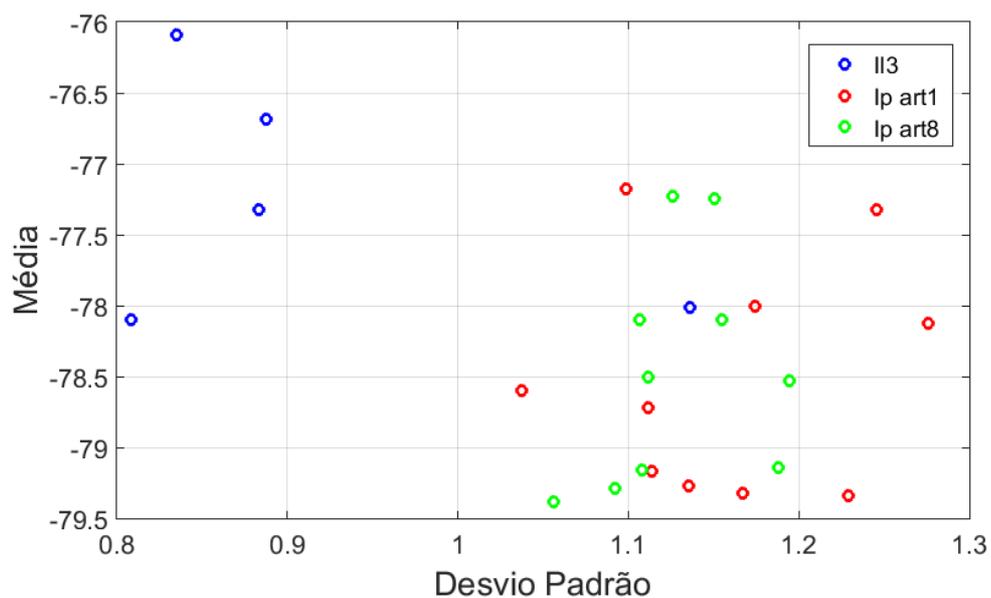


Figura 15. Dados do experimento 2. Todas as subfaixas.



Esse método foi aplicado aos dados obtidos no terceiro ensaio, como pode ser visto na Figura 16. Percebe-se que a região de distinção entre os isoladores é muito estreita, sendo a probabilidade de erro na classificação muito alta.

Figura 16. Dados do experimento 2 em todas as subfaixas analisadas.

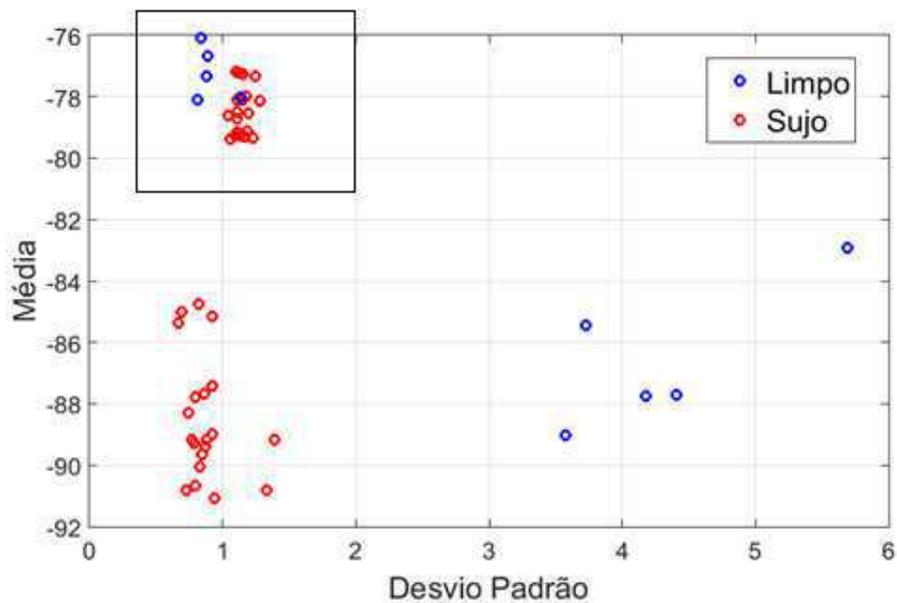


Na Figura 17 temo-se todos os resultados para o experimento 2 e 3 em todas as subfaixas selecionadas, considerando apenas os casos do isolador sujo e limpo. A região

destacada no gráfico é a região onde estão localizados os pontos obtidos no terceiro experimento.

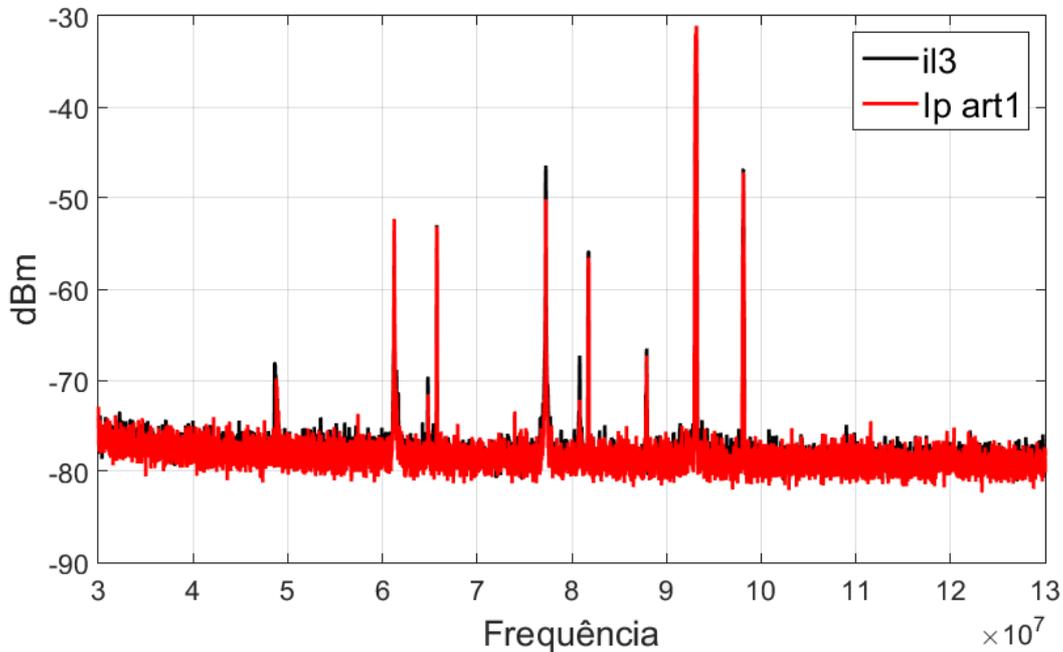
Observou-se que no caso do experimento 3 a divisão nas subfaixas, que seriam as mais importantes para classificação, não rendeu resultados expressivos. Isso porque os pontos do padrão limpo do experimento 3 ficaram muito próximos dos sujos, inviabilizando a utilização dessa abordagem.

Figura 17. Dados do experimento 2 e 3. Todas as subfaixas



Esse resultado é explicado ao ser analisado o espectro dos sinais obtidos no terceiro experimento, ver Figura 18. Foi constatado que os sinais pertencentes ao isolador limpo são quase idênticos aos sinais emitidos pelo isolador sujo, o que dificulta a extração de informação e conseqüentemente a classificação.

Figura 18. Sinais emitidos pelos isoladores limpo e sujo na faixa de frequência de 30 a 130MHz. Experimento 3.



Outra abordagem analisada foi pelo coeficiente de correlação linear entre duas frequências contíguas. Para tal, procedeu-se da seguinte maneira:

1. Consideraram-se as frequências  $f_1$  e  $f_2$  de cada medição;
2. Considerou-se o conjunto dos valores de potência (em dBm) referentes a cada frequência de  $f_1$  e de  $f_2$  de cada medição;
3. Calcula-se o coeficiente de correlação entre os valores em dBm dos conjuntos  $f_1$  e  $f_2$ .

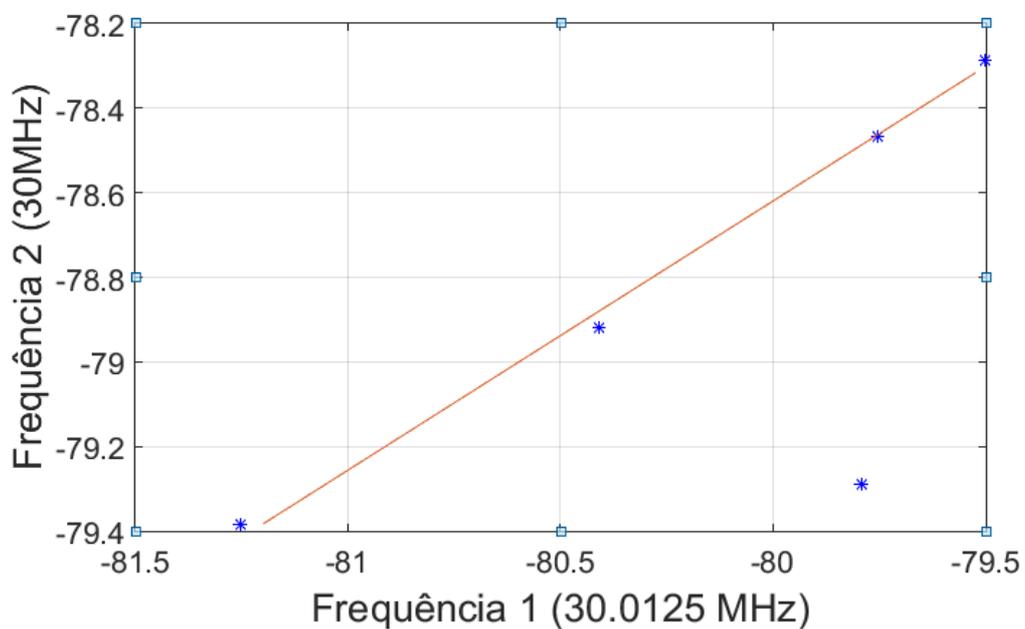
Um exemplo desse procedimento é ilustrado na Tabela 5, em que cada linha representa os valores da potência em dBm de 5 medição de um único isolador. A coluna de  $f_1$  corresponde a frequência de 30MHz e a coluna  $f_2$  corresponde a frequência 30.0125MHz, que é a próxima frequência varrida. Por fim calculou-se o coeficiente de correlação entre o conjunto de  $f_1$  e  $f_2$ .

O diagrama de espalhamento dos dados da tabela 5 que evidencia a correlação forte entre os pontos, é ilustrado na Figura 19.

Tabela 5. Exemplo ilustrativo do procedimento para cálculo do coeficiente de correlação

	f1(30000000) ▾	f2(30012500) ▾
dBm	-79,79157257	-79,28986359
dBm	-79,50170898	-78,28669739
dBm	-80,41007233	-78,91803741
dBm	-79,75518036	-78,46549988
dBm	-81,25411987	-79,38541412
Coefic. de Correlação	0,705194099	

Figura 19. Diagrama de espalhamento do conjunto de dados da tabela 5



Esse método foi aplicado aos sinais do experimento 2. De maneira que após a obtenção dos vários valores de coeficiente de correlação em cada frequência (4000 no total) o grau de correlação foi distribuído em:

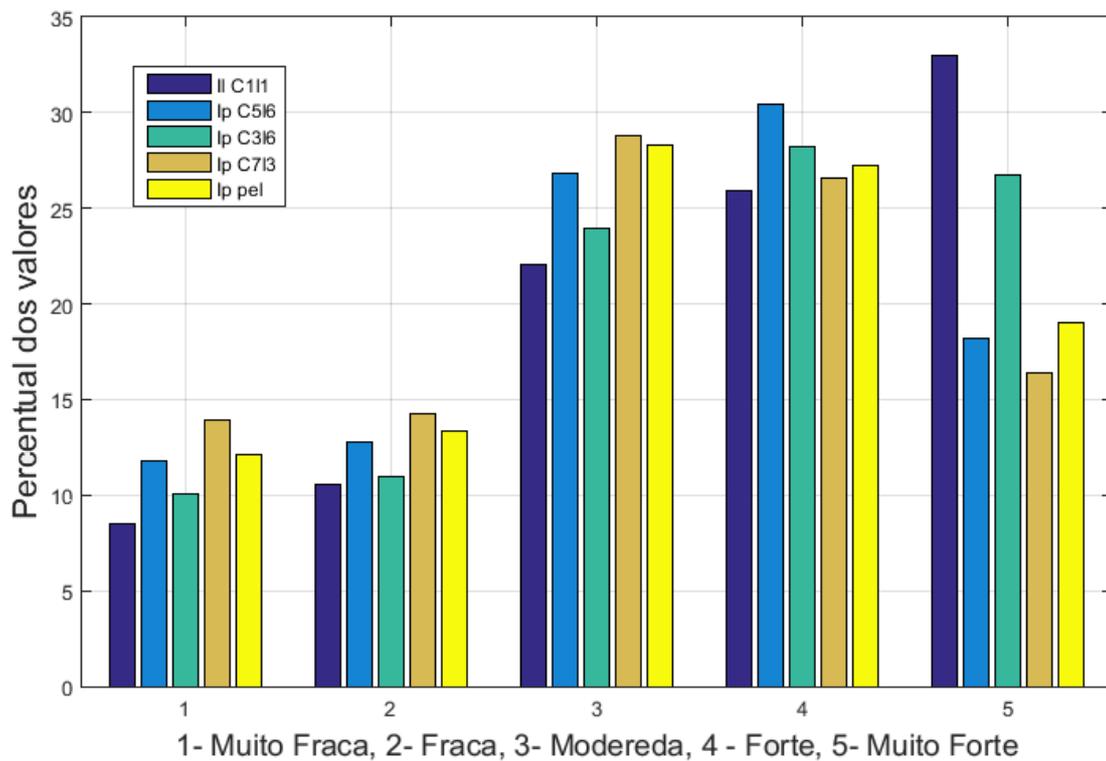
- Muito fraca:  $0 < |\rho| < 0.19$
- Fraca:  $0.20 < |\rho| < 0.39$
- Moderada:  $0.40 < |\rho| < 0.69$
- Forte:  $0.70 < |\rho| < 0.89$
- Muito Forte:  $0.90 < |\rho| < 1.00$

Os resultados, em porcentagem, dos dados que apresentaram grau de correlação muito fraco, fraco, moderado, forte e muito forte encontram-se na Figura 20.

Ao analisar esses dados percebemos que isoladores limpos possuem o grau de correlação predominantemente muito forte (cerca de 33% dos dados). Enquanto que isoladores poluídos possuem o grau de correlação predominantemente forte ou moderado. Essa característica se manteve nos resultados dos experimentos 2 e 3.

Sinais oriundos de um mesmo isolador limpo são fortemente correlacionados entre si, já em sinais que são emitidos por um isolador sujo apresentam grau correlação menor devido ao ruído provocado pelo efeito corona.

Figura 20. Dados do coeficiente de correlação do experimento 2



## 5 CONCLUSÕES

Com a realização do primeiro experimento pode-se concluir que a polarização da antena influencia muito nos resultados obtidos. Com a antena posicionada verticalmente a classificação não é possível devido aos dados serem muito semelhantes. A polarização horizontal permite a distinção dos pontos apenas nas frequências menores, em frequências mais elevadas, especialmente a faixa varrida pela antena 2, a localização pontos do isolador sujo se assemelha ao do isolador limpo.

A faixa adequada para a distinção dos padrões limpo ou sujo é de 30MHz a 130MHz (em torno da faixa de FM). De modo que os melhores resultados foram obtidos com a antena bicônica polarizada na posição horizontal. Foi observado também que os sinais RF emitidos pelos isoladores não variam muito com o nível de tensão, sendo uma espécie de assinatura de cada isolador.

A análise dos dados dos experimentos 2 e 3, ao ser aplicado o mesmo método utilizado para o primeiro ensaio, não permitiu a classificação do estado de poluição do isolador. Procurou-se então aplicar métodos alternativos, também baseados na média e no desvio padrão dos dados dos sinais, em que se utilizaram faixas menores de frequência.

Embora a aplicação das novas abordagens tenha fornecido resultados satisfatórios para dados provenientes de um ensaio específico, quando utilizada em sinais de um ensaio diferentes o resultados não se comportaram conforme o esperado, pois inviabilizavam a classificação.

A abordagem da análise estatística da média e do desvio padrão poderá ser melhor explorada analisando faixas de frequência ainda mais estreitas, ou mesmo, apenas um número limitado de frequências no espectro que permita a aplicação do método. Além disso, a aquisição de novos dados é fundamental para poder comprovar a utilização de tais técnicas.

## Bibliografia

FERREIRA, T. V. (2011). *Estimação Inteligente da Poluição de Isolamentos Elétricos Baseada nos Vecse do Ruído Ultrassônico*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica, Campina Grande

Grejo, R. I. Barrico J. J. *Manutenção em cadeias de isoladores de linha de transmissão de energia elétrica*.

*Interpretação do coeficiente de correlação*. Disponível em  
<<http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/node74.html>> . Acessado em setembro de 2015.

Leal, R. M.(2008) *Rádio Interferência Proveniente de Linhas de Transmissão*. PUCRS, Porto Alegre

*MATLAB® Primer Tutorial*. Disponível em  
<[https://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/matlab/getstart.pdf](https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf)> Acessado em novembro de 2015

S. Theodoridis and K. Koutroumbas. Pattern recognition and neural networks. *Machine Learning and Its Applications*, 2001.