

Sinais de Radiofrequência Aplicados à Classificação de Isoladores de Alta Tensão

Emanuelle Pereira Moura, B. Sc.

Bruno Barbosa Albert, D. Sc.

Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Lenilson Andrade Barbosa

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

58429-900, Campina Grande – PB – Brasil

tarso@dee.ufcg.edu.br

Resumo—Durante o monitoramento de isoladores, a interpretação dos dados e a tomada de decisão realizadas exclusivamente por humanos podem ser questionáveis. Assim, percebe-se a importância do uso de ferramentas adequadas para o apoio à decisão. Este trabalho apresenta métodos estatísticos para classificação de sinais de rádio frequência emitidos por isoladores de alta tensão quando energizados. Nesse sentido foram realizados vários experimentos usando-se isoladores (e cadeia de isoladores) de vidro submetidos a alta tensão, tanto em laboratório como em campo, e medições de sinais de rádio frequência foram registrados. Os resultados preliminares obtidos pela análise estatística quanto ao nível de poluição (ou defeitos) desses sinais foram satisfatórios, mostrando a possibilidade de classificação dos isoladores de alta tensão.

Palavras-chave—Alta tensão; Isoladores; Radiofrequência, Classificação, Estatística.

I. INTRODUÇÃO

A energia elétrica produzida nas unidades geradoras é transportada em tensões elevadas por meio de Linhas de Transmissão (LT) aérea. Os cabos aéreos 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, minimizando a ocorrência de interrupções do fornecimento de energia elétrica.

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 na faixa de mega-hertz devido, principalmente, à 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.

Várias pesquisas comprovam a correlação entre as condições operativas dos isoladores e a emissão de ondas eletromagnéticas e/ou acústicas [1]-[5].

Nesse sentido, a proposta desse trabalho é a determinação do estado de poluição de isoladores elétricos, utilizando para tal a irradiação eletromagnética emanada pelo isolador. Foram realizados testes em campo e em laboratório.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Devido à presença de capacitâncias parasitas a distribuição da tensão ao longo da cadeia de isoladores de vidro 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 nas redondezas de eletrodos energizados quando o valor da densidade de campo elétrico nesse componente excede o valor crítico disruptivo do ar. No caso de isoladores nas LT, estes eletrodos são as ferragens: pino e campânula. 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. Além disso, a energia provinda do campo elétrico da linha é liberada e irradiada na forma de luminescência, emissão de sinais de Radiofrequência (RF), formação de ozônio e ruído

audível. A intensificação do efeito corona em isoladores, e consequentemente o aumento da emissão de RF está correlacionado com o grau de poluição presente no isolador, bem como com outros fatores, como o estado de conservação e a geometria.

Com o intuito de minimizar as perdas no sistema, o monitoramento do estado de isoladores em linhas de transmissão é indispensável, uma vez que falhas nesses equipamentos podem acarretar danos significativos (financeiros e/ou intangíveis). 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 é apresentada a teoria sobre estatística descritiva, cuja análise dos dados foi utilizada como parâmetro de classificação.

A. 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 [6].

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. Definições para tais parâmetros podem ser encontradas em [6].

III. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Durante o desenvolvimento da pesquisa foram realizados experimentos no Laboratório de Alta Tensão (LAT) com auxílio de equipamentos de medição do Laboratório de Eletromagnetismo e Micro-ondas Aplicadas (LEMA), ambos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Também foi realizado um experimento em campo na região de Rio Largo, em Alagoas, com o auxílio da equipe de manutenção da Eletrobrás Distribuição Alagoas (EDA).

A. Material Utilizado

A maioria dos isoladores utilizados nos experimentos foi cedida pela EDA. Assim foram empregados nos experimentos

isoladores de vidro em diferentes condições de conservação, conforme são descritos:

- **II:** novo, limpo e em bom estado de conservação;
- **II C111:** limpo e em bom estado de conservação. Sendo o primeiro isolador da cadeia 1, cadeia da qual foi retirado;
- **II3:** usado, limpo e em bom estado de conservação;
- **Ic:** poluído, retirado de região de canaveira da EDA;
- **Ip C516:** poluído. Sexto isolador da cadeia 5 (cadeia da qual foi retirado);
- **Ip C316:** poluído. Sexto isolador da cadeia 3 (cadeia da qual foi retirado);
- **Ip C713:** isolador poluído. Sendo o terceiro isolador da cadeia 7 (cadeia da qual foi retirado);
- **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;
- **Ip art1:** poluído artificialmente no LAT, com solução salina de condutividade 1,00 mS/cm;
- **Ip art8:** poluído artificialmente no LAT, com solução salina de condutividade 8,00 mS/cm;
- **CI:** Cadeia de isoladores em bom estado retirada da planta da EDA;
- **Cd1:** Cadeia defeituosa retirada da planta da EDA
- **Cd2:** Cadeia defeituosa retirada da planta da EDA.

Todos os experimentos, exceto o Experimento 4, foram realizados no LAT. Dentre estes, os três primeiros com arranjo similar ao que pode ser visualizado na Figura 1.



Figura 1. Sala em que foram realizados os três primeiros experimentos.
1. Isolador; 2. Antena; 3. Analisador de espectro.

Foram utilizados dois analisadores de espectro, a saber: FSL6 da Rohde & Schwarz; e N9912A FieldFox da Agilent (equipamento portátil usado em campo). Os dados obtidos foram salvos em um dispositivo de memória portátil, permitindo a análise posterior.

Foram utilizadas uma antena bicônica para a faixa de frequência de 30 MHz a 330 MHz e uma antena log periódica para a faixa de frequência de 300 MHz a 1080 MHz.

B. Experimento 1

Esse experimento foi essencial para determinação da: a melhor faixa de frequência para a classificação, a melhor polarização da antena e se o nível de tensão aplicado no isolador influenciaria nos resultados [7].

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

Visando a análise da influência do nível de tensão na emissão de sinais RF, foram aplicados diferentes níveis de tensão: 8 kV emulando um isolador localizado no meio da cadeia de isoladores para uma linha de transmissão de 69 kV operando em condições normais; 12 kV e 15 kV, emulando o primeiro isolador de uma cadeia operando com sobretensão de 50% e de 87,5% respectivamente (valores RMS). Também analisamos o ruído ambiente com o nível de tensão de 0 V.

Foram usadas duas antenas para a captação dos dados, a primeira varria uma faixa de 30 MHz a 330 MHz, a segunda varria uma faixa mais ampla de 280 MHz a 1080 MHz. 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

C. Experimentos 2 e 3

Esses ensaios foram realizados de maneira semelhante ao experimento 1, descrito na subseção anterior, com o intuito de obter mais dados e avaliar o método estatístico proposto para classificação dos isoladores. Focou-se na análise apenas das faixas de frequências que possibilitaram melhor resultado de classificação. Empregou antena bicônica polarizada horizontalmente e tensão de 10 kV, emulando o primeiro isolador da cadeia em condições normais de operação.

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

No experimento 3 foram usados o isolador II3 que estava limpo e dois isoladores que foram poluídos artificialmente no LAT: Ip art1 e Ip art8. Para cada isolador foram feitas 10 medições.

D. Experimento 4

O experimento 4 foi realizado em campo na região de Rio Largo, Alagoas. O procedimento foi semelhante ao do primeiro

experimento, contudo empregando o analisador de espectro portátil. A torre que continha os isoladores avaliados continha três linhas de 69 kV: duas linhas com cadeias de isoladores de vidro defeituosas, Cd1 e Cd2, que estavam programadas para serem trocadas; e uma linha com um isolador polimérico em bom estado, conforme pode-se observar na Fig. 2.



Figura 2. Torre contendo isoladores avaliados.

Os dados foram obtidos posicionando-se as antenas em dois locais diferentes, apontado para um dos isoladores defeituoso. Evidentemente não era possível evitar a influência do outro isolador defeituoso nas medições.

E. Experimento 5

O experimento 5 foi realizado no Salão de Alta Tensão do LAT. Nos ensaios foram utilizadas uma cadeia em bom estado, Cl, e as duas cadeias defeituosas, Cd1 e Cd2, retiradas do experimento em campo. Os ensaios cobriram a faixa de frequência de 30 MHz a 1 GHz, com as antenas polarizadas horizontalmente e verticalmente, como no primeiro experimento. As cadeias foram energizadas com 44 kV RMS.

IV. RESULTADOS

A. Resultados do Experimento 1

Os resultados do primeiro experimento foram mostrados em [7]. O método de análise foi o cálculo da média e do desvio padrão [8] dos sinais adquiridos pelo analisador de espectro. Na Fig. 3 apresentam-se os pontos obtidos na faixa de 30 MHz a 130 MHz com a antena na posição horizontal quando aplicadas as tensões de 8 kV, 12 kV e 15 kV RMS nos isoladores testados.

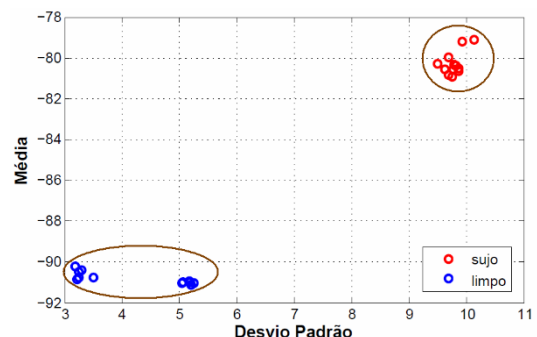


Figura 3. Pontos obtidos nas faixas de 30MHz a 130MHz. Antena na posição horizontal e quando aplicado 8kV, 12kV e 15kV.

Totalizaram-se 364 sinais, sendo gerado um ponto no gráfico desvio padrão versus média para cada sinal. Esse método se mostrou bastante eficaz na classificação dos isoladores testados principalmente nas faixas iniciais de frequência de 30 MHz a 130 MHz, com a antena polarizada horizontalmente. A variação de tensão de 8 kV, 12 kV a 15 kV RMS não produziram efeitos significativos nos resultados.

B. Resultados dos Experimentos 2 e 3

Com os resultados do primeiro experimento, os experimentos 2 e 3 se concentraram na faixa de frequência de 30 MHz a 130 MHz, com a antena na posição horizontal e uma tensão de 10 kV RMS aplicada aos isoladores testados. 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 Fig. 4. Os pontos de todos os isoladores sujos são identificados pela cor vermelha e os do isolador limpo pela cor azul.

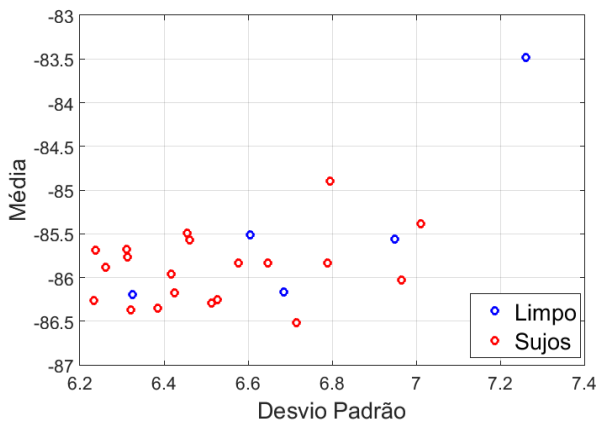


Figura 4. Dados coletados no experimento 2.

Foram propostas 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 30 MHz e 80 MHz, 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.

As subfaixas mais importantes para a discriminação (baseado nos dados do experimento 2) são mostradas na Tabela I.

TABELA I. SUBFAIXAS DE FREQUÊNCIAS SELECIONADAS

Subfaixa	Frequências limitrofes
1	30,5 MHz a 33,5 MHz
2	38,7 MHz a 39,3 MHz
3	50,3 MHz a 50,7 MHz
4	76 MHz a 76,3 MHz

No experimento 2 foram realizadas 5 medições com 4.000 pontos para cada isolador. No experimento 3 foram feitas 10 medições com 16.000 pontos para cada isolador. Tal aumento se deu no sentido de se verificar qual a resolução seria mais adequada. A faixa de frequência varrida foi de 30 MHz a 80 MHz. A nova abordagem consiste em calcular:

1. O desvio padrão de cada frequência entre as N medições de um mesmo isolador;
2. O desvio padrão dos dados obtidos no passo 1 em uma subfaixa de interesse;
3. 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 Fig. 5, para todos os isoladores analisados.

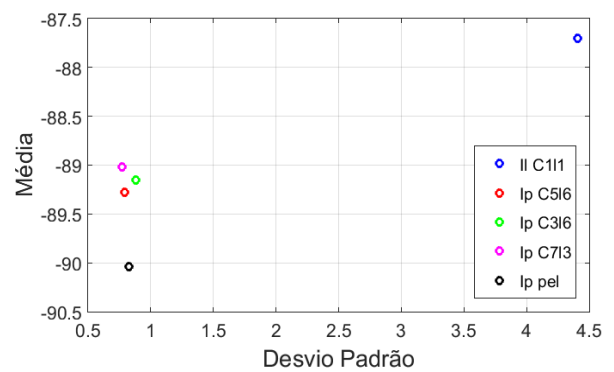


Figura 5. Dados obtidos no experimento 2 na subfaixa 1.

Os resultados para todas as subfaixas analisadas podem ser observados na Fig. 6. Foi observado que é possível delimitar uma região de separação em que seja possível discriminar os sinais.

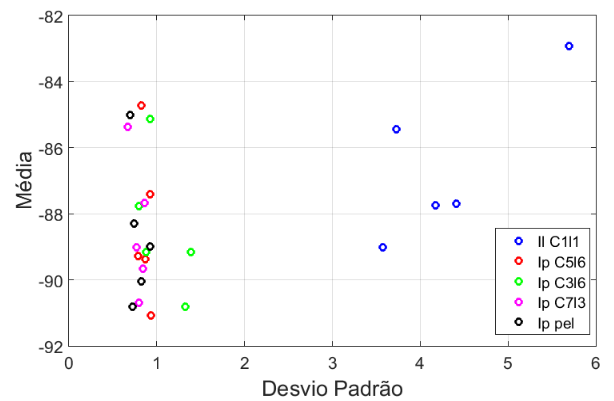


Figura 6. Dados do experimento 2. Todas as subfaixas.

Esse método foi aplicado aos dados obtidos no terceiro ensaio, como pode ser visto na Figura 7. Percebe-se que a região de distinção entre os isoladores é muito estreita, sendo a probabilidade de erro na classificação muito alta.

Na Figura 8 apresentam-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.

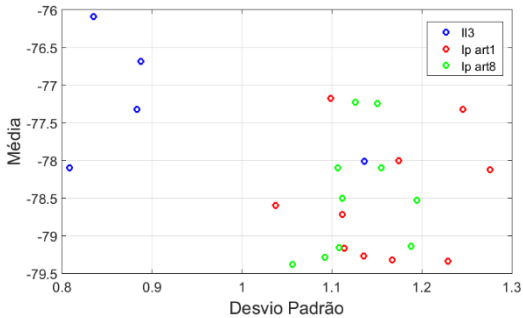


Figura 7. Dados do experimento 3 em todas as subfaixas analisadas.

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.

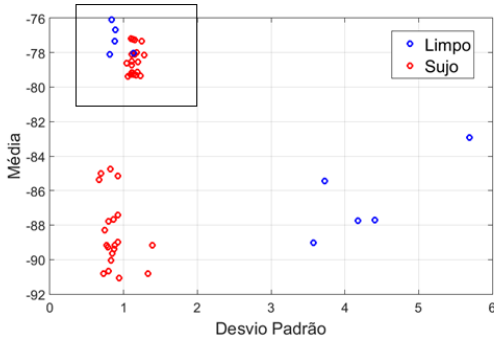


Figura 8. Dados do experimento 2 e 3. Todas as subfaixas.

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 .

Considerou-se o conjunto dos valores de potência (em dBm). Um exemplo desse procedimento é ilustrado na Tabela II, em que cada linha representa os valores da potência em dBm de 5 medições de um único isolador. A coluna de f_1 corresponde a frequência de 30 MHz e a coluna f_2 corresponde a frequência 30,0125 MHz, que é a próxima frequência varrida. Por fim

calculou-se o coeficiente de correlação entre o conjunto de f_1 e f_2 .

TABELA II. SUBFAIXAS DE FREQUÊNCIAS SELECIONADAS

Subfaixa	F1 (30,0000 MHz)	F2 (30,0125 MHz)
dBm	-79,79157257	-79,28986359
dBm	-79,50170898	-78,28669769
dBm	-80,41007233	-78,91803741
dBm	-79,75518036	-78,46549988
dBm	-81,25411987	-79,38541412
Coeficiente de Correlação: 0,705194099		

Esse método foi aplicado aos sinais do experimento 2. Após a obtenção dos vários valores de coeficiente de correlação em cada frequência (4000 no total) o grau de correlação foi distribuído conforme Tabela III.

TABELA III. GRAUS DE CORRELAÇÃO OBTIDOS

Muito fraca	$0,00 < \rho < 0,19$
Fraca	$0,20 < \rho < 0,39$
Moderada	$0,40 < \rho < 0,69$
Forte	$0,70 < \rho < 0,89$
Muito Forte	$0,90 < \rho < 1,00$

O diagrama de espalhamento dos dados da Tabela II, que evidencia a correlação forte entre os pontos, é ilustrado na Fig. 9.

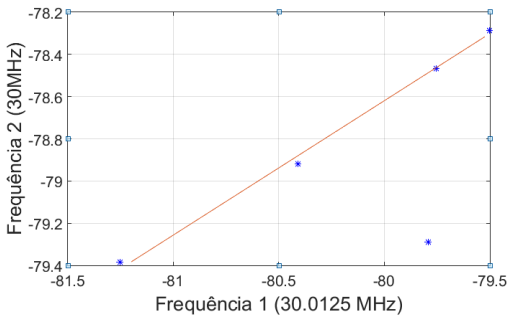


Figura 9. Diagrama de espalhamento do conjunto de dados da Tabela II.

Os resultados, em percentagem dos dados que apresentaram grau de correlação muito fraco, fraco, moderado, forte e muito forte encontram-se representados na Fig. 10.

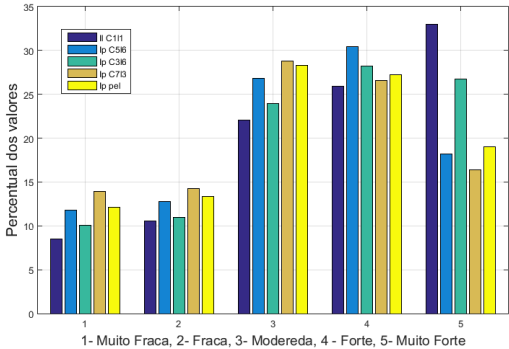


Figura 10. Dados do coeficiente de correlação do experimento 2.

A análise destes dados evidencia 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.

C. Resultados dos Experimentos 4 e 5

O experimento 4 foi realizado em campo com duas cadeias de isoladores de vidro defeituosas, tendo sido marcadas para troca e um isolador polimérico em bom estado. Como não foi possível se recolher sinais de uma torre contendo cadeias de isoladores de vidro em bom estado e limpos, a análise dessas medições foi feita em conjunto com o experimento 5 descrito na subseção anterior. Foi considerada a faixa de frequência de 30 MHz a 80 MHz e utilizado o método estatístico desvio padrão versus média dos sinais capturados pelo analisador de espectro. Podem-se observar na Fig. 11 os resultados obtidos.

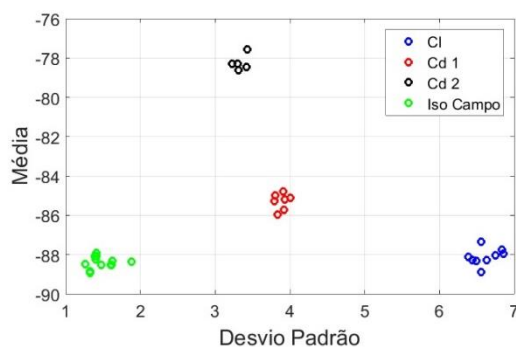


Figura 11. Resultados obtidos com o método estatístico para os exp. 4 e 5.

Houve uma clara separação entre as cadeias Cd1 e Cd2, cujas medições foram feitas em laboratório, apesar de ambas apresentarem defeito similar (isolador quebrado). A cadeia CI, em bom estado, teve seus resultados colocados à direita do gráfico, e os resultados das medições em campo ficaram em uma região mais à esquerda. Esses últimos resultados indicam uma boa possibilidade de classificação do estado físico de cadeias de isoladores energizadas pela análise dos sinais de rádio frequência emitidos.

V. CONCLUSÕES

Com a realização do primeiro experimento pode-se concluir que a polarização da antena influencia muito nos resultados obtidos. A polarização horizontal permite a distinção dos pontos especialmente nas frequências mais baixas. Em frequências

mais elevadas, especialmente a faixa varrida pela antena 2, a separabilidade diminuiu.

A faixa adequada para a distinção dos padrões limpo ou sujo demonstrou-se ser de 30 MHz a 130 MHz. Os melhores resultados foram obtidos com a antena bicônica polarizada na posição horizontal.

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.

A abordagem pela análise estatística da média e do desvio padrão poderá ser melhor explorada analisando faixas de frequência ainda mais estreitas.

A correlação das frequências adjacentes dos sinais mostrou que isoladores limpos estão mais correlacionados que os isoladores poluídos. Pretende-se aumentar o número de ensaios a fim de consolidar-se o método de classificação.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Eletrobrás Distribuição Alagoas e ao Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEMA) do DEE/UFCG pelo apoio na realização desse trabalho.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] Harrold, R. T. Acoustic Waveguides for Sensing and Locating Electrical Discharges in High Voltage Power Transformers and other Apparatus. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 98, n. 2, p. 449-457, 1979.
- [2] Lundgaard, L. E. Partial Discharge XIII: acoustic partial discharge detection-fundamental considerations. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 8, p. 25-31, 1992.
- [3] Abdel-Salam, M.; Abdel-Sattar, S.; Sayed, Y.; Ghally, M. "Early Detection of Weak Point in MEEC Distribution System". In: Industry Applications Conference Record of the 2001 IEEE, 2001, Chicago. v. 4, p. 2541-2545.
- [4] Ferreira, T. V.; Germano, A. D.; Costa, E. G. "Ultrasound and Artificial Intelligence Applied to the Pollution Estimation in Insulations". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 12, p. 583-589, 2012.
- [5] Rocha, P. H. V.; Fontgalland, G., "Measuring the radiation bands of overhead power lines glass insulators". Proceeding of the IEEE 2014 International Conference on Antenna Measurements & Applications. França, 2014.
- [6] S. Theodoridis and K. Koutroumbas. "Pattern recognition and neural networks. Machine Learning and Its Applications", 2001.
- [7] Moura, E. P.; Albert, B. B.; Fontgalland, G. "Statistical classification of contamination in glass insulators by reading its spectrum", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 45 (2014) 589-59
- [8] Leon-Garcia, Alberto, "Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering", Third Edition, Pearso/Prentice Hall, 2008.