

Caracterização do espectro eletromagnético irradiado de isoladores poliméricos de 230 kV sob poluição artificial

Pedro H. V. Rocha¹, Edson G. Costa², Bruno B. Albert², Alexandre J. R. Serres²

¹Doutorando no Programa da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFCG

²Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil

Resumo— Estudos recentes, na área de inspeção e diagnóstico de isoladores de alta tensão, têm investigado os padrões de sinais eletromagnéticos provenientes destes componentes. Pesquisas sugerem a implementação da Transformada *Wavelet* para o tratamento desses sinais, sendo, posteriormente, utilizada uma rede neural artificial (RNA) para classificá-los. Este artigo complementa esses estudos, de forma a apresentar os resultados obtidos com um método de classificação, utilizado em trabalhos anteriores, sendo aplicado em amostras de isoladores poluídos artificialmente. Nos experimentos, um isolador polimérico, empregado em linha de transmissão (LT) de 230 kV, foi impregnado com diferentes soluções de poluição artificial. Foram utilizadas cinco diferentes soluções de condutividade elétrica: 4,88 mS/cm, 13 mS/cm, 33 mS/cm, 72 mS/cm e 112 mS/cm. Medições do sinal eletromagnético irradiado, no domínio da frequência e do tempo, foram realizadas para cada aplicação da solução no isolador, além do isolador lavado. Os resultados mostram acertos de até 100% para determinadas faixas espectrais.

Palavras-chave — *classificador neural; diagnóstico; espectro eletromagnético; isolador polimérico; poluição artificial; transformada wavelet.*

I. INTRODUÇÃO

As Linhas de Transmissão (LT) são estruturas essenciais para o transporte de energia elétrica das centrais geradoras até os centros consumidores [1]. Devido à alta potência transmitida, têm importância ampliada, uma vez que são também responsáveis, indiretamente, pelo fornecimento ininterrupto de energia elétrica. Dentre os componentes presentes na LT, destacam-se os isoladores tipo disco, pois são responsáveis pela sustentação mecânica dos condutores energizados, além de garantir uma rigidez dielétrica entre seus terminais [2].

Embora já existam muitos estudos feitos na área de diagnóstico de isoladores, ainda é um tema bastante explorado em pesquisas e ainda não consolidado. A principal dificuldade encontrada para a tarefa de inspecionar isoladores de LT é a subjetividade em mensurar seu estado de degradação, quando estão em operação [3]. Além disso, soma-se o fato de estarem localizados, algumas vezes, em torres próximas a vegetações densas e morros.

Estudos têm focado no desenvolvimento de métodos capazes de realizarem a classificação de isoladores, de forma não invasiva. Para isso, analisam-se determinados parâmetros, tais como ruído ultrassônico, corona, radiação infravermelha e radiofrequência [4-7].

Este artigo tem, por objetivo, apresentar os resultados do método de classificação, proposto em [8], sendo aplicado em novos experimentos realizados no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande (LAT/UFCG). Utilizou-se, para os experimentos, apenas um isolador polimérico, utilizado em LT de 230 kV, que foi submetido a cinco soluções de poluição artificial, totalizando seis experimentos, incluindo um com o isolado lavado.

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a influência que uma camada de poluição, de condutividade elétrica conhecida, exerce sobre os resultados da medição do sinal eletromagnético irradiado. Além disso, avalia-se o método de classificação, sendo testado com as amostras de isoladores com poluição artificial. Para isso, foram realizadas medições com o isolador lavado, além de outras cinco, com o mesmo isolador, poluído com soluções de diferentes valores de condutividade elétrica.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Pesquisas recentes, na área de inspeção e diagnóstico de isoladores, têm focado na análise do sinal eletromagnético irradiado quando estão em operação. A interpretação desses sinais tem sido estudada, com objetivo de reconhecer padrões relativos ao estado de conservação dos isoladores em operação.

A. Irradiação de RF em isoladores de LT

O processo de irradiação de ondas eletromagnéticas (OEM), em isoladores de LT, na faixa de radiofrequência, parte basicamente de dois princípios: irradiação devido a descargas parciais (corona), ocorridas no isolador; ou a caracterização do isolador, modelado como uma antena ressoadora dielétrica.

Descarga parcial é definida, de maneira sucinta, como uma descarga elétrica incompleta, que percorre uma região do espaço (dielétrico), submetido a um campo elétrico [9]. Elas podem ocorrer no interior, na superfície, ou no ar

(descargas corona) [10]. As descargas parciais geram ondas eletromagnéticas na faixa de radio recepção [11].

Um isolador pode ser estudado, partindo-se do princípio de que o mesmo se comporta como uma antena [12]. A partir das equações de Maxwell, tomando-se como ponto de partida a Lei de Ampère, em sua forma pontual, tem-se (1) [13]:

$$\nabla \times \vec{H}(t) = \vec{J}(t) + \frac{\partial \vec{D}(t)}{\partial t} . \quad (1)$$

Em que $\vec{H}(t)$ é a intensidade de campo magnético, $\vec{J}(t)$ é a densidade de corrente e $\vec{D}(t)$ a densidade de fluxo elétrico, estando todas as variáveis em função do tempo “t”.

De (1), é possível observar que, a partir da variação da densidade de corrente $\vec{J}$ ou da densidade de fluxo elétrico $\vec{D}$, pode-se variar a intensidade de campo magnético $\vec{H}$. Sendo assim, de acordo com a Lei de Faraday (2), e a equação auxiliar do campo magnético (3), uma variação de $\vec{H}$ causa uma variação do campo elétrico $\vec{E}$, e esta, por sua vez, continua a variar $\vec{H}$, completando assim o processo de irradiação de uma onda eletromagnética.

$$\nabla \times \vec{E}(t) = -\frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t} \quad (2)$$

$$\vec{B}(t) = \mu \vec{H}(t) . \quad (3)$$

Como visto, $\vec{H}$ pode ser produzido pela variação de $\vec{J}$ ou de $\vec{D}$, conforme (1), ou seja, a partir da injeção de corrente ou de um potencial elétrico. Assim, de acordo com (4), a densidade de campo elétrico $\vec{D}$ é o produto de $\vec{E}$ por uma constante ϵ , esta definida a partir da geometria e propriedades elétricas do material.

$$\vec{D}(t) = \epsilon \vec{E}(t) . \quad (4)$$

Comumente, as antenas de comunicação são utilizadas para irradiar uma onda eletromagnética a partir da injeção de corrente, variável no tempo, de baixa intensidade. Como já exposto, existe também outra possibilidade de excitar uma antena, com o objetivo que esta irradie uma OEM: aplicando um alto potencial elétrico. Assim, o isolador pode se comportar de forma similar a uma antena, sendo esta, submetida a uma alta tensão [12].

B. Método de Classificação

O método de classificação, utilizado neste trabalho, foi baseado no método proposto em [8]. Esse método de classificação utiliza, como entrada, o sinal eletromagnético irradiado pelo isolador quando está em operação.

Para o tratamento dos dados, são calculados os coeficientes *wavelets*, e depois os parâmetros média, desvio padrão, curtose e área do gráfico. A *wavelet* mãe utilizada foi a Daubechies de 12ª ordem e os coeficientes escolhidos foram os de aproximação dos três primeiros níveis. Então, os parâmetros estatísticos são inseridos numa RNA do tipo Multilayer Perceptron (MLP), de três camadas, e com três

neurônios na camada de saída. A quantidade de neurônios na camada oculta foi definida em 50. O algoritmo de treinamento foi o *Backpropagation*, e a quantidade de amostras utilizados em cada etapa foi de 200 para treinamento, 40 para validação e 40 para testes.

Os três neurônios na última camada têm, por objetivo, fazer com que o método seja capaz de reconhecer três classes de saída, no caso, três níveis de degradação do isolador.

A Fig. 1 ilustra, por meio de diagrama, o funcionamento do método.

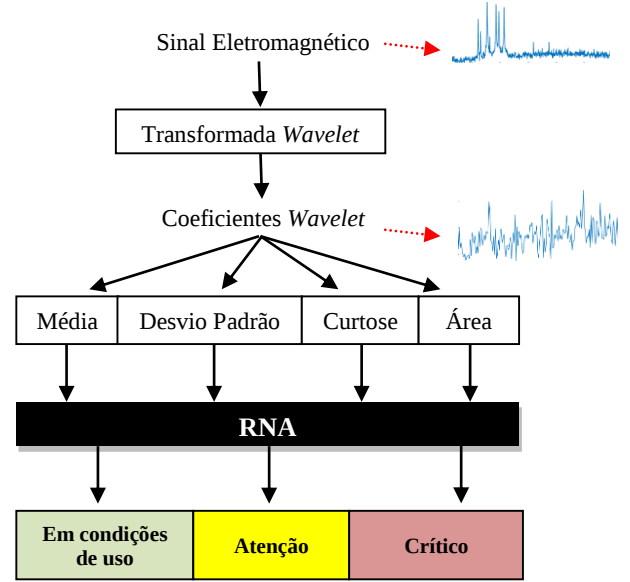


Figura 1. Diagrama do método de classificação.

Para efeito de comparação, foram realizados testes do método sem a utilização dos coeficientes *wavelets*. Nesse caso, os parâmetros de entrada da RNA (média, desvio padrão, curtose e área) foram extraídos diretamente do sinal eletromagnético.

O diferencial neste trabalho está na medição do sinal eletromagnético no domínio do tempo. Portanto, o método de classificação irá analisar os sinais no domínio da frequência (espectral) e no domínio do tempo. Para fins ilustrativos, as Fig. 2(a) e 2(b) apresentam um exemplo de um sinal capturado no domínio da frequência e no tempo, respectivamente.

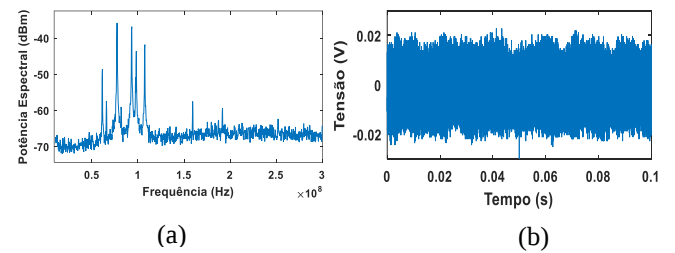


Figura 2. Sinal eletromagnético capturado no domínio (a) da frequência e (b) do tempo.

Na Fig. 2(a), observam-se algumas frequências, situadas entre 50 MHz e 100 MHz, que apresentam picos elevados de intensidade de sinal. Os picos são provenientes de estações de rádio e TV locais.

III. CONFIGURAÇÃO DE MEDIÇÃO

Os experimentos ocorreram no LAT/UFMG, totalizando cinco dias corridos de medição, nos quais, a temperatura e a umidade relativa do ar permaneceram em torno de 27°C e 76%, respectivamente.

O isolador, utilizado nos experimentos, foi doado pela CHESF, o qual estava com pouco tempo de uso em campo. O mesmo, de acordo com os critérios de avaliação apresentados em [8], apresentou o melhor índice de degradação, indicando que o mesmo está em bom estado de conservação física. Este foi o motivo de ter sido escolhido para os testes.

Utilizou-se, nas medições, uma antena Log-Periódica de banda larga, modelo ETS-Lindgren 106971, cuja faixa de operação se estende de 10 MHz até 2 GHz. A captura do sinal foi feita pelo osciloscópio modelo MDO4104B-3, fabricado pela Tektronix. O osciloscópio possui a característica principal de disponibilizar a análise do sinal nos domínios do tempo e frequência.

Na Fig. 3, são exibidas fotos do *setup* de medição, da antena e do isolador, com mais detalhe.

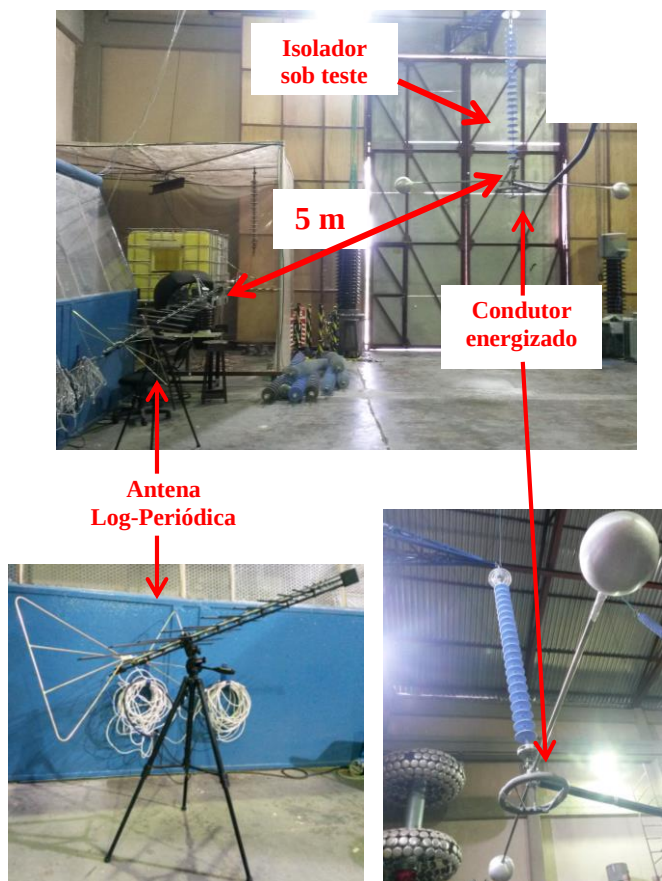


Figura 3. Fotos do *setup* de medição.

Com os experimentos, almejou-se verificar a influência que uma camada de poluição artificial exerce no sinal eletromagnético irradiado. Para isso, foram produzidas, de acordo com a norma IEC 507 [14], cinco soluções de poluição artificial para serem aplicadas no isolador. A condutividade elétrica dessas soluções foi: 4,88 mS/cm, 13 mS/cm, 33 mS/cm, 72 mS/cm, 112 mS/cm.

A primeira medição ocorreu com o isolador limpo. Primeiramente, o isolador foi lavado, e então, realizou-se a medição. Após a coleta dos dados, o isolador foi submetido ao procedimento de impregnação da poluição sobre sua superfície. Com auxílio de um borrifador contendo a solução, o isolador foi totalmente poluído, atentando-se para que esse processo ocorresse de forma mais homogênea possível. A Fig. 4 apresenta uma foto do isolador logo após o procedimento de impregnação da poluição.



Figura 4. Foto do isolador logo após ser submetido à poluição artificial.

Após um período de 24 horas, para secagem do isolador recém poluído, realizou-se a nova medição. O período de secagem permaneceu o mesmo para todos os casos, e se faz necessário para a formação das bandas secas na superfície.

Antes de cada novo procedimento de poluição, o isolador foi cuidadosamente lavado, tendo como objetivo a remoção das impurezas oriundas da solução anterior, de forma que a poluição, com a nova solução, se dê no isolador sempre limpo. O procedimento de lavagem, seguida de impregnação de solução poluente, repetiu-se para todas as soluções produzidas. Na Fig. 5, são apresentadas fotos do isolador, após a secagem, impregnados com as cinco diferentes soluções de poluição.

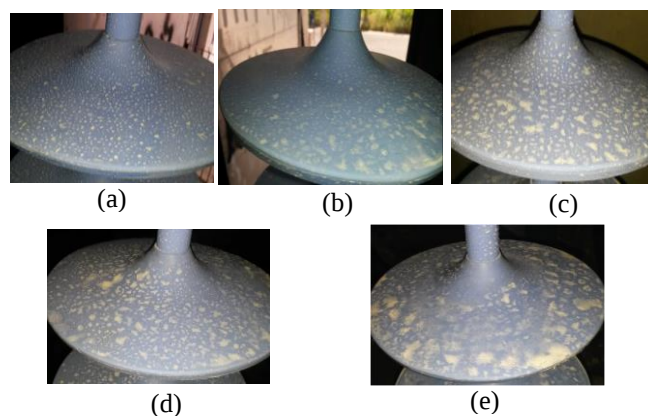


Figura 5. Fotos dos isoladores após a secagem: (a) 4,88 mS/cm, (b) 13 mS/cm, (c) 33 mS/cm, (d) 72 mS/cm e (e) 112 mS/cm.

Dessa forma, entre um experimento e outro, como foi modificada apenas a camada de poluição superficial, os resultados obtidos refletem apenas a essas alterações.

IV. RESULTADOS

Antes da apresentação dos resultados do método de classificação, será feita uma análise comparativa dos sinais coletados, a partir do gráfico da média e desvio padrão.

A. Médias e Desvios Padrão

A análise visual dos gráficos que representam a média e desvio padrão dos sinais medidos tem, por objetivo, conhecer o padrão do sinal irradiado pelo isolador. Assim, a priori, é possível identificar, visualmente, se os sinais oriundos das medições do isolador, com os diversos tipos de poluição, possuem padrões semelhantes.

Com relação aos sinais medidos no domínio da frequência, a faixa analisada foi de 10 MHz até 2 GHz. Para uma análise mais detalhada, em busca de possíveis padrões, segmentou-se a faixa em sub-bandas de frequência. Cada sub-banda espectral possui uma largura de banda de 50 MHz.

Devido à grande quantidade de gráficos gerados, selecionaram-se alguns para análise. Na Fig. 6, são apresentados os gráficos de média e desvio padrão para a faixa de frequência de 10 MHz até 180 MHz.

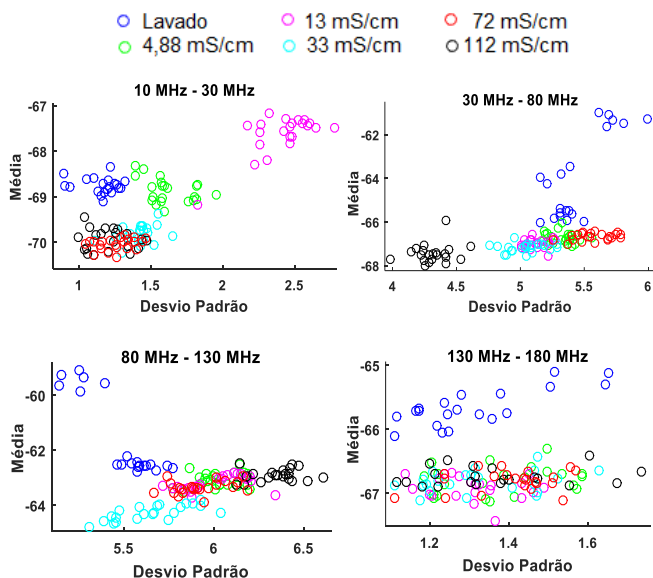


Figura 6. Gráficos de médias e desvio padrão para frequências de 10 MHz até 180 MHz.

Da Fig. 6, constata-se que, na faixa de 10 MHz até 30 MHz, os pontos no gráfico das medições referente aos isoladores lavado (azul) e com a mínima poluição, 4,88 mS/cm (verde), localizaram-se próximos. Entretanto, ainda para o mesmo caso, os pontos não se misturaram. No mesmo gráfico, é visto que nos sinais referentes aos isoladores poluídos com as duas maiores concentrações, 72 mS/cm e 112 mS/cm, seus pontos se misturaram numa mesma região.

Já em uma faixa de frequência maior, 30 MHz a 80 MHz, os sinais dos isoladores lavado, e com poluição de 112 mS/cm, apresentaram seus pontos mais separados em relação aos demais.

Em uma análise comparativa dos quatro gráficos da Figura 6, constata-se que, com o aumento da frequência a ser analisada, os pontos no gráfico tendem a se misturarem. Esse fato foi também observado em [12].

A Fig. 7 exibe os resultados da média e desvio padrão para outras faixas de frequência, acima de 1 GHz.

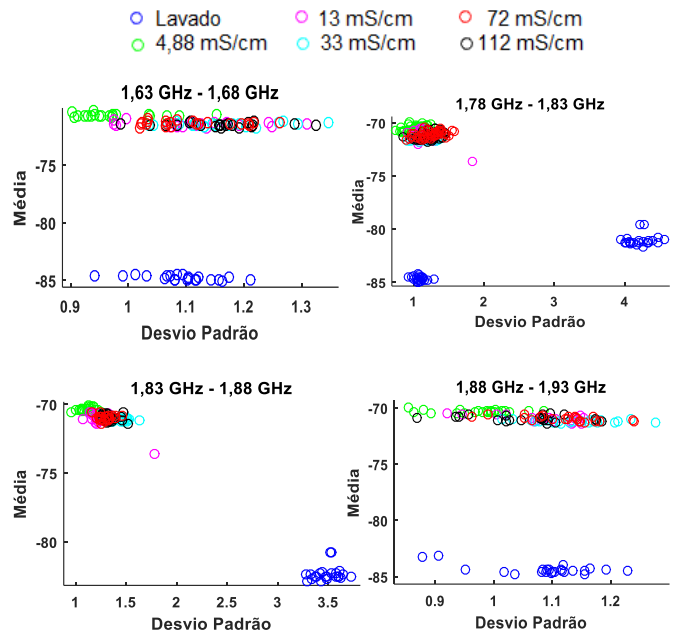


Figura 7. Gráficos de média e desvio padrão para algumas frequências acima de 1 GHz.

Nos gráficos, apresentados pela Fig. 7, verifica-se, claramente, que os pontos referentes às medições com o isolador limpo se distanciaram dos demais. Em todos os gráficos, o valor da média dos sinais coletados do isolador limpo foi sempre menor do que do isolador submetido à poluição.

Continuando a análise da Fig. 7, constata-se que os pontos nos gráficos, referentes às medições com o isolador submetido às poluições, apresentaram valores relativamente próximos. Portanto, para as frequências acima de 1 GHz, a simples análise a partir da média e do desvio padrão, não são suficientes para diferenciar o grau de poluição a que o isolador é está submetido.

Com relação à análise dos sinais obtidos no domínio do tempo, o gráfico de média e desvio padrão é apresentado na Fig. 8. Destaca-se que, para os sinais medidos no domínio do tempo, o osciloscópio utilizado possui o filtro de corte, passa-baixa, em 1 GHz. Portanto, as componentes de frequência, que estão presentes nos sinais, são abaixo de 1 GHz.

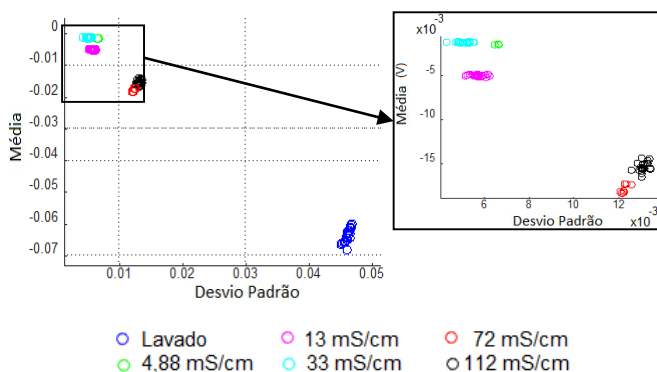


Figura 8. Gráfico da média e desvio padrão do sinal no domínio do tempo.

Com a análise dos valores de média e desvio padrão, Fig. 8, dos sinais coletados no domínio do tempo, verificou-se que os mesmos se apresentam em regiões distintas, de acordo com o isolador medido. Houve a formação de regiões bem delimitada, de acordo com as diferentes poluições aplicadas no isolador.

Ainda na Fig. 8, constatou-se que os valores referentes ao isolador lavado obtiveram média muito menor do que os demais. Esse fato se assemelha ao observado na Fig. 7. Já com os demais casos, é percebida uma aglomeração dos pontos em regiões bem delimitadas, de acordo com a concentração de poluição aplicada no isolador. Por exemplo, os pontos que representam a medições do isolador com as duas maiores concentrações, 72 mS/cm e 112 mS/cm, distanciaram-se dos demais.

Realizada a análise prévia dos sinais coletados, no domínio da frequência e do tempo, a partir das médias e desvios padrão, parte-se para a análise dos resultados do método de classificação implementado.

B. Resultados do Método de Classificação

De forma similar à análise dos resultados de média e desvio padrão, a leitura dos resultados da aplicação do método de classificação proposto se dará segmentada, de acordo com o domínio do sinal. Inicialmente pelo espectro de frequência, em seguida pelo sinal medido no tempo.

Como já descrito, o método de classificação foi implementado com três possíveis classes de saída. No caso em questão, definiram-se essas classes como "em condições de uso", "atenção" e "crítico". Com objetivo de avaliar outro possível cenário para o classificador, ou seja, com apenas duas classes de saída, foi testado, também, essa configuração. Assim, como houve seis experimentos, cada um foi relacionado a uma possível classe de saída do método, de acordo com a Tabela I.

TABELA I. CONFIGURAÇÕES DAS CLASSES DE SAÍDA DO CLASSIFICADOR

Configuração A		Configuração B		
Bom	Ruim	Bom	Atenção	Crítico
Lavado	13*	Lavado	13*	72*
4,88*	33*			
	72*			
	112*			
		4,88*	33*	112*

* Unidade de medida em mS/cm.

Na Fig. 9, são apresentados os resultados de acordo com a faixa de frequência do sinal, considerando o método de classificação com a Configuração A.

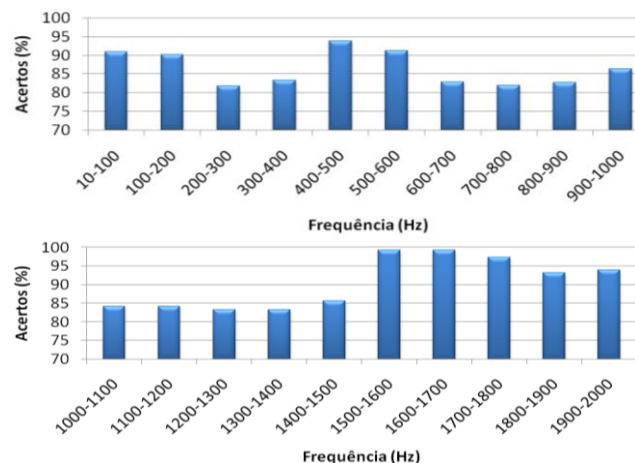


Figura 9. Percentual de acertos do método de classificação na Configuração A, separado por faixas de frequência.

Nota-se, pela Fig. 9, que na faixa de 400 MHz até 600 MHz, houve mais acertos, 94%, considerando o espectro abaixo de 1 GHz. Ainda sim, as faixas de 10 MHz a 200 MHz também obtiveram resultados próximos, em torno de 90% de acertos.

Quando se analisa o espectro acima de 1 GHz, constata-se claramente um aumento do índice de acertos do método para as frequências acima de 1,5 GHz até 2 GHz, alcançando 99% de acertos na faixa de 1,5 GHz até 1,7 GHz.

Quando o método de classificação é ajustado de acordo com a Configuração B, os resultados obtidos são apresentados na Fig. 10.

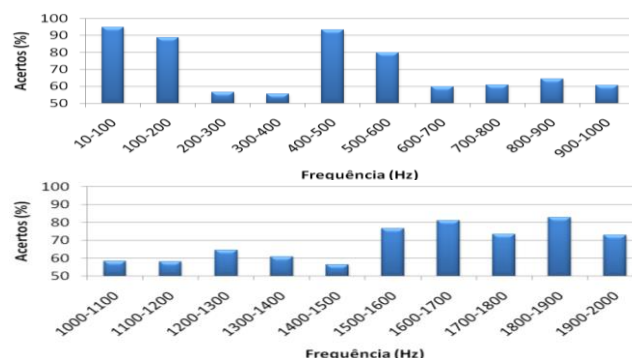


Figura 10. Percentual de acertos do método de classificação na Configuração B, separado por faixas de frequência.

Na Fig. 10, é visto que, para o espectro abaixo de 1 GHz, as faixas em que o método obteve melhores acertos foram de 10 MHz até 200 MHz e 400 MHz a 600 MHz, com 92% de acertos máximo para ambas. Já para a análise do espectro entre 1 GHz e 2 GHz, houve um aumento, em geral, dos acertos a partir de 1,5 GHz. Entretanto, o acerto máximo obtido foi de 82%, na faixa de 1,8 GHz a 1,9 GHz, considerado baixo em relação aos obtidos pelo método na Configuração A.

A partir da análise prévia, das médias e desvios padrão, dos sinais coletados no domínio do tempo, já apresentados na Fig. 8, percebe-se que os sinais se auto-classificam apenas com esses parâmetros. Ou seja, apenas com o gráfico ilustrado na Fig. 8, é possível visualizar que os pontos relativos aos diferentes experimentos não se misturaram.

Aplicando o método de classificação, nas configurações A e B, obteve-se 100% de acertos em ambos os casos. Tal resultado advém da forma com que os sinais coletados, avaliados a partir dos parâmetros de média e desvio padrão, estão dispostos graficamente. De forma bem delimitada, cada experimento se localiza de forma agrupada, e separados um dos outros.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi testado o método de classificação, baseado na análise *wavelet* e RNA, cujo objetivo é reconhecer padrões de sinais eletromagnéticos, irradiados de isoladores poliméricos de alta tensão. O método já foi utilizado em trabalhos anteriores, sendo neste atual, avaliado a eficácia do mesmo sendo submetido a cinco amostras de poluição artificial.

Os resultados do método de classificação, quando aplicados aos sinais no domínio espectral, mostraram maiores índices de acertos nas faixas de 10 MHz a 200 MHz, 94%. Outra faixa de frequência que apresentou bons resultados foi de 400 MHz a 500 MHz, com 92%.

Já os resultados do método, quando analisados os sinais no domínio temporal, mostraram acertos de 100%. Esses valores são devido ao fato de que, ao serem analisados, previamente, os valores de média e desvio padrão dos sinais, estes se localizaram graficamente em regiões bem delimitadas. Ou seja, tal fato indica que apenas com esses parâmetros estatísticos, foi possível visualizar, no gráfico, a segregação dos pontos, agrupados de acordo com as classes a que pertencem: isolador lavado, com 4,88 mS/cm, 13 mS/cm, 33 mS/cm, 72 mS/cm e 112 mS/cm.

Conclui-se, portanto, que o método de classificação testado conseguiu distinguir diferentes padrões de irradiação do isolador, quando este é submetido a diferentes tipos de poluição artificial. Ainda, foi constatado que a análise do sinal no domínio do tempo demonstrou-se mais eficaz para a classificação, resultando em acertos de 100%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CHESF pelo fornecimento do isolador utilizado nas medições. Também, à CAPES e CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] P. H. V. Rocha, G. Fontgalland, "Classificação de isoladores vítreos a partir do espectro de RF irradiado". in *XI Latin-American Congress Electricity Generation And Transmission - CLAGTEE 2015*, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.
- [2] J. P. M. Queirós, "Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores compósitos com isoladores em materiais convencionais". Porto: *Universidade do Porto*, 2013. *Dissertação de Mestrado*.
- [3] R. M. Capelini, M. F. C. Parentoni, M. L. B. Martinez, F. L. Azevedo, J. F. Adami and C. Homrich, "Localização de cadeias de isoladores danificadas em linhas de transmissão através da análise de descargas parciais de corona", in *2012 Congresso Brasileiro de Automática, BA*, pp. 4581-4587.
- [4] D. C. Chaurasia, "Scintillation Modeling for insulator String under Polluted Conditions," *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, vol. 4, pp. 224-227, IEEE, Aug. 23-27, 1999.
- [5] L. E. Lundgaard, "Partial Discharge-Part XIV: Acoustic Partial Discharge Detection-Practical Application". *IEEE September/October*, v. 8 No. 5, 1992.
- [6] M. Khalifa, A. El-Morshedy, O. E. Gouda, S. E. D. Habib. "A new monitor for pollution on power line insulators: Part 2: Simulated field tests". *IEEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, Cairo, v. 135, No. 1, p. 24-30, jan. 1988.
- [7] G. Fontgalland, E. M. Silva, J. M. B. Bezerra, M. G. G. Neri, R. R. M. Valle, M. A. B. Melo, "On the behavior of Electromagnetic interference measured from glass insulator". *The 10th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, 2004, Winnipeg, Manitoba, Canada. p. 301 – 304. ISBN-0-9692563-9-6.
- [8] P. H. V. Rocha, E. G. Costa, B. Albert, "Avaliação da degradação de isoladores poliméricos utilizando espectro eletromagnético irradiado", *Congreso Internacional de Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico*, 2015, Manambí, Equador.
- [9] KREUGER, F. H.; GULSKI, E.; KRIVDA, A. "Classification of partial discharges". *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, vol. 28, n. 06, pp. 917-931. 1993.
- [10] KUMAR, S. S.; "Development of a phase Resolved Pulse Height and its Application to Partial Discharge Measurements", *Msc. dissertation*, February 1997.
- [11] BARTNIKAS, R.; MCMAHON, E. J. "Engineering Dielectrics - Corona Measurement and Interpretation". vol 1, Philadelphia: ASTM Special Technical Publication STP 669, 1979, p. 524.
- [12] ROCHA, P. H. V. "Classificação de isoladores de vidro de alta tensão a partir do espectro eletromagnético irradiado". *Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande*, 2014. *Dissertação de Mestrado*.
- [13] COLLIN, R. E. "Foundations for Microwave Engineering", 2nd. ed., IEEE Press, 2001. p. 924.
- [14] CEI/IEC 507:1991. "Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems".