

# Emissão de Radiação Eletromagnética na Faixa de VHF e UHF em Cadeia de Isoladores de Alta Tensão Vazados

José Kleber da Cunha Pinto  
Escola Politécnica da USP- Lab. de Microeletrônica- Grupo de Microondas  
05508-010, São Paulo, SP, Brasil  
[jkcunhap@lme.usp.br](mailto:jkcunhap@lme.usp.br)

Marcos Aurélio Luqueze  
Escola Politécnica da USP- Lab. de Microeletrônica- Grupo de Microondas  
05508-010, São Paulo, SP, Brasil  
[mluqueze@lme.usp.br](mailto:mluqueze@lme.usp.br)

Luiz Fernando Justo  
CTEEP-Cia. de Transmissão de Energia Elétrica Paulista  
13515-000, Cabreúva, SP, Brasil  
[ljusto@isactEEP.com.br](mailto:ljusto@isactEEP.com.br)

**Resumo:** O trabalho tem por objetivo analisar algumas tecnologias empregadas na inspeção preditiva de isoladores cerâmicos em Linhas de Transmissão de Alta Tensão. Isoladores defeituosos emitem pulsos de RF gerados pelo Efeito Corona. As emissões provenientes desses isoladores são recebidas em antenas especialmente projetadas para a faixa de frequência em que há a maior emissão de radiação eletromagnética, em princípio nas faixas de VHF e UHF. Estes sinais na forma de pulsos quando captados por diferentes antenas em posições geometricamente conhecidas permitem o cálculo da localização da fonte emissora a partir das diferenças dos tempos de chegada dos pulsos entre antenas. Vários tipos de antenas foram testados, bem como foram projetados alguns filtros e amplificadores sintonizados para eliminação de sinais de radio difusão presentes na faixa de medidas. As medidas foram realizadas em três tipos de ambientes diferentes: Laboratório de medidas da EPUSP, Laboratório de Integração e Testes do INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Câmara Anecóica) em São José dos Campos e finalmente testes em campo, junto a algumas torres de Alta Tensão que apresentavam isoladores de porcelana vazados. Utilizaram-se osciloscópio, com altas taxas de amostragem e recursos de segmentação de memória que são os mais adequados para captação de pulsos de natureza aleatória como os emitidos pelos isoladores defeituosos.

**Palavras Chave:** Efeito Corona, Isoladores Defeituosos, Rádio Localização, Pulsos de RF.

## I. INTRODUÇÃO

Os Isoladores de Linhas de Transmissão com falhas no isolamento elétrico emitem radiação eletromagnética, que de maneira simplificada pode ser interpretado como ionização das moléculas do ar no entorno das superfícies

dos condutores, devido ao elevado campo elétrico presente nessa região. Este efeito produz som, luz, pulsos eletromagnéticos e em menor escala, aquecimento. Neste trabalho, serão apresentadas técnicas de medidas por nós desenvolvidas para detecção dos pulsos de RF.

Os sinais emitidos pelos isoladores submetidos à alta tensão cobrem um amplo espectro de frequência. A maior parte dos trabalhos encontrados na literatura [1], [2], [3] concentra-se em detectar o fenômeno na região do espectro abaixo de 1 GHz, mais especificamente nas faixas de VHF (30 a 300 MHz) e UHF (300 a 3000 MHz).

Os pulsos de RF gerados são de curta duração. Os tempos de subida e descida são da ordem de alguns nanossegundos ou mesmo picossegundos. Para a captura destes sinais torna-se necessário o emprego de modernos osciloscópios com largura de banda da ordem de 1 GHz e taxas de amostragem acima 2,5 GSamples/s e com recursos de “trigger” de pulsos aleatórios. Usando o recurso de segmentação de memória destes osciloscópios detecta-se a presença destes eventos de curta duração definindo-se um nível de limiar de detecção previamente estabelecido (da ordem de alguns mV)

Nosso trabalho consiste na elaboração de técnicas para a detecção destes pulsos eletromagnéticos utilizando diferentes antenas receptoras geometricamente distribuídas em posições conhecidas que permitam, a determinação da diferença do tempo de chegada dos pulsos nas diferentes antenas e assim calcular a localização da fonte emissora do referido pulso, que em princípio seria o isolador defeituoso.

A detecção dos pulsos de RF está sujeita a todas as fontes de Rádio Frequência existentes no ambiente, notadamente as Fontes de Radio Difusão presentes em

quantidade significativa justamente na faixa necessária das avaliações, ou seja, VHF e UHF.

Buscando alternativas para o aperfeiçoamento da técnica de detecção, optou-se pela avaliação de um conjunto de isoladores danificados de porcelana, numa Câmara Anecóica (ambiente fechado livre de ruídos e fontes externas de interferência).

Desta forma foram realizadas medidas de emissões em uma Câmara Anecóica do LIT/INPE – Laboratório de Integração e Testes do INPE–Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

## II. MEDIDAS EM CÂMARA ANECÓICA

Para a determinação da melhor faixa seletiva de trabalho, foram feitas medidas de emissões de RF por Isoladores defeituosos na faixa de 150 KHz a 1 GHz em uma Câmara Anecóica do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)

As Figuras 1 e 2 abaixo mostram a estrutura de medidas montada na Câmara do LIT: /INPE.



Figura 1: Antenas destinadas à recepção de sinais no interior da Câmara



Figura 2 – Disposição dos isoladores no interior da Câmara Anecóica e equipamento de geração da Alta Tensão

## III. RESULTADOS DA CÂMARA ANECÓICA

Na nossa aplicação, a emissão de pulsos de RF surge no isolador defeituoso quando o valor do campo elétrico atinge um determinado valor crítico. Nesta situação há a emissão de sinais de Rádio frequência como o pulso mostrado na Figura 3, a título de exemplo.

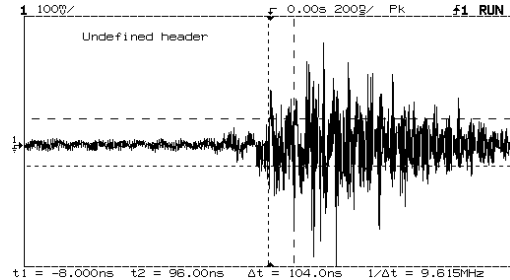
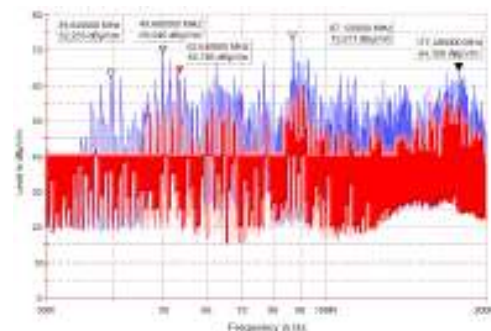
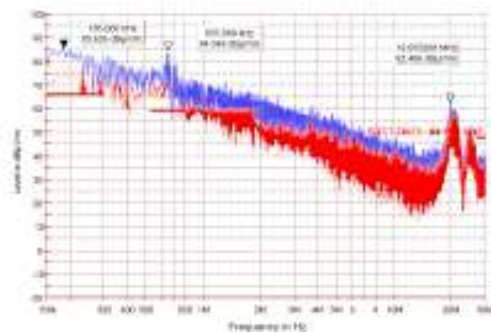


Figura 3: Pulso de RF emitido por isolador defeituoso.

Estes pulsos de RF apresentam componentes significativas em ampla faixa de frequências. Para se avaliar o conteúdo espectral dos pulsos um conjunto de dois isoladores, um bom e um defeituoso, foi submetido à alta tensão numa montagem dentro da Câmara Anecóica (INPE-LIT). As medidas foram realizadas na faixa de 150 KHz e 1 GHz. A Figura 4 mostra espectros de frequência obtidos em três faixas distintas.

As emissões de RF ocorrem em toda a faixa de 150 KHz a 1 GHz. Nesta faixa, no entanto ocorrem as transmissões de rádio e TV que serão sobrepostas aos pulsos de RF na forma de ruído, comprometendo a sensibilidade de detecção de pulsos. Uma alternativa a este problema é realizar as medidas sintonizadas, ou seja, seleciona-se por filtros sintonizados a faixa de medidas.



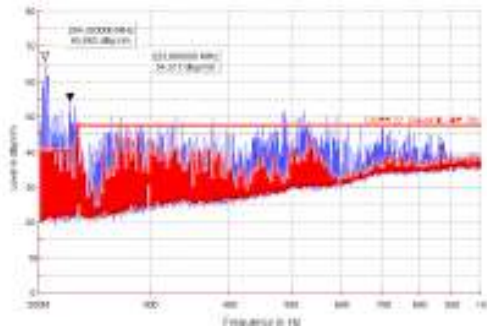


Figura 4: Espectro dos pulsos gerados na faixa de 150 KHz a 1 GHz numa montagem com dois isoladores bons. A curva em vermelho foi obtida com dois isoladores bons. A azul com um bom + um defeituoso.

Observa-se pelas curvas o realce das emissões nas faixas de VHF e UHF até próximos a 1 GHz no caso de presença de isolador defeituoso na estrutura de teste.

#### IV. MEDIDAS NO LABORATÓRIO DA EPUSP

Para a recepção dos pulsos em laboratório desenvolveram-se alguns tipos de antenas, mostradas nas Figuras a seguir.

As antenas da Figura 5 apresentaram ótimo desempenho, principalmente em frequências baixas. O inconveniente do seu uso, no entanto está no fato de serem grandes e, portanto de difícil mobilidade, dificultando a utilização no campo. Estas antenas captam sinais de radiodifusão. Estes sinais agem com ruído e interferência exigindo a necessidade do emprego de filtros sintonizados na faixa de medidas para a eliminação de todos sinais indesejáveis que diminuem a sensibilidade do receptor



Figura 5: Antenas tipo Discone projetadas para faixa de 20 MHz a 500 MHz



Figura 6: Antena tipo corneta ajustada para a faixa de 300 MHz a 500 MHz.

Este é justamente o ponto de grande vantagem da antena tipo corneta da Figura 6. A corneta foi projetada para atuar a partir de 300 MHz. Frequência abaixo desta é rejeitada pela corneta. Isto faz com que grande parte do ruído de sinais de rádio difusão seja também rejeitada, não comprometendo a sensibilidade de recepção. Mais uma vez, o inconveniente é o tamanho da antena. Uma alternativa seria o uso de corneta preenchida com material de alta constante dielétrica, resultando em uma antena bem menor. A dificuldade desta solução seria seu custo. Estes materiais de alta constante são caros e normalmente disponíveis só no mercado internacional.

Foram realizados vários testes em laboratório utilizando-se uma fonte de alta-tensão AC de 40 KV. A Figura 7 apresenta a configuração de um teste de um conjunto com três isoladores sendo um defeituoso.

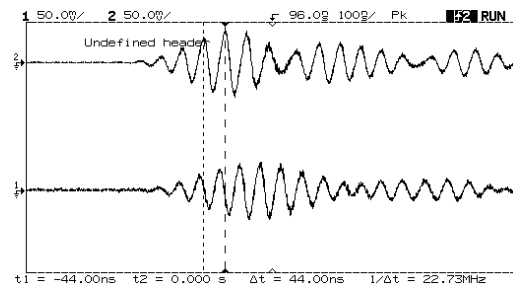
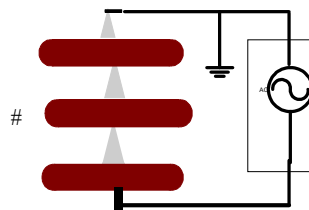


Figura 7: Medidas em laboratório com 30 KV aplicados. O isolador marcado apresenta defeito

Na realização destas medidas utilizou-se um filtro sintonizado em 20 MHz que rejeita sinais de rádio difusão especialmente desenvolvido para este fim, um amplificador sintonizado em 20 MHz para realçar os sinais juntamente com uma antena Discone.

Na Figura 8 apresenta-se um tipo de filtro projetado para rejeitar sinais de radio difusão(VHF e UHF).

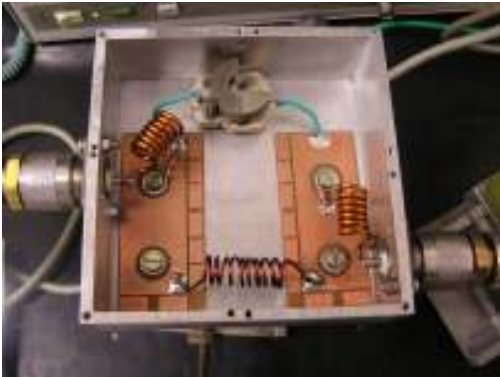


Figura 8: Filtro Rejeita Radiodifusão(VHF-UHF)

A Figura 9 mostra o amplificador comercial utilizado ajustado para a faixa de frequência de teste.



Figura 9: Amplificador comercial ajustado para 20 MHz de início de faixa.

Um pulso capturado com o amplificador e filtros ajustados para operar em 20 MHz é mostrado na Figura 10. O conteúdo espectral do pulso calculado através de FFT também é mostrado na figura.

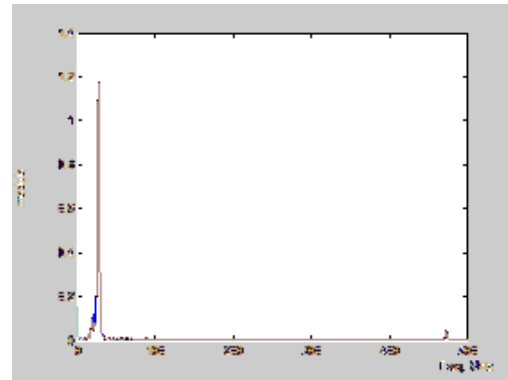
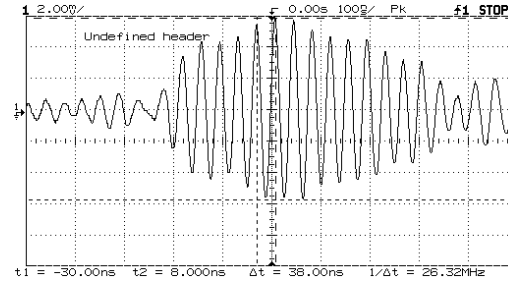


Figura 10: Pulso e sua FFT utilizando-se um receptor; Filtro + amp para 20 MHz.

## V. TESTES EM CAMPO

Os testes em campo foram realizados nas instalações da CTEEP em Linhas de Transmissão de 138 KV na região de Santa Bárbara d'Oeste. Para a realização dos testes em campo, foi desenvolvido um sistema de medidas constituído de 4 antenas Discone especialmente projetadas para cobrir frequências acima de 300 MHz., filtros sintonizados em 400 MHz e amplificadores banda larga ( VHF e UHF ). Apresenta-se na Figura 11 o diagrama do sistema de medidas em campo. A Figura 12 apresenta o sistema montado sobre a viatura. Na Figura 13 tem-se o sistema de captura dos sinais.

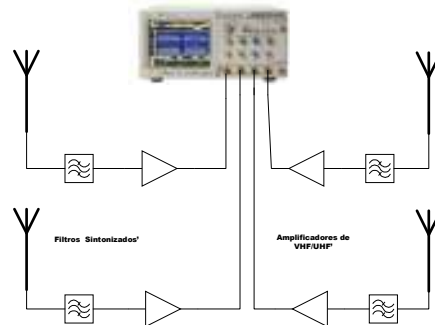


Figura 11: Diagrama do sistema para medidas em campo.



Figura 12: Sistema montado na viatura para as medidas em campo

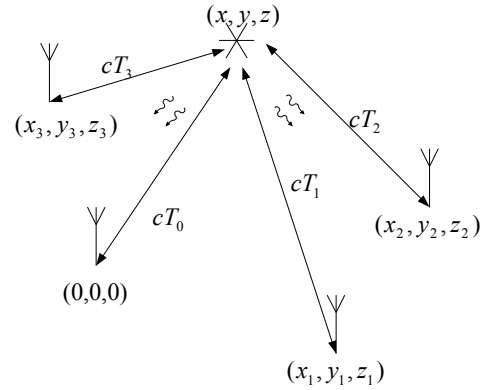


Figura 13: Foto do sistema de captura dos sinais de rádio frequência

Para a localização da origem do sinal de RF a técnica escolhida é a das diferenças de tempos de chegada (TDOA). A partir das coordenadas das quatro antenas em relação à possível fonte emissora de radiação e conhecendo-se as diferenças de tempos de chegada dos pulsos em três antenas em relação a uma adotada como referência é possível a estimação com grande grau de certeza das coordenadas do ponto de origem das radiações[4].

A técnica TDOA está ilustrada na Figura 14 onde se apresenta um conjunto de três equações e três incógnitas  $(x,y,z)$ , as coordenadas da fonte, resultante de medidas de três diferenças de tempos de chegada em relação a uma quarta antena que é a de referência. As coordenadas de todas as antenas são conhecidas.

A solução do conjunto de equações deve ser obtida por métodos iterativos numéricos como o método de Newton-Raphson.



$$\begin{aligned} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} - \sqrt{x^2 - y^2 - z^2} &= c(T_1 - T_0) \\ \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \sqrt{x^2 - y^2 - z^2} &= c(T_2 - T_0) \\ \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} - \sqrt{x^2 - y^2 - z^2} &= c(T_3 - T_0) \end{aligned}$$

Figura 14: Princípio da técnica TDOA

Na Figura 15 apresenta-se um exemplo de medida de diferença de tempos de chegada.

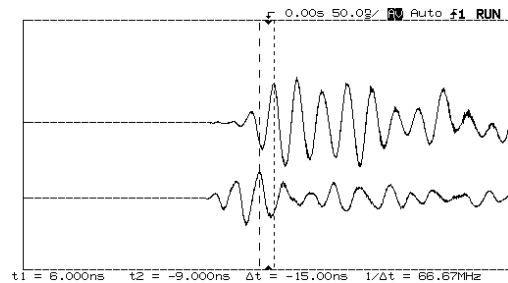


Fig. 15 Medida de diferença de tempo de chegada.

Para medir as diferenças de tempo pode-se estabelecer um nível de limiar imediatamente acima do nível de ruído, valor este que se ultrapassado caracterizaria a chegada de um pulso. Pode-se ainda calcular a correlação cruzada entre os dois pulsos medidos e determinar em que instante ocorre o máximo desta função. Este seria o valor do intervalo de tempo procurado. As referências de [1] a [3] exploram estes métodos de medidas.

As medidas de intervalo de tempo entre pulsos estão sujeitas a erros de medidas causados por ruídos, interferências e também por sinais refletidos em múltiplos percursos até chegarem nas antenas. O efeito indesejável dos múltiplos percursos pode ser atenuado limitando-se o intervalo de medidas tão somente aos primeiros pulsos, descartando os demais. As fontes de erro resultam em medidas erradas de intervalos de tempo que devem ser descartadas. Estas incertezas fazem com que seja necessário o cálculo estatístico dos prováveis intervalos de tempo, ou seja, as medidas devem passar por uma etapa de estimação dos corretos valores de intervalo de tempo. As referências de [1] a [3]

apresentam algumas técnicas de estimação das prováveis diferenças de tempos de chegada.

Uma outra possível técnica de localização da fonte emissora é a de assumir por hipótese o conhecimento da posição da fonte emissora e confrontar o valor teórico da diferença de tempo com o valor medido. Para aplicação desta técnica deve-se conhecer a localização exata de todas as cadeias de isoladores da torre de transmissão em análise. Defini-se para tanto uma função erro a ser avaliada. Quando houver coincidência entre a posição assumida e a verdadeira o erro será nulo. A referência [3] apresenta esta técnica e calcula o valor RMS do erro através da expressão:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{(T_{10} - \tau_{10})^2 + (T_{20} - \tau_{20})^2 + (T_{30} - \tau_{30})^2}{3}}$$

$T_{i,j}$  são as diferenças de tempo teóricas entre antenas e  $\tau_{i,j}$  representam os valores medidos

Os pulsos emitidos têm natureza aleatória, tornando difícil sua detecção com osciloscópios convencionais. O osciloscópio adequado deve apresentar largura de faixa suficiente para cobrir as faixas de VHF-UHF e também altas taxas de amostragem (maior que 2 Gsamples/s). Deve também possuir o recurso de: “Memória segmentada”. Este recurso consiste na divisão da memória do osciloscópio em vários segmentos. Cada pulso individualmente é capturado e armazenado em um segmento de memória. A Figura 16 mostra a tela da medida realizada sob uma estrutura com atividades de emissão de pulsos de RF. O cálculo das diferenças de tempos de chegada é estatístico uma vez que a antena receptora está sujeita às possíveis inúmeras fontes de ruído e interferências presentes no ambiente. A conclusão deste trabalho deve passar, portanto, pelo desenvolvimento de algoritmos para a estimação precisa da posição da fonte emissora dos pulsos de RF.

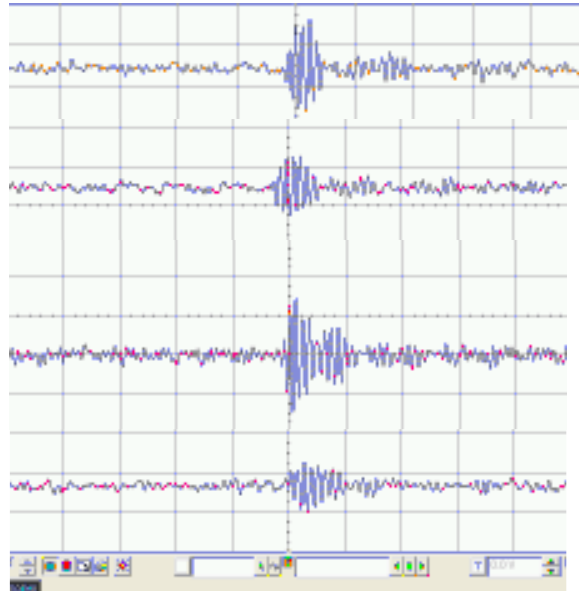


Figura 16: Sinais das quatro antenas capturados simultaneamente. (Escala: 5mV/Div) Viatura posicionada sob estrutura com emissões de RF

## VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho demonstra-se o potencial da técnica de localização de isoladores defeituosos através da detecção dos pulsos de RF por eles emitidos. Confirmou-se por testes a emissão de sinais de RF em amplo espectro, principalmente nas faixas de VHF e UHF. Apresentaram-se resultados de medidas em laboratório e no campo com o equipamento desenvolvido. As medidas de campo mostraram baixos níveis de sinais de algumas dezenas de milivolts indicando a necessidade de se garantir a minimização de interferências de sinais externos presentes no ambiente de medidas, principalmente em aplicações onde se busca identificar isoladores com pequenos defeitos.

Nosso trabalho encontra-se atualmente em fase otimização com o desenvolvimento de um sistema receptor bem como da escolha da técnica numérica mais adequada à nossa aplicação.

Este trabalho foi realizado no âmbito do Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico: Ciclo 2005/2006 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) tendo como patrocinador a CTEEP (Cia. de Transmissão de Energia Elétrica Paulista)

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] P.J. Moore, I. E. Portugués, I. A. Glover. “Remote Diagnosis of Overhead Line Insulation”. 2004-IEEE Power Society General Meeting- June 2004.

[2] A. Tungkanawanich, J. Abe, K. Matsuura, Z. Kawasaki. “Location of Partial Discharge Source on Distribution Line by measuring emitted Pulse-Train Electromagnetics Waves”. 2000-IEEE Power Society Winter Meeting

[3] P.J. Moore, I. E. Portugués, I. A. Glover. “Radiometric Location of Partial Discharge Sources on Energized High-Voltage Plant. IEEE Transactions on Power Delivery-July 2005.

[4] José Kleber da Cunha Pinto, Marcos Aurélio Luqueze, Luiz Fernando Justo, “Detecção e Localização de Efeito Corona através de Técnicas de Rádio Localização” IBERSENSOR 2008, 6<sup>th</sup> Ibero-American Congress on Sensors.