



GSE/ 17

17 à 22 de outubro de 1999  
Foz do Iguaçu – Paraná - Brasil

**GRUPO: VIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (GSE)**

**TÉCNICA PARA LOCALIZAÇÃO DE DP EM SUBESTAÇÕES BLINDADAS PELA ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE PULSOS DE TENSÃO – APLICAÇÃO EM INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL DE 500 kV EM ITAIPU**

Marcelo F. Latini (ITAIPU) (\*)  
Geraldo C. Brito Junior(ITAIPU)

Renato T. Verdolin (CEPEL)  
Alain F. S. Levy (CEPEL)

**RESUMO**

Instalações blindadas isoladas à gás SF<sub>6</sub> podem apresentar defeitos internos geradores de descargas parciais (DP), as quais representam um primeiro indício a caminho de uma falha mais grave da instalação.

No caso do Brasil, que possui diversas instalações em alta e extra alta tensão, muitas delas com mais de 10 anos de operação, a localização de DP torna-se uma ferramenta muito valiosa, permitindo o planejamento e execução de manutenções preditivas em compartimentos selecionados. Este tipo de manutenção, onde se evita a abertura indiscriminada de compartimentos e se tenta antever a ocorrência de uma falha mais grave, pode levar a vantagens muito significativas em termos de custos.

Esse artigo apresenta uma técnica que propicia a localização desses defeitos via metodologia elétrica em frequência elevada, utilizando os princípios de ondas trafegantes, além da possibilidade de quantificação das cargas envolvidas nas DP. Esta técnica foi aplicada em uma instalação real montada no laboratório de ITAIPU e na qual foram obtidos diversos resultados de localização de defeitos, que aqui são apresentados.

**PALAVRAS-CHAVE:**

Subestações Blindadas, Manutenção, Descargas Parciais

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Devido ao crescimento e desenvolvimento das subestações isoladas a gás - SIG - várias técnicas têm sido desenvolvidas, de modo a prover estas instalações de sistemas de manutenção e operação eficientes e seguros. Dentro deste grupo de novos desenvolvimentos destacam-se as técnicas para diagnósticos de desempenho elétrico.

Uma ferramenta tradicionalmente utilizada para o diagnóstico de equipamentos elétricos é a quantificação de descargas parciais que, para o caso das subestações blindadas, caracterizadas pelo encapsulamento de suas partes energizadas, representa uma dificuldade adicional.

Em busca de uma solução para este problema, foi proposta uma metodologia para localização de descargas parciais em SIG, baseado nas ondas eletromagnéticas trafegantes geradas pelas próprias DP, com medições limitadas à faixa de alta frequência (20 a 100MHz).

Um programa computacional foi desenvolvido para fazer a análise destas ondas, que são sinais de tensão caracterizados por um trem de pulsos rápidos, e ao final do processamento, o programa indica a localização mais provável do defeito gerador da descarga parcial, desde que se tenha uma modelagem correta da instalação. Dentre os defeitos podem ser citados os contatos imperfeitos no condutor central, partículas depositadas sobre o invólucro, elementos condutores flutuantes, entre outros.

**2.0 – METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM BLINDADAS**

## 2.1 - Princípios Físicos Utilizados

O surgimento de diversos tipos de falha no interior de uma SIG está geralmente associado à formação prévia de DP no local.

Os pulsos de corrente (ou tensão) gerados pelas DP, com tempos de frente de onda da ordem de nanossegundos, são conduzidos através dos barramentos, propagando-se para ambas as direções, a partir de seu ponto de formação. Esses pulsos percorrem o interior da SIG e, devido à refrações e reflexões nas extremidades, bifurcações, ou às diferentes geometrias dos barramentos, resultam em um trem de pulsos de frequência elevada.

Os pulsos de corrente originalmente criados devido a um defeito interno possuem tempo de frente e cauda extremamente reduzidos. Um exemplo desses pulsos de corrente é apresentado na Figura 1-(a). Essa informação inicial é resgatada dos trens de pulsos medidos e utilizada na simulação de DP, via programa digital especialmente desenvolvido para essa finalidade, ao longo do trecho de blindada analisado.

O conceito de “onda viajante” é o principal responsável pela solução da equação representativa dos pulsos elétricos por meio de uma formulação gráfica. Essa solução foi obtida há várias décadas por Bergeron [1] que se baseou nas relações lineares existentes entre as grandezas tensão e corrente que se tornam invariantes para um observador situado no referencial destas.

Paralelamente, Bewley [2] desenvolveu uma técnica baseada em ondas viajantes incidentes e refletidas evoluindo no tempo, que por sua relativa simplicidade e viabilidade computacional, foi muito estudada e utilizada posteriormente.

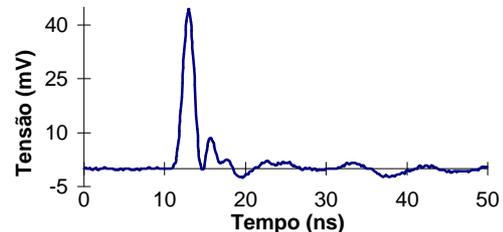
Se for considerada a inexistência de perdas ôhmicas no condutor central, os sinais impulsivos se propagarão com amplitude constante enquanto a impedância característica for constante.

Na fronteira entre dois trechos de blindada com impedâncias diferentes, um pulso incidente se dividirá em duas partes, sendo uma refratada e outra refletida. A evolução dos pulsos no decorrer do tempo é que fornece uma assinatura única de trem de pulsos simulado em cada ponto da instalação considerada. Assim, desenvolveu-se um programa que teve por objetivo localizar focos de ocorrência de DP em instalações blindadas, provendo inclusive recursos de automação da medição e apresentação de resultados a partir de gráficos de fácil interatividade visual.

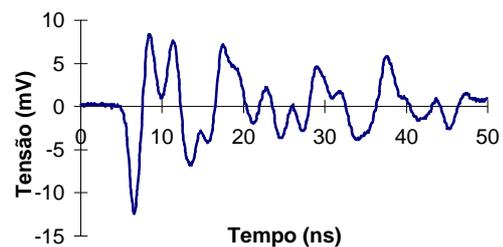
Para proceder à localização da fonte de DP, o programa necessita ser informado das características elétricas do circuito envolvido, as quais são:

- Trem de pulsos de tensão gerado por uma DP, aquisitado no domínio do tempo por instrumentação digital, capaz de caracterizar os processos de propagação de onda. Na Figura 1-(b) é apresentado um exemplo de sinal medido em laboratório, conforme o trecho de blindada da Figura 2. Esse sinal foi registrado com um osciloscópio digital com taxa de amostragem de 1 Gs/s.
- Características elétricas da SIG, representada pelos parâmetros: impedância característica e comprimento dos barramentos e de outros equipamentos instalados (disjuntores, buchas, etc.), e posição do acoplamento capacitivo.

A partir das informações sobre a topologia da instalação e do sinal medido, um programa faz a análise deste sinal comparando-o com diversos sinais simulados ao longo da instalação, estes gerados pelo programa. Como resultado dessas comparações, é possível identificar em qual local da instalação as DP se originam.



(a) - Sinal medido de uma DP.



(b) - Sinal medido com a instalação blindada

FIGURA 1 - Sinais de DP gerados em ambiente com SF<sub>6</sub>

Portanto, o provável local onde está sendo gerada a DP é aquele em que o sinal simulado apresentar maior semelhança com o sinal medido.

Para facilitar a interpretação dos resultados desta análise, são montados gráficos denominados "Curvas

de Localização" que exprimem esta comparação da seguinte maneira:

- Abcissa, representando o comprimento do barramento em metros.
- Ordenada, denominada "Erro" que é obtida através de diferentes métodos de cálculo, como por exemplo a diferença quadrática

Havendo predominância de resultados pelos diversos gráficos, indicando o mesmo ponto de mínimo da curva, existe forte tendência de que a fonte emissora de DP está nesta região.

A quantificação do sinal elétrico gerado pelas DP, segue os princípios da metodologia convencional de detecção da carga aparente com instrumentação de banda larga, conforme a norma IEC 270 [3].

### 3.0 - MEDIÇÃO E ARRANJOS EXPERIMENTAIS

O trecho de instalação à SF<sub>6</sub> apresentado na figura 2, com comprimento total de 40 m, foi montado no Laboratório de ITAIPU visando a elaboração de experiências para fins de localização de defeitos geradores de DP introduzidos em diversos pontos da instalação.

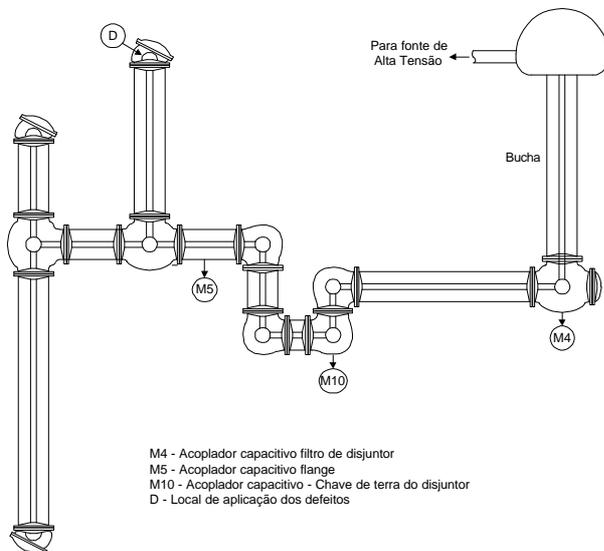
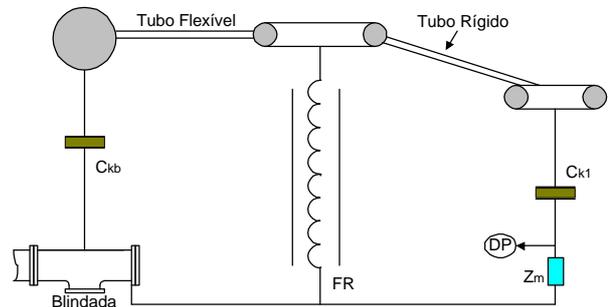


FIGURA 2 - Diagrama geral do trecho de instalação blindada montado em ITAIPU

A metodologia de medição dos sinais elétricos gerados pelas DP requer o uso de um acoplamento capacitivo ( $C_a$ ) a ser introduzido em paralelo com a instalação blindada que se deseja avaliar. Em série com esse acoplamento é conectada uma impedância de medição, finalizando o circuito de ensaio, conforme estipulado por norma.

Na Figura 3 é apresentado um diagrama geral do circuito de ensaio e medição utilizado.



FR - Fonte ressonante de 600 kV da Hipotronics  
 $C_{kb}$  - Bucha de saída da blindada de 600 kV  
 $C_{k1}$  - Capacitor de acoplamento de 3 nF, 600 kV  
 DP - Pontos para medição de carga aparente  
 $Z_m$  - Impedâncias de medição

Figura 3 - Circuito de ensaio e medição montado em ITAIPU

A partir da impedância de medição ( $Z_m$ ), dependendo da avaliação que se queira realizar, é conectado um instrumento digitalizado de medição de DP de banda larga (quantificação e identificação das DP) ou um osciloscópio digital (localização das DP).

O acoplamento capacitivo pode ser feito por diversos tipos de montagem em função das características da instalação blindada. Algumas dessas possibilidades estão apresentadas na Figura 2 (M4, M5 e M10).  $C_{k1}$  (Figura 3) representa um capacitor de acoplamento convencional conectado na saída do trecho isolado à SF<sub>6</sub>, segundo a medição tradicional de DP. Pode ser instalado um acoplamento capacitivo (M5 e M10) interno cuja montagem é similar àquela normalmente requerida para medições em UHF.

Os parâmetros elétricos a serem introduzidos devem ser estimados de modo a se obter boa sensibilidade para fins de quantificação das DP, bem como constante de tempo adequada para que os mecanismos de propagação dos sinais de DP na instalação possam se manifestar na medição.

Na foto 1 está apresentada uma vista geral do arranjo da instalação blindada isolada à gás SF<sub>6</sub>, montado em ITAIPU.



Foto 1 - Trecho de instalação blindada isolada à gás SF<sub>6</sub> montado em ITAIPU

Na foto 2 é apresentado os diferentes pontos dos acopladores disponíveis para a medição das DP.

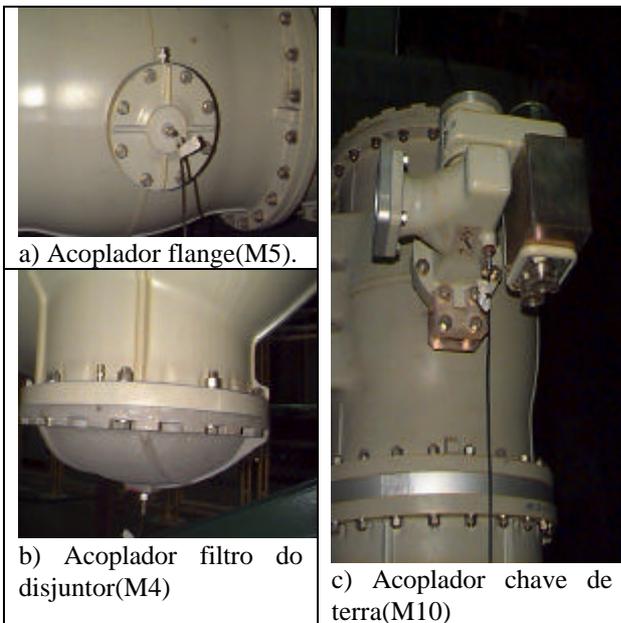


Foto 2 - Acopladores disponíveis para medição de DP na instalação blindada montado em ITAIPU.

O instrumento de medição utilizado para medição das DP, através dos acopladores, foi um osciloscópio digital com uma taxa de amostragem de 1 Gs/s (1 ns entre pontos).

A medição da carga aparente foi realizada com um medidor digitalizado marca Power Diagnostic Systems, o qual fornece uma distribuição das taxas de ocorrência das DP por amplitude e posição no ciclo da senóide à 50 Hz (mapa  $\Phi$ -q-N). Esse sistema de medição foi conectado aos diversos acopladores da instalação com o objetivo de definir sua sensibilidade.

#### 4.0 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para verificar se o modelo da instalação blindada indicado na figura 4 está bem representado para a análise computacional, isto é, se as impedâncias características dos barramentos e equipamentos, comprimentos e a posição do acoplador para medição das DP, estão bem definidos, realiza-se um procedimento de calibração. Para tal, é aplicado um sinal simulador de DP o qual pode ser obtido por meio de um gerador de pulsos de tensão com tempos de frente e cauda na ordem de nanossegundos ou por qualquer meio de centelhamento repetitivo com amplitude suficiente para ser registrado pela instrumentação.

R→ Ramos (Barramentos e equipamentos.)

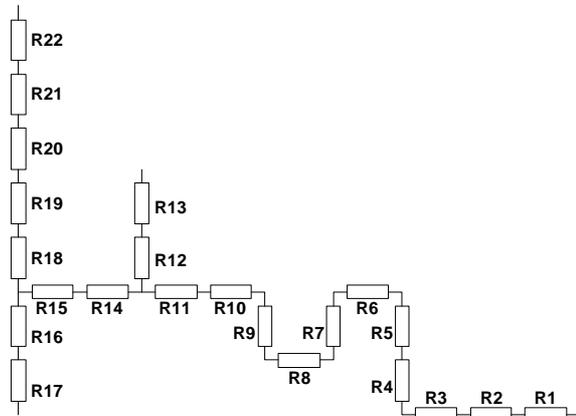


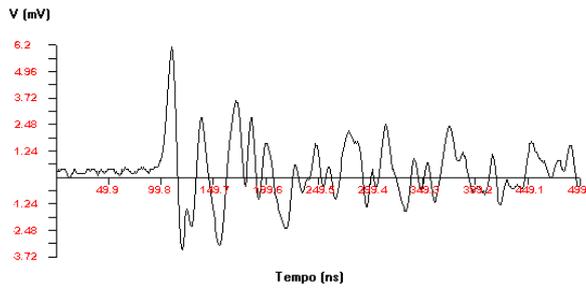
Figura 4 - Diagrama para modelagem da instalação blindada conforme utilizada no programa computacional de localização de DP.

A localização pelo programa, desses pulsos simulados em vários pontos da blindada, validará a modelagem considerada.

Em cada etapa experimental foi introduzida, em um dos compartimentos da instalação, à 22.2 metros de distância da bucha (em D – figura 2), um tipo de falha geradora de descargas parciais, entre elas: eletrodos ponta-plano, eletrodo flutuante e partículas.

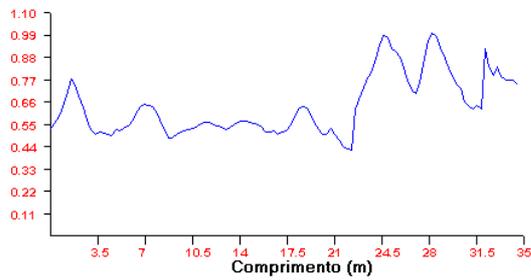
A alta tensão regulada foi aplicada na blindada com gás SF<sub>6</sub> à pressão nominal, conforme fonte de alimentação apresentada na Figura 2, até que os instrumentos de medição começassem a registrar sinais indicando a presença do defeito.

Alguns sinais medidos de DP estão apresentados nas Figuras 5 e 6, respectivamente elas representam sinais causados por defeitos ponta-plano, falha no barramento, e eletrodo flutuante. Além disso seus respectivos resultados (curvas de localização) após processamento e análise do programa digital.

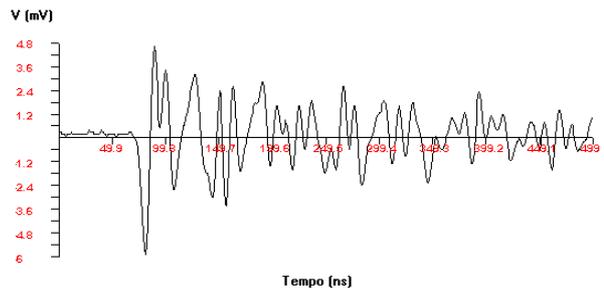


a) Medição com o acoplador filtro do disjuntor (100Mhz) - M4.

Análise : diferença Erro mínimo =0.422 pu  
Valor mínimo =22.2 metros

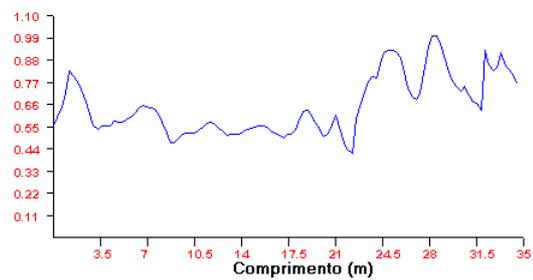


b) Curva de localização

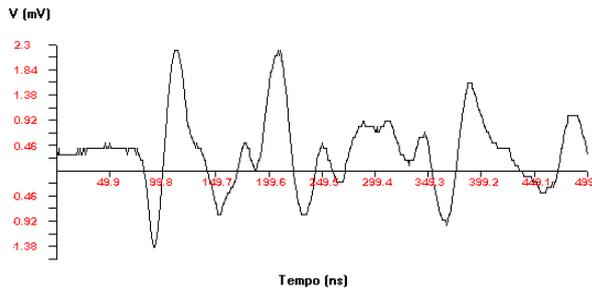


a) Medição com o acoplador filtro do disjuntor (100Mhz) - M4.

Análise : diferença Erro mínimo =0.419 pu  
Valor mínimo =22.2 metros

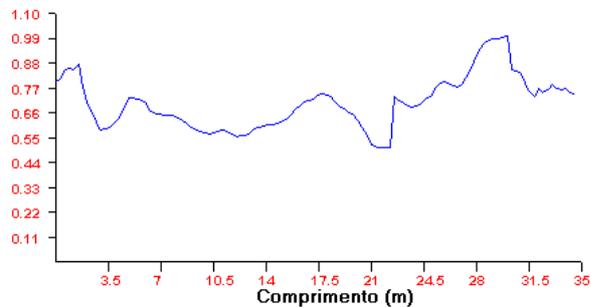


b) Curva de localização

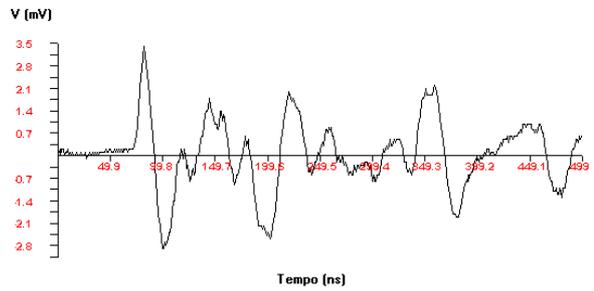


a) Sinal medido com acoplador flange (20 Mhz) – M5

Análise : diferença Erro mínimo =0.505 pu  
Valor mínimo =21.9 metros

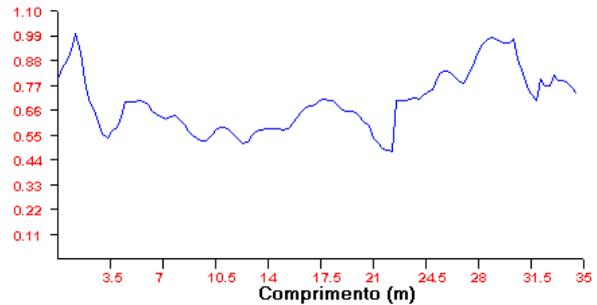


b) Curva de localização



a) Sinal medido com acoplador flange (20 Mhz)– M5

Análise : diferença Erro mínimo =0.475 pu  
Valor mínimo =22.2 metros



b) Curva de localização

FIGURAS 5 – Medição de DP e localização – falha do tipo ponta plano.

FIGURAS 6 – Medição de DP e localização – falha do tipo eletrodo flutuante.

Uma tentativa de geração de DP devido à partículas foi realizada na SIG experimental de ITAIPU. O defeito se manteve gerando DP por um período muito curto, não sendo possível fazer medições devido a baixa taxa de repetição destes sinais para análise. No entanto, verificou-se após inspeção que as mesmas se deslocaram para diferentes pontos no interior do invólucro.

As medições realizadas com o acoplamento da chave de terra do disjuntor, apresentaram sinais de DP bem definidos e com boa amplitude para fins de quantificação, porém, após processá-los, a localização da DP não foi satisfatória. Provavelmente isto ocorreu porque na sua constituição há componentes elétricos internos que interferem na propagação do sinal proveniente da DP.

Este componente pode tornar-se mais eficiente para fins de localização de DP pelo programa se as impedâncias de onda dos componentes elétricos forem cuidadosamente representadas no modelo da blindada.

## 5 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

As características de isolamento dielétrico dos equipamentos, controladas a partir de avaliações das DP, podem ser investigadas atualmente via procedimentos mais completos e mais confiáveis. No caso das instalações blindadas foi apresentada uma metodologia para localização de DP pelo método elétrico.

A sensibilidade de medição foi relativamente constante entre os acopladores, tendo o acoplador filtro do disjuntor um desempenho melhor para ambas as funções de quantificação e localização de defeitos.

A metodologia de localização de falhas geradoras de DP apresentada foi comprovada e sua sensibilidade para identificar com precisão o local do defeito está diretamente associada a modelagem da instalação e a qualidade do sistema de medição, principalmente no que diz respeito ao acoplador capacitivo. Este deve ser elaborado para dar uma boa relação sinal ruído e não prejudicar a qualidade da forma do trem de pulsos (tempos de frente e cauda modificados pelos parâmetros elétricos do circuito de medição). O sinal medido não deve conter interferências importantes causados por sinais espúrios (ruídos). Este é um problema sempre presente principalmente quando se mede níveis de tensão da ordem de alguns milivolts e

com tempos da ordem de nanossegundos. Normalmente, se o sinal útil for cerca de 4 vezes superior ao nível de ruído, a análise deste sinal não será prejudicada para fins de localização dos defeitos. No caso das experiências efetuadas, sinais a partir de algumas dezenas de milivolts puderam ser medidos normalmente.

Até o momento, nas instalações blindadas onde o maior trecho linear não excedera os 40 metros de barramentos, um único acoplador capacitivo tem sido suficiente pois os resultados tem sido satisfatórios tanto para medição quanto localização dos defeitos geradores de DP.

Os resultados individuais dos sinais de medição analisados, através das curvas de localização, mostram sempre um ponto de mínimo, consequentemente, esta indicação passa a ser um local provável de defeito. No entanto, a existência do defeito só será mais representativa se um maior número de sinais de medição analisados indicarem:

- abundância de resultados na curva de localização indicando o mesmo ponto ou na vizinhança do ponto de mínimo desta curva.
- se o caimento da curva de localização, no ponto mínimo, for significativo em relação aos demais pontos - caso ideal, na ausência de interferências - o gráfico toca o mesmo ponto na abcissa da curva de localização, nos três processos de análise: diferença, quadrático e correlação.
- se a curva obtida do somatório das curvas de localização, nos diferentes métodos de análise, indicarem um valor de mínimo expressivo em relação aos demais valores, tendendo para o mesmo ponto.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) L. Bergeron, Du Coup de Bélier en Hydraulique au Coup de Foudre en Électricité (Livre), Paris/France, 1950.
- (2) L. V. Bewley, Traveling Waves on Transmission Systems, New York, 1951.
- (3) IEC 270, Partial Discharge Test Techniques, Draft sep/1996.