



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA E PROJETO DE FILTROS ANALÓGICOS PARA MEDIÇÃO DE SINAIS PULSANTES NO CAMPO

**ANDRÉ TOMAZ DE CARVALHO (*)
CEPEL**

**HÉLIO DE PAIVA AMORIM
CEPEL**

**ALAIN FRANÇOIS LEVY
CEPEL**

RESUMO

O presente artigo descreve uma abordagem do procedimento de medição de sinais pulsantes no campo (Rádio Interferência, Descargas Parciais, etc.), desde a análise no domínio da frequência dos sinais até a modelagem, simulação e a implementação de filtros analógicos para medição desses sinais com redução significativa de ruídos.

Na fase de análise foram utilizados: osciloscópio, analisador de espectro e algoritmos de processamento de sinais, sobretudo para a caracterização da relação entre sinais e ruído no ambiente no qual se deseja realizar a medição.

Numa segunda fase, circuitos de filtros analógicos foram projetados, simulados e implementados com a finalidade de atender à medição.

Finalmente, dois estudos de caso são apresentados. O primeiro deles trata da supressão de ruídos oriundos do chaveamento de tiristores na medição de descargas parciais em um hidrogerador de grande porte.

O segundo caso mostra a medição de descargas parciais em um transformador de potência, no qual a utilização de um filtro analógico associado ao sistema de medição desenvolvido pelo Cepel apresentou melhor sensibilidade do que outros sistemas comerciais de medição, devido a eficiência do filtro em suprimir os ruídos existentes na instalação.

PALAVRAS-CHAVE

Sinais Pulsantes, Descargas Parciais, RIV, Corona, Filtros, Medição

1.0 - MEDIÇÃO DE SINAIS PULSANTES NO CAMPO

A medição de sinais pulsantes no campo é um tema de suma importância e ainda pouco esclarecido entre engenheiros eletricitas. A compreensão dos fenômenos físicos de natureza pulsante, as técnicas de medição, as características da instrumentação utilizada e a interpretação dos dados de medições são ainda origem de muitas dúvidas e discussões entre os profissionais do setor elétrico que devem lidar no dia a dia com esse tipo de medição.

Sinais pulsantes são sinais elétricos impulsivos, aperiódicos, de amplitudes variadas, originados da disrupção eletrônica no meio isolante em torno das regiões dos equipamentos submetidas a altas tensões. As técnicas de medição podem diferir ligeiramente de acordo com sua finalidade. Entretanto, seja em medições de rádio ou tv-interferência, seja em medições de descargas parciais ou de efeito corona, os princípios aqui discutidos devem aplicar-se genericamente a toda a gama de sinais pulsantes.

(*) Avenida Horácio Macedo, 354- Cidade Universitária - Ilha do Fundão, CEP 21941-911, Rio de Janeiro, RJ – Brasil. Tel: (+55 21) 2598-6462 – Email: tomaz@cepel.br

A principal característica dos sinais pulsantes está na típica presença de elevadas componentes em altas frequências. Essa característica, que faz com que os sinais pulsantes sejam facilmente irradiados, é também a principal dificuldade quando se trata de realizarmos uma medição do sinal conduzido através dos circuitos de medição.

Em altas frequências, reatâncias capacitivas e indutivas que poderiam ter sido desprezadas em frequências mais baixas recobram sua importância, alterando significativamente os circuitos de medição. Além do mais, quando o comprimento de onda dos sinais envolvidos passa a ser da mesma ordem de grandeza das dimensões dos elementos do circuito (e esse é o caso dos sinais de alta frequência), deixam de valer as Leis de Kirchhoff, e os circuitos devem ser tratados como linhas de transmissão regidas pelas Equações de Maxwell.

Outra dificuldade de medição é que, em comparação com as tensões presentes no sistema elétrico, a amplitude dos sinais pulsantes é praticamente desprezível. Assim, no processo de medição de sinais pulsantes, há uma desfavorável relação de sinal-ruído entre os sinais pulsantes e a tensão do sistema elétrico.

Para abordar todos esses problemas, é conveniente realizar uma análise e um tratamento desses sinais no domínio da frequência.

No entanto, muitas vezes há ainda a necessidade de discriminação entre sinais pulsantes concorrentes, oriundos de fontes diferentes ou mesmo de fenômenos distintos. Nesse caso, em que o sinal de interesse e o ruído podem conter componentes de frequência muito semelhantes, o tratamento dos sinais deve ser feito criteriosamente no domínio do tempo.

A seguir, será apresentada uma análise de sinais pulsantes no domínio da frequência e serão ilustrados os principais conceitos concernentes a sua medição.

2.0 - CARACTERÍSTICAS DE UM SINAL PULSANTE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Idealmente, podemos modelar um sinal pulsante como um espalhamento estatístico de funções impulso delta de Dirac $k\delta(t)$.

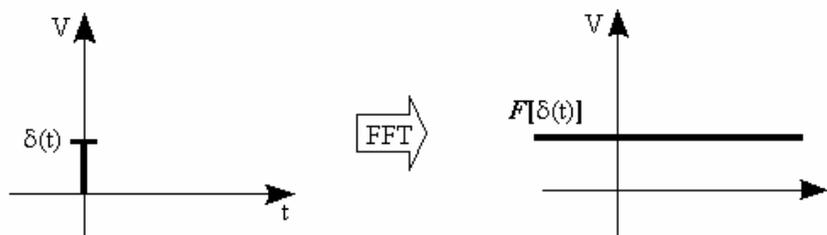


Figura 1: Transformada de Fourier de uma Função Impulso.

Aplicando a Transformada de Fourier temos que $F[\delta(t)] = 1$, e que $F[k\delta(t)] = k$. Isso significa que um pulso $\delta(t)$ com fator de escala k terá componentes de frequência de amplitude k . Em outras palavras, um pulso ideal manifesta-se por igual em todas as frequências do espectro real.

A conclusão é que, para a avaliação de um sinal pulsante ideal, não existe necessariamente uma banda de medição preferencial. A escolha da banda de medição será função do ambiente, dos ruídos presentes, dos circuitos de medição e também da capacidade dos sistemas de medição disponíveis.

Naturalmente, os sinais pulsantes presentes numa instalação elétrica não são impulsos ideais. No entanto, essa aproximação é válida, e de fato verifica-se que os sinais pulsantes podem ser medidos em um amplo espectro, desde baixas frequências até frequências muito elevadas.

3.0 - PROPAGAÇÃO DE SINAIS PULSANTES

Na prática, existe a grande limitação de que, ao medirmos sinais pulsantes, medimos na realidade um efeito propagado, e não a sua causa direta. De fato, diante da impossibilidade de medirmos diretamente a carga total envolvida numa disrupção eletrônica, seja ela no interior de um material isolante ou no ar em torno das partes energizadas de um equipamento, limitamo-nos a medir um efeito que se convencionou chamar de carga aparente.

A carga aparente medida, vale lembrar, é o efeito da disrupção eletrônica local propagado ao longo do próprio equipamento e ao longo do circuito de medição utilizado.

Assim, o sinal pulsante medido chega até o sistema de medição fortemente condicionado pelas características elétricas do caminho percorrido. Uma vez que na maioria dos equipamentos elétricos o local preciso da disrupção eletrônica pode variar consideravelmente, e que várias disrupções percorrendo caminhos diferentes concorrem numa mesma medição, é praticamente inviável modelar todos os possíveis efeitos mensuráveis num determinado equipamento.

Entretanto, globalmente esse efeito pode e deve ser levado em consideração. Por exemplo, ao medirmos descargas parciais em um enrolamento estático, sabemos que os sinais serão filtrados pelas indutâncias em série e pelas capacitâncias em paralelo do próprio enrolamento. Assim, o enrolamento atenuará as frequências mais altas dos sinais propagados, à medida em que esses terão de percorrer caminhos maiores ou menores até o circuito de medição. Os sinais de mais altas componentes de frequência, portanto, terão sido originados das barras mais próximas ao ponto de medição, ao passo que os sinais de mais baixas componentes de frequência terão sido atenuados ao longo do enrolamento.

Essa análise preliminar pode assim conduzir a uma adoção estratégica da banda de medição: uma banda muito elevada pode não captar sinais oriundos do meio do enrolamento, ao passo que essa mesma banda pode ser mais sensível às descargas ocorridas nas barras mais próximas à saída de fase, que serão também as barras mais solicitadas dielectricamente. Por outro lado, uma banda de medição mais baixa poderia captar sinais provenientes de todo o enrolamento, desde as barras próximas à saída de fase até as barras mais distantes.

4.0- ANÁLISE DA SENSIBILIDADE EM CADA PONTO DE MEDIÇÃO

Dado que um sinal pulsante pode ser a princípio medido num amplo espectro, e que as características do sinal medido no domínio da frequência estão fortemente vinculadas ao ponto de medição, às características de cada equipamento e às características de cada instalação em particular, não é possível determinar de antemão quais as melhores condições de medição em cada caso concreto.

No entanto, essas condições podem ser determinadas experimentalmente em cada ponto de medição com o auxílio de uma instrumentação relativamente simples.

O processo consiste em utilizar um osciloscópio digital para identificar o nível dos sinais, possíveis ruídos presentes na instalação e as características no domínio da frequência de cada tipo de ruído.

A Figura 2 exemplifica o processo de identificação de um ruído de tiristor em uma máquina hidrogeradora, e as componentes de frequência do sinal da ordem de algumas dezenas de kHz.

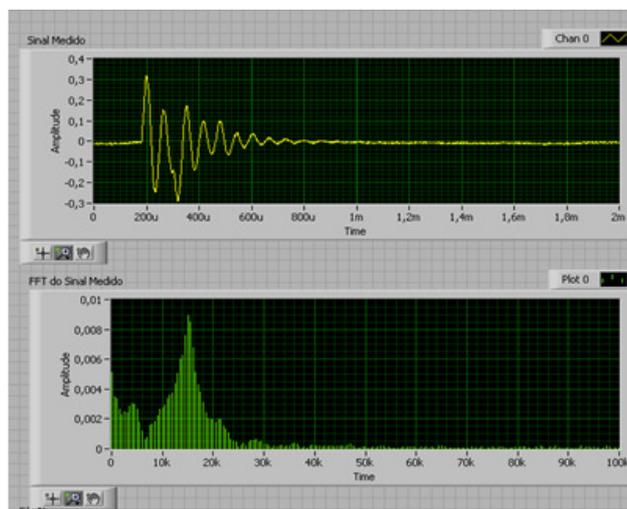


Figura 2 - Ruído oriundo de chaveamento de tiristor e característica em frequência.

Numa etapa posterior, eliminados os ruídos no domínio da frequência, utiliza-se um analisador de espectro para identificar a banda de medição de maior sensibilidade para cada ponto de medição. De posse dessas informações, é possível identificar a banda na qual o sistema de medição apresenta a melhor sensibilidade global, preferencialmente imune aos ruídos existentes.

Para exemplificar a utilização do analisador de espectro na identificação da banda de maior sensibilidade, a Figura 3 mostra a experiência da aplicação de um centelhamento a 71% do enrolamento de uma máquina hidrogeradora, e medição com analisador de espectro até 20 MHz entre 71 e 100 % do enrolamento via acoplador de 9 nF em série com 50 Ω .

Observe que a região de sensibilidade mais uniforme obtida dentre os pontos de medição encontra-se entre 4 e 6 MHz.

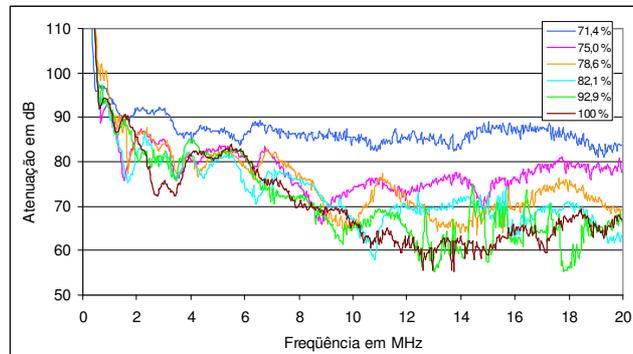


Figura 3 - Aplicação de centelhamento a 71% do enrolamento de uma máquina hidrogeradora, e medição com analisador de espectro até 20 MHz entre 71 e 100 % do enrolamento via acoplador de 9 nF em série com 50 Ohms.

Especial relevo deve ser concedido ao fato de que cada instalação sempre terá as suas próprias características de ruído, e deverá ser avaliada em suas peculiaridades caso a caso. Uma vez definidas essas características particulares de cada instalação, todos os circuitos de medição poderão ser mais bem projetados e calibrados para obtenção de uma maior sensibilidade e um melhor proveito do sistema de medição.

5.0 - SINAIS E RUÍDOS

Na medição de sinais pulsantes, o primeiro ruído a ser tratado deve ser a própria tensão da rede elétrica. Assim, um típico circuito de medição, mostrado na Figura 2, se encarado sob o domínio da frequência, trata-se de um filtro passa altas de alta tensão.

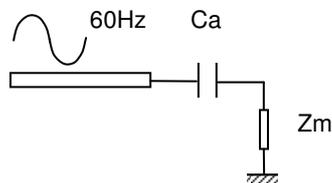


Figura 4 – Circuito elementar típico de medição de um sinal pulsante sobre 60Hz.

Esse circuito cumpre o papel de atenuar fortemente os 60Hz, isolando a alta tensão do sistema de medição. Entretanto, dada a elevada tensão de entrada, não é raro que uma tensão residual de 60Hz da ordem de alguns milivolts permaneça como ruído de medição.

Além da tensão síncrona, outras fontes de ruído comumente encontradas são o chaveamento de tiristores (utilizados na retificação da corrente de excitação de rotores de máquinas síncronas), o chaveamento empregado por inversores e outros dispositivos eletrônicos, etc. Tais sinais de chaveamento comumente apresentam componentes de frequência da ordem de dezenas a centenas de kHz.

A Figura 3 mostra ruído de 60Hz e ruídos do chaveamento de tiristores (6 por ciclo) obtidos na medição de descargas parciais sobre uma máquina hidrogeradora. Observe que os ruídos são da mesma ordem de grandeza de alguns sinais.

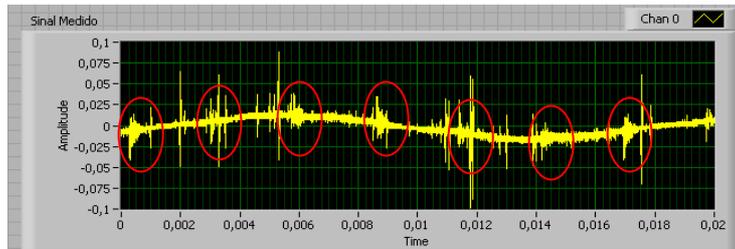


Figura 5 - Ruídos de 60Hz e de tiristores.

Ambos os tipos de ruído supracitados podem geralmente ser eliminados mediante tratamento no domínio da frequência, através de filtragem analógica ou do posterior processamento por filtros digitais.

Não obstante, quando o ruído de medição apresenta características impulsivas semelhantes ao sinal medido, uma discriminação no domínio do tempo é necessária. Exemplos de processos de eliminação de ruído no domínio do tempo são a medição diferencial de DP's (utilizada para eliminação de sinais de DP externos ao equipamento), ou a eliminação de pulsos de DP captados simultaneamente por uma antena externa (utilizada para descartar pulsos de corona externos ao equipamento).

6.0 - PROJETO DE FILTROS ANALÓGICOS

Consideremos a medição de sinais pulsantes no campo. Identificados os tipos de ruídos existentes, feita a análise de sensibilidade do sistema de medição, apresentamos como proposta a confecção de filtros analógicos para o pré-condicionamento dos sinais pulsantes no domínio da frequência. Embora nem todos os ruídos e dificuldades de medição possam ser sanados com a utilização desse recurso, verificamos que em muitos casos esse tipo de abordagem é aderente e garante a qualidade das informações adquiridas no campo.

A opção por filtros analógicos apresentou diversas vantagens interessantes, dentre elas: seu baixo custo, a simplicidade do projeto, sua relativamente fácil implementação (desde que seguidas certas recomendações contrutivas), não necessitarem de fonte externa de alimentação, e apresentarem resposta em frequência até cerca de 1GHz.

Como exemplo, tomemos o circuito mostrado na Figura 6. Sua resposta em frequência é mostrada na Figura 7.

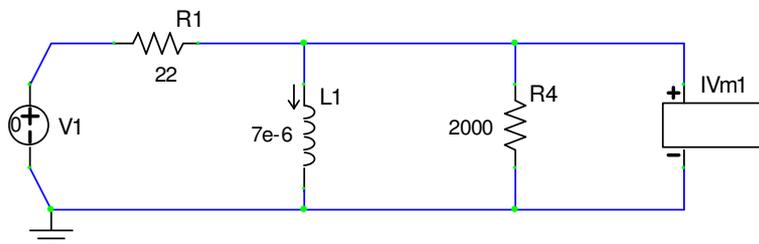


Figura 6 – Exemplo de filtro analógico passa altas de 1MHz.

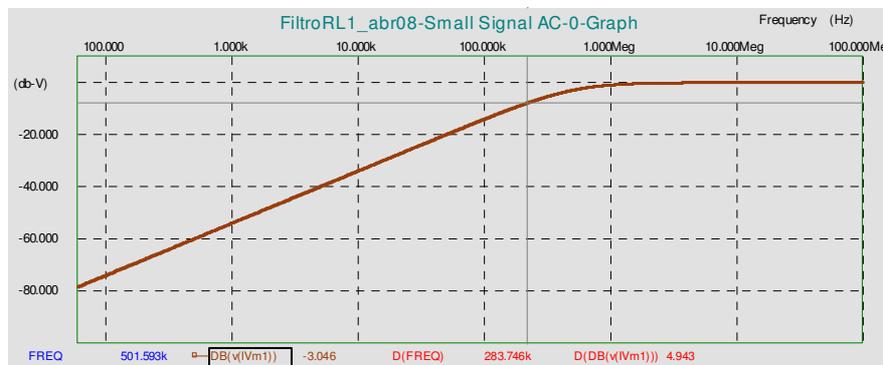


Figura 7 - Resposta em frequência do filtro passa altas de 1MHz.

Simulado o circuito, verificamos que esse circuito filtraria convenientemente ruídos de tiristores e de 60Hz mostrados na Figura 2 e na Figura 5. Entretanto, para assegurar suas características de resposta em frequência, foram necessários certos cuidados em relação à implementação e montagem.

Tais cuidados seguem os mesmos padrões de montagem de um circuito de Rádio Frequência, dentre os quais elencamos:

- Utilização de vários componentes em paralelo para obter os valores de resistências e capacitâncias requeridos no projeto. Utilizamos esse recurso sobretudo para reduzir as indutâncias em série de cada componente, que poderiam alterar as características do circuito em altas frequências.
- Evitar associações em série que possam contribuir para aumento das indutâncias do circuito.
- Utilização de fitas de cobre ao invés de fios, para reduzir as indutâncias dos elementos de interligação.
- Utilização de indutores enrolados em núcleos de ferrite.
- Utilização de núcleos de ferrite de boa qualidade, para assegurar as características elétricas em altas frequências.
- Preservar distâncias mínimas entre componentes para minimizar efeitos capacitivos.
- Utilizar blindagem elétrica em volta de todo o aparato montado.

A Fig. 8 mostra a medição no domínio do tempo de um pulso de descarga parcial obtido em laboratório, com e sem a utilização do filtro descrito acima. As formas de onda diferem ligeiramente, em virtude das novas indutâncias e capacitâncias introduzidas com o filtro no circuito de medição. Observa-se a redução de aproximadamente 20% da amplitude do primeiro pico da forma de onda do sinal. Entretanto, como a forma de onda de todos os pulsos será essencialmente a mesma (em função das características do circuito), a medição pode ser adequadamente realizada calibrando-se a carga aparente do pulso em função da amplitude desse primeiro pico.

Essa análise preliminar em laboratório mostra que, além de eliminar os ruídos de medição, a avaliação dos sinais pulsantes pode ser feita mediante a calibração do sinal.

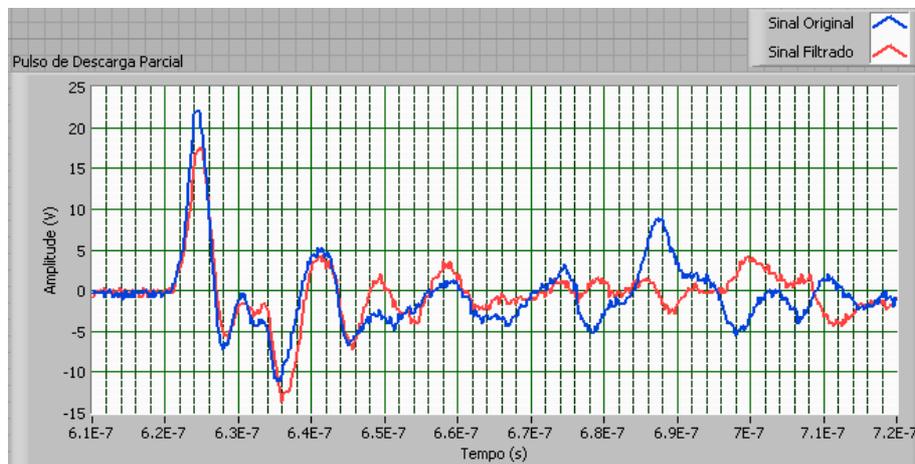


Figura 8 - Pulso de descarga parcial medido com e sem a utilização do filtro.

A Figura 9 mostra o resultado da medição de um trem de pulsos de DP ao longo de vários ciclos da senóide utilizando o filtro desenvolvido.

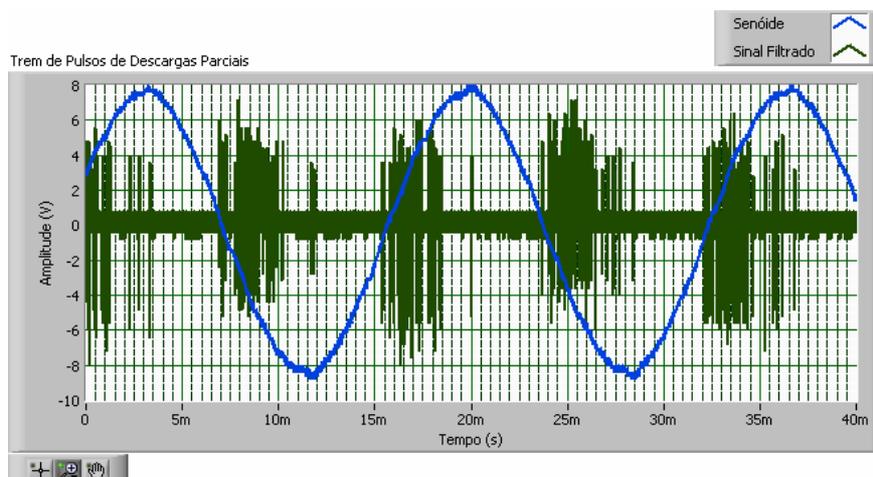


Figura 9 - Trem de Pulsos de DP medidos ao longo de vários ciclos.

7.0 - RESULTADOS OBTIDOS

A avaliação da eficácia do filtro foi feita com base em dois casos práticos de medições no campo. O primeiro caso foi a medição de descargas parciais em um hidrogerador de grande porte, onde constatou-se a presença marcante de ruídos de 60Hz e de ruídos oriundos do chaveamento de tiristores. O segundo caso consiste na medição de descargas parciais em um transformador de potência no campo, sujeito a ruídos sobretudo de 60Hz, e de outros ruídos de menor amplitude presentes na subestação.

A Figura 10 mostra o resultado da aplicação do filtro acima descrito para eliminação de um sinal de tiristor em uma máquina Hidrogeradora. Observe que os sinais de descargas parciais da máquina foram preservados no sinal filtrado.

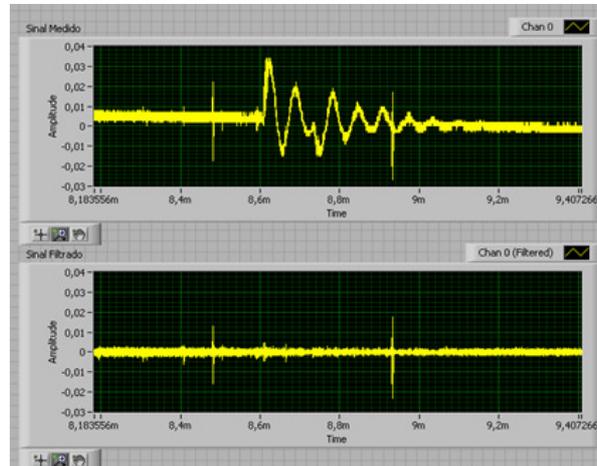


Figura 10 - Acima: ruído de tiristor. Abaixo: sinal filtrado.

A Figura 11 mostra o mesmo sinal da Figura 5, agora captado após o filtro. Observe a eliminação do ruído de 60Hz e dos sinais de tiristores.

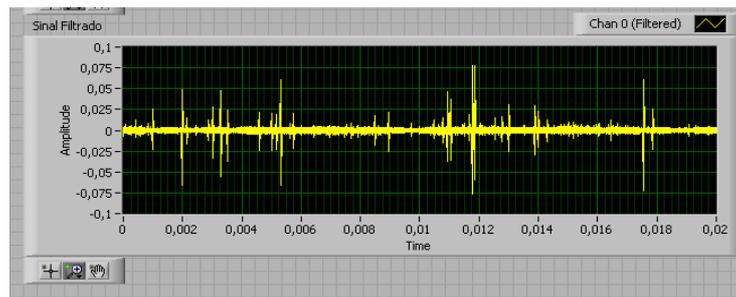


Figura 11 - Sinal filtrado de descargas parciais.

Finalmente, apresentamos o caso da medição no transformador da subestação do Cepel, unidade Adrianópolis. Esse transformador, fabricado em 1979 com potência nominal de 11 MVA, alimenta ensaios nos laboratórios de alta potência do Cepel e é sujeito a ciclos de operação irregulares, sendo frequentemente solicitado. A Figura 12 mostra o resultado de uma medição. O mapa estatístico de DP é um gráfico de superfície no qual se representam – de acordo com a norma IEC-270 – a fase de ocorrência do pulso de DP, sua amplitude e o número de pulsos, indicado pela coloração no eixo z.

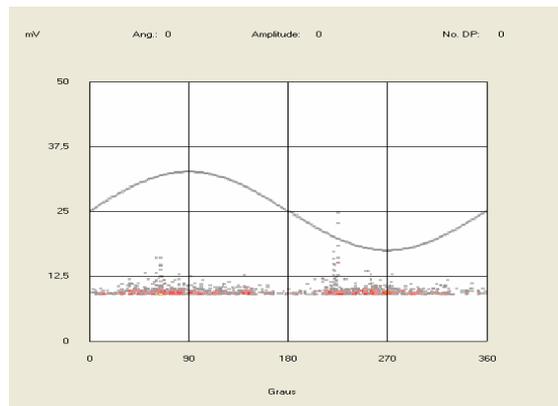


Figura 12 - Medição de DP no Trafo da Subestação CEPTEL

O circuito de medição foi calibrado de modo que 25mV equivaleram a 250pC. O resultado da medição foi considerado de boa qualidade. Vale ressaltar que outros instrumentos de medição comerciais com larguras de banda limitadas e inferiores a 1MHz não obtiveram o mesmo sucesso, devido a baixa relação sinal/ruído.

A análise do gráfico mostra ocorrência de DP com baixa taxa de repetição e com baixas amplitudes. Trata-se de um fenômeno incipiente no Trafo, que não representa nenhum problema grave, mas recomenda-se um acompanhamento periódico destas atividades, de forma que uma avaliação mais contundente possa ser realizada em futuras ocasiões de manutenção programada.

8.0 - CONCLUSÃO

Nesse trabalho descrevemos uma abordagem do procedimento de medição de sinais pulsantes no campo, desde a análise no domínio da frequência dos sinais na instalação concreta até a modelagem, simulação e a implementação de filtros analógicos para medição desses sinais com redução significativa de ruídos.

Dois estudos de caso são apresentados. O primeiro deles trata da supressão de ruídos oriundos do chaveamento de tiristores na medição de descargas parciais em um hidrogerador de grande porte.

O segundo caso mostra a medição de descargas parciais em um transformador de potência, no qual a utilização de um filtro analógico associado ao sistema de medição desenvolvido pelo Cepel apresentou melhor sensibilidade do que outros sistemas comerciais de medição, devido a eficiência do filtro em suprimir os ruídos existentes na instalação.

Os resultados foram considerados satisfatórios, apontando a utilização desse tipo de circuito como uma alternativa eficaz para melhorar a qualidade da medição de sinais pulsantes no campo.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A. T., Levy, A. F. S., Amorim, H. P. Jr, Rocha, R. O., Sans, J. e Nascimento, L. - Sistema para Medição e Análise e Diagnóstico de Descargas Parciais - Uma Proposta de Arquitetura Econômica Versátil e Integrada – II ENAM – 2004 – Belém - PA – Brasil
- [2] Curdts, E.B., "Fundamentals of Partial- Discharge Detection: System Sensitivity and Calibration", Engineering Dielectrics Volume I: Corona Measurement and Interpretation. ASTM Special Publication 699, Philadelphia, 1979, pp. 68-100.
- [3] Zaengl, "IEC TC 42 WG – CD September 95 – Partial Discharge Measurements".
- [4] Gross, D and Soeller, M., "Partial Discharge Diagnosis and Monitoring on Generators and Motors" - 'Diagnostik Elektrischer Betriebsmittel', Berlin, February 26-27, 2002
- [5] Carvalho, A. T., Levy, A. F. S., Amorim, Cardoso, J. A. e Nascimento, Medições de Descargas Parciais no Campo – Aspectos Práticos em Transformadores de Potência, XIII Eriac, 2009, Puerto Iguazú, Argentina.