

Análise de Sinais Provocados por Defeitos em Linhas de Transmissão Utilizando Técnicas de Telecomunicação e Processamento de Sinais

A.C. Dallbello, CEMAT¹, P. M. Silveira, M. F.C. Parentoni, e J.F. Adami, UNIFEI²

Resumo - O objetivo deste trabalho é apresentar o procedimento de análise de sinais adquiridos quando da ocorrência de defeitos em linhas de transmissão. Para tanto, foi necessária a instalação de um sistema de aquisição de dados, capaz de adquirir sinais de alta frequência presentes em linhas de transmissão. De posse deste sistema, foram realizados diversos testes, simulando defeitos em linhas de transmissão. A partir da aquisição desses sinais, foi possível desenvolver técnicas capazes de definir particularidades de cada sinal, com o objetivo de relacionar o tipo de distúrbio com o tipo de defeito. Paralelamente, foi desenvolvido um procedimento para realizar a localização de defeitos em linhas de transmissão. Os resultados obtidos também são avaliados neste trabalho.

Palavras-chave - Defeitos, Linhas de Transmissão, Processamento de Sinais.

I. INTRODUÇÃO

A manutenção em linhas de transmissão é de fundamental importância, uma vez que é desejável que as falhas devido ao mau funcionamento sejam reparadas no menor tempo possível. No entanto, de acordo com as possibilidades, também é de fundamental importância que a manutenção não seja feita apenas de maneira corretiva e, sim, de maneira preditiva, objetivando que as linhas operem sem interrupções.

Atualmente, a possibilidade de manutenção preventiva em uma linha de transmissão quase se restringe quase totalmente à inspeção visual associada ao grau de experiência dos próprios inspetores [1, 2, 3].

Neste campo, seria interessante a existência de um sistema inteligente capaz de inspecionar automática e continuamente linhas de transmissão. Sistema este que, através desta inspeção, fosse capaz de identificar perturbações provenientes de eventuais ocorrências na linha. Ocorrências sensíveis demais para serem registradas por medidores convencionais, mas importantes demais para serem ignoradas, pois não é incomum que estas se transformem em ocorrências mais graves, podendo acarretar até mesmo a interrupção do fornecimento de energia elétrica.

O desenvolvimento de um sistema de manutenção preditiva em linhas de transmissão, tal como especificado, depende fortemente da identificação dos defeitos que por ventura possam ocorrer.

Desta maneira, atentando para esta necessidade, o

presente trabalho tem por objetivo mostrar o desenvolvimento de um sistema de identificação de defeitos em linhas de transmissão.

Uma vez que os defeitos sejam identificados corretamente, é possível obter informações sobre o risco que estes representam para o funcionamento da linha de transmissão, deixando a tomada de decisão a cargo da equipe de manutenção.

A aplicação deste sistema de identificação de defeitos pode ser de grande valia, uma vez que ele permite a previsão da ocorrência de faltas em linhas de transmissão, desde que estas sejam ocasionadas por defeitos. Previsão esta que permite prevenir interrupções no fornecimento de energia elétrica, evitando assim gastos financeiros desnecessários.

II. PREMISAS

A. Defeitos em Linhas de Transmissão

As maneiras como as falhas em uma linha de transmissão ocorrem são classificadas em dois grupos, os quais necessitam de detecção, identificação e localização [4].

O primeiro grupo é aquele que trata, ou melhor, é aquele que se relaciona às ocorrências de curto-circuitos e é denominado faltas elétricas. Sabe-se que um curto-circuito pode ocorrer em consequência de queimadas na faixa de serviço da LT, de descargas atmosféricas, de rompimento e queda de cabos e/ou torres devido a condições climáticas desfavoráveis como granizo, vento forte, etc.

O segundo grupo é aquele que engloba diversos tipos de defeitos que poderão também conduzir à ocorrência de uma falta com possível desligamento da linha de transmissão e são simplesmente chamados defeitos. Alguns exemplos de defeitos podem ser observados nas Figura 1 (Cadeia de isoladores com um ou mais isoladores defeituosos (perfuração interna; trinca), quebra da saia; calcificação da superfície; etc.).



Figura 1. Isoladores defeituosos

¹ Centrais Elétricas Matogrossenses S. A.

² Universidade Federal de Itajubá

Outro tipo de defeito encontrado é quando o cabo apresenta condutores parcialmente rompidos que podem ser provocados por vibrações eólicas. Este fenômeno é provocado por ventos transversais brandos (em torno de 2 m/s) os quais incidem sobre os condutores que, submetidos a trações mecânicas superiores a 20% de suas cargas de ruptura, absorvem tais energias e as transmitem aos pontos de suspensão.

Os vários tipos de defeitos mencionados anteriormente irão se manifestar através de efeitos eletromagnéticos, efeitos térmicos e efeitos sonoros. Os efeitos eletromagnéticos estão ligados aos outros efeitos e dois tipos básicos podem ser analisados: a descarga de "corona" (corona discharge) e o intervalo de centelha (spark-gap).

B. Ideologia do Sistema

As equipes técnicas das companhias de energia elétrica têm percebido, ao longo dos anos, o aparecimento de algumas interferências na forma de ruídos no sistema de ondas portadoras (sistema carrier ou Power Line Carrier - PLC). Percebeu-se também uma certa correlação destes ruídos com problemas nas linhas de transmissão que, com o tempo, poderão culminar no desligamento da linha.

Baseado nestas constatações, este trabalho procurou investigar e estudar as interferências que aparecem no sistema de ondas portadoras, cujas frequências situam na faixa de 30 a 500 kHz. Pretendeu-se que tal investigação conduzisse à descoberta de padrões ou assinaturas dos defeitos que ainda estivessem ocultos, como ilustra a figura 2, de modo que, uma vez identificados e localizados, os mesmos pudessem ser sanados antes que viessem efetivamente a interromper o sistema de transmissão.

O conhecimento dos mecanismos de interferências dos defeitos nos sinais do sistema de ondas portadoras torna-se essencial no estudo e implementação de medidas preditivas e corretivas nas linhas de transmissão sem a necessidade de desligamentos imprevistos / forçados. De posse destas informações, pode-se priorizar os investimentos, aumentar a eficiência do setor elétrico e, por extensão, das atividades produtivas dos consumidores de energia elétrica.

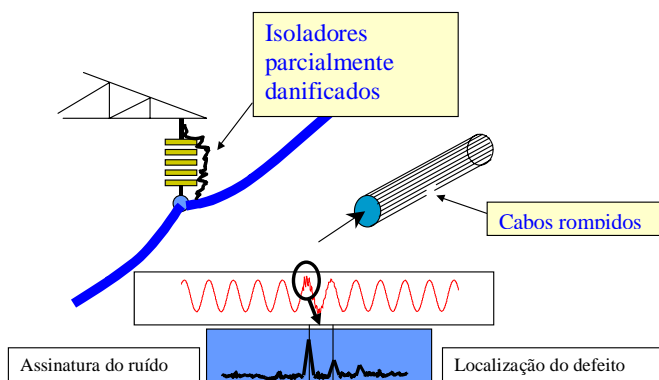


Figura 2. Topologia do sistema.

Deste modo foi utilizada a análise dos sinais do sistema de ondas portadoras em determinada largura de banda por meio de técnicas de processamento de sinais, transformada wavelet e filtros digitais.

Para tanto, utilizou-se resultados de medições registradas em instrumentação, instalada em duas subestações da CEMAT – Centrais Elétricas Matogrossenses S.A. Para que tal abordagem fosse viável, equipamentos de PLC como: transmissores, receptores, filtros seletivos, capacitores de acoplamento, bobinas de bloqueio e caixas de sintonias foram instaladas nas três fases. Além disso, para a captura e a análise dos sinais utilizou-se osciloscópios digitais de alta performance, voltímetros seletivos e placas de aquisição de dados de alta velocidade.

III. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados foi montado e desenvolvido para possibilitar que os sinais, que sofrem interferência de qualquer ocorrência de interesse na linha de transmissão sejam adquiridos por uma placa de aquisição de dados localizada na parte de recepção do sistema.

A estrutura desse sistema é descrita nos itens subsequentes.

A. Topologia do Sistema

O sistema consiste na montagem de uma estrutura para a inserção e retirada do sinal de comunicação da linha de transmissão. A figura 3 ilustra a topologia deste sistema.

Pode-se observar que o sistema consiste basicamente de um equipamento de ondas portadoras (Power Line Carrier – PLC), caixas de sintonia, capacitores de acoplamento, bobinas de bloqueio, a própria linha de transmissão (LT) e, para efetuar a recepção do sinal, uma placa de aquisição de dados.

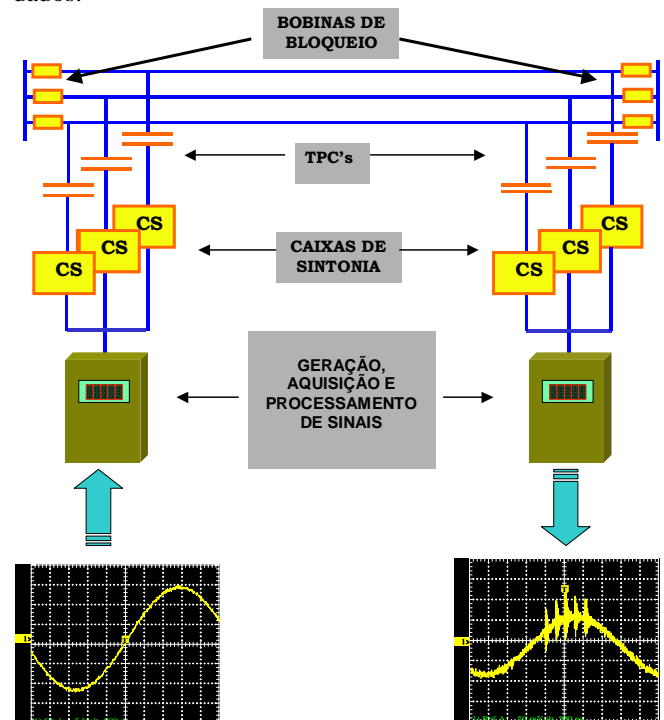


Figura 3. Topologia do sistema.

Os equipamentos que formam os sistemas de transmissão e recepção de sinais foram instalados em subestações, conectadas por uma linha de transmissão de aproximadamente 110 km, de CEMAT. A figura 4 retrata a instalação da bobina de bloqueio, do capacitor de

acoplamento e da caixa de sintonia.



Figura 4. Equipamentos do sistema.

Quando da recepção, o sinal oriundo da caixa de sintonia é conduzido à placa de aquisição de dados através de um cabo coaxial. A placa, controlada por um computador, foi programada da maneira descrita no item B.

B. Programação das Placas de Aquisição de Dados

O sistema de identificação requer que a placa de aquisição de dados possua uma excelente performance perante a aquisição de sinais de alta frequência, desta maneira foi utilizada uma placa com taxa de amostragem máxima de 200 MS/s e resolução de 12 bits.

Sabendo que o sistema fica monitorando continuamente o sinal de recepção e que não é viável gravar sinais em todos os momentos, a placa foi programada de tal forma que apenas quando da ocorrência de alguma perturbação no sinal carrier, seja gerado um comando de trigger válido de maneira que o sinal recebido seja gravado.

Assim, quando ocorre um defeito na linha de transmissão, o sinal carrier sofrerá uma perturbação. Este sinal chegando à placa de aquisição de dados dispara um comando de trigger e, conseqüentemente, é gravado para posterior análise.

C. Funcionalidade do Sistema

De posse do sistema instalado foram realizados alguns testes com o intuito de verificar sua funcionalidade, ou seja, com o objetivo de averiguar se o sistema realmente é capaz de transmitir e receber sinais em condições de aquisição.

O nível de recepção do sinal medido em campo foi extremamente satisfatório, fato que possibilitou à placa realizar as aquisições.

A título ilustrativo, a figura 5 mostra um sinal adquirido pela placa de aquisição de dados, durante operação normal

da linha de transmissão.

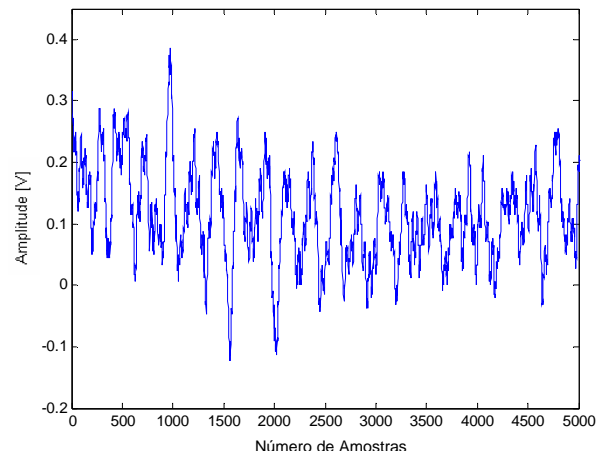


Figura 5. Sinal adquirido.

É importante frisar que este sinal não apresenta nenhuma perturbação conseqüente de algum defeito na linha de transmissão. Foi adquirido apenas para avaliar o nível de recepção do sistema.

IV. REALIZAÇÃO DE TESTES EM CAMPO

Após a instalação, o sistema passou a monitorar continuamente o sinal carrier. Desta forma, sinais passaram a ser adquiridos. Os sinais adquiridos podem ser divididos em dois grandes grupos:

1. Sinais adquiridos sem forçar defeito algum. São sinais que foram adquiridos devido a alguma ocorrência desconhecida na linha de transmissão;
2. Sinais adquiridos através da realização de testes. São sinais que foram adquiridos devido à realização proposital de um defeito na linha de transmissão.

O segundo grupo, obviamente, foi o de maior interesse para a análise dos sinais, pois sabendo o tipo de defeito provocado e tendo gravado o sinal resultante correspondente, foi possível montar um banco de dados para a posterior utilização do software de identificação de defeitos.

Desta maneira faz-se necessária uma descrição dos tipos de testes realizados na linha de transmissão.

A. Tipos de Testes

Os tipos de testes realizados na linha de transmissão podem ser descritos da seguinte forma:

- Teste do garfo: teste no qual, através da utilização de um garfo, um ou mais isoladores de uma cadeia são curto-circuitados, conforme mostrado na Figura 6;
- Troca de isoladores: teste no qual uma cadeia de isoladores danificada é substituída por uma cadeia em perfeitas condições;
- Abertura de disjuntor: teste no qual o disjuntor da barra de transferência da linha de transmissão é aberto;

- Fechamento de disjuntor: teste no qual o disjuntor da barra de transferência da linha de transmissão é fechado;

Dentre estes quatro tipos, o teste que apresentou maior ocorrência foi o teste do garfo, devido a sua simplicidade de realização.

A partir da realização destes testes foi possível definir padrões de correlação entre o defeito forçado e a perturbação resultante no sinal adquirido, como será descrito no item V.

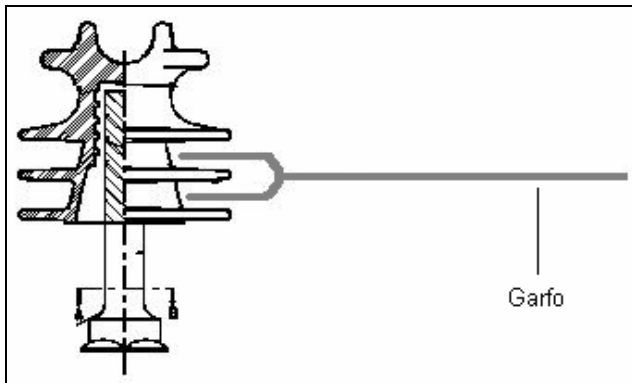


Figura 6. Teste do Garfo.

B. Sinais Adquiridos

A título ilustrativo, as figuras 7, 8 e 9 mostram os sinais adquiridos, respectivamente, através dos testes do garfo, de abertura de disjuntor e de fechamento de disjuntor. Vale enfatizar que o sinal azul é adquirido da fase A e o verde da fase C.

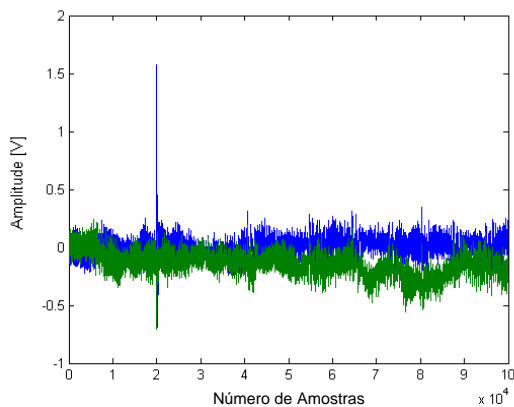


Figura 7. Teste do Garfo.

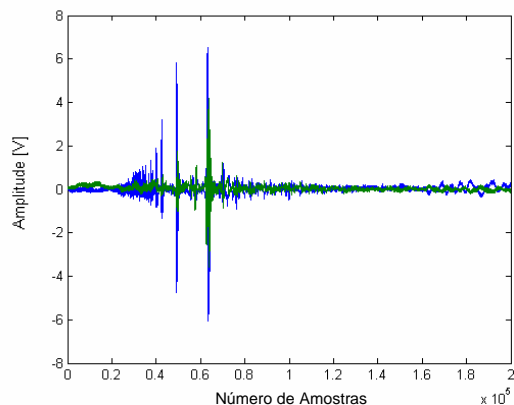


Figura 8. Teste de abertura de disjuntor.

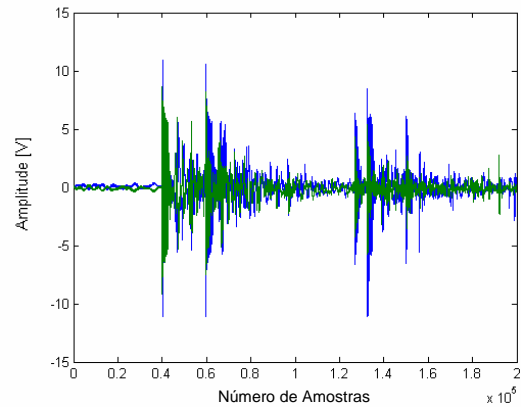


Figura 9. Teste de fechamento de disjuntor.

V. ANÁLISES DOS SINAIS ADQUIRIDOS

A partir da aquisição dos sinais em campo, foi possível construir um banco de dados, no qual, constam sinais de monitoração e de testes, realizados ao longo do período de medição.

De posse dessa massa de dados, a análise se torna possível e necessária. Ainda que seja prevista a realização de mais testes, atualmente tem-se a capacidade de trabalhar com os sinais já obtidos, bem como a capacidade de extrair de algumas conclusões a respeito de cada situação.

Neste item é abordado o processo de análise dos sinais, bem como as conclusões que já foram obtidas.

A. Critérios Utilizados

Procurou-se extrair o maior número possível de características, com o objetivo de estabelecer as particularidades de cada sinal adquirido, ou seja, extrair as características que diferenciam um sinal do outro. Deste modo, fica possível a comparação entre quaisquer sinais.

Para atender esta necessidade, foi elaborado um relatório padrão, no qual entre outras informações sobre cada sinal em questão, pode-se destacar:

- Valores RMS do sinal e da portadora;
- Valores SNR do sinal e da portadora;
- Forma de onda do sinal e da portadora;
- Faixas de frequências mais significativas;
- Valor eficaz do ruído e faixas de frequência da descontinuidade;
- Forma de onda do espectro de frequências e da saída do filtro IIR passa alta;
- Formas de onda dos filtros passa baixa e passa alta da Wavelet, referentes a vários níveis de decomposição, bem como as faixas de frequências associadas. Foram utilizadas as wavelets-mãe db2 e db4, devido aos melhores resultados obtidos.

A estratégia foi, então, gerar para cada sinal desejado um relatório com todas as informações citadas acima. Foram inicialmente selecionados os sinais que apresentaram descontinuidades mais evidentes, bem como alguns sinais de referência. Os sinais de referência são aqueles adquiridos

sob situações normais de operação da linha de transmissão, em um período próximo ao dos sinais com a presença de descontinuidades evidentes.

Desta forma, foram feitos relatórios para um grande número de sinais. Em termos práticos, o subitem seguinte, tem por objetivo mostrar apenas os resultados obtidos para alguns dos principais sinais em questão, mais precisamente, tem por objetivo realizar a comparação entre sinais com (sinais de referência) e sem defeito (sinais de testes).

B. Comparação dos Sinais Com e Sem Defeito

Este item tem por objetivo comparar os resultados obtidos na análise de sinais que indicam a normalidade do sistema com sinais obtidos a partir de condições de defeito.

O sinal de defeito foi obtido a partir da realização de um teste do garfo em uma cadeia de isoladores localizada a 500 m da subestação de monitoração.

Inicialmente pode-se fazer uma comparação entre valores eficazes do ruído e relações sinal-ruído.

Tabela 1. Comparativo entre os sinais sem Distúrbios e com Distúrbios.

	Sinal sem distúrbio.	Sinal com distúrbio.
Valor eficaz do ruído [V]	0,013705	0,015651
Valor eficaz do ruído branco [V]	0,013705	0,013757
SNR do sinal [dBm]	26,016	21,880

Os valores eficazes do ruído branco foram obtidos a partir da idéia de comparar os ruídos brancos dos sinais, ou seja, comparar a intensidade do ruído que é devido ao comportamento normal do sistema. Isto foi feito substituindo as amostras que formam a descontinuidade por outras normais do mesmo sinal.

Pode-se notar, a partir desta sistemática, que o valor eficaz do ruído branco do sinal com distúrbio se aproxima bastante do valor do sinal sem distúrbio. Já o valor eficaz do ruído do sinal com distúrbio, apresentou uma diferença significativa com relação ao valor do sinal sem distúrbio. Isto leva à conclusão de que um curto-circuito de um isolador em uma cadeia de isoladores provoca um aumento do valor eficaz do ruído do sinal.

Da mesma maneira, pode-se observar que ocorre uma diminuição da relação sinal ruído, que pode estar relacionada à ocorrência do defeito, uma vez que o ruído branco manteve um valor eficaz constante.

Em outras palavras, o rompimento de um isolador de uma cadeia de isoladores a 500 [m] do ponto de medição diminui a relação sinal ruído tanto do sinal quanto da portadora.

Através das Figuras 10 e 11, pode-se observar a diferença na resposta do filtro entre o sinal de monitoração e o sinal de teste. Pode-se, ainda, concluir que o rompimento de um isolador provoca este tipo de diferença no sinal filtrado.

Ainda neste campo, através da utilização de filtros digitais IIR, é possível fazer uma análise da distribuição do ruído pelas faixas de frequência. A Tabela 2 mostra os valores de porcentagens lado a lado.

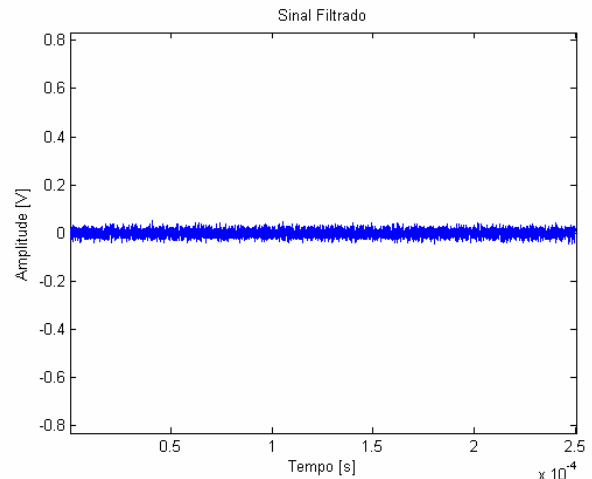


Figura 10. Sinal filtrado sem distúrbios.

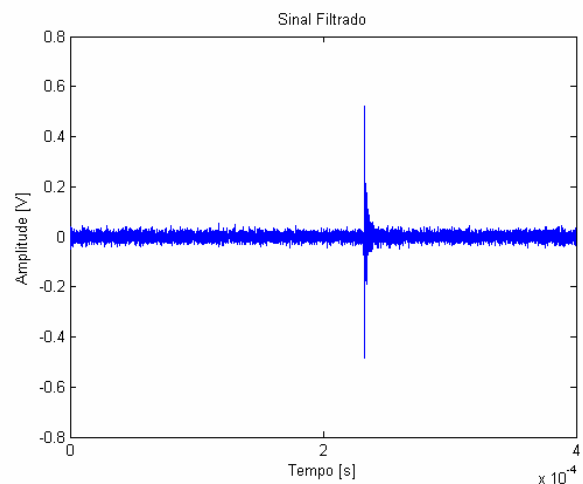


Figura 11. Sinal filtrado com distúrbios.

Tabela 2. Distribuição em Porcentagem do ruído na filtragem dos sinais.

Freq. Corte Inferior [MHz]	Freq. Corte Superior [MHz]	Porcentagem sem distúrbio [%]	Porcentagem com distúrbio [%]
0,6	1	11,7358	13,6406
1	2	7,3509	37,6461
2	3	8,0912	23,3037
3	4	8,8738	3,2049
4	5	8,0119	2,9988
5	6	7,7608	2,5649
6	7	8,2765	2,1006
7	8	8,8337	3,7380
8	9	8,0036	3,6807
9	10	7,4531	3,2705
10	11	7,7780	1,3067
11	12	7,8308	2,5444

É importante lembrar que a porcentagem das colunas 3 e 4 é obtida em relação à resposta do filtro passa alta na frequência de corte de 0,6 [MHz], e não a partir do sinal como um todo.

Pode se observar a distribuição preponderante do distúrbio na faixa de frequência de 0,6 a 3 MHz. Este comportamento indica uma particularidade muito especial do sinal, podendo ser utilizado futuramente, como parâmetro auxiliar para a definição de padrões de defeitos em linhas de transmissão.

C. Conclusões Possíveis a Respeito da Análise dos Sinais

De posse das análises iniciais dos sinais adquiridos pelo sistema de aquisição de dados, foi possível verificar que acontecem mudanças no comportamento do sinal quando da ocorrência de um teste.

Os esforços têm se voltado para caracterizar estas mudanças, estabelecer padrões que permitam correlacionar as alterações no sinal com os respectivos defeitos na linha de transmissão.

Até o presente momento, é possível saber se a linha está operando sob condições normais ou não, pois, como já dito, foi verificado que acontecem algumas alterações no sinal.

Assim, através de uma rotina computacional, é possível saber pelo sinal que a placa está adquirindo, se está ocorrendo alguma perturbação no sistema ou não.

Para conseguir-se uma definição do tipo de perturbação que está ocasionando as alterações no sinal de portadora, será necessária a realização de mais tipos de testes, bem como um estudo mais aprofundado de cada situação, para que cada tipo de alteração seja relacionada com cada tipo de perturbação.

VI. LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS

A ocorrência de faltas em uma LT tem por conseqüência a propagação de ondas viajantes, a partir do ponto de falta, em ambos os sentidos. Sabe-se que a ocorrência de uma falta causa mais impacto no sistema elétrico do que a ocorrência de um defeito, no entanto, apesar de menos evidente, a perturbação causada pelo defeito pode ser sentida no sinal de onda portadora (alta frequência) e percorrer a linha toda através do sistema PLC. Desta maneira, com base na teoria das ondas viajantes, foi desenvolvido um procedimento para a localização de defeitos.

A. Localização de Isoladores Danificados

Foram adquiridos diversos sinais que revelaram a possibilidade da ocorrência de reflexões das ondas viajantes. Como exemplo, pode-se lançar mão do sinal mostrado na Figura 12, cuja saída do filtro digital IIR é mostrada na Figura 13.

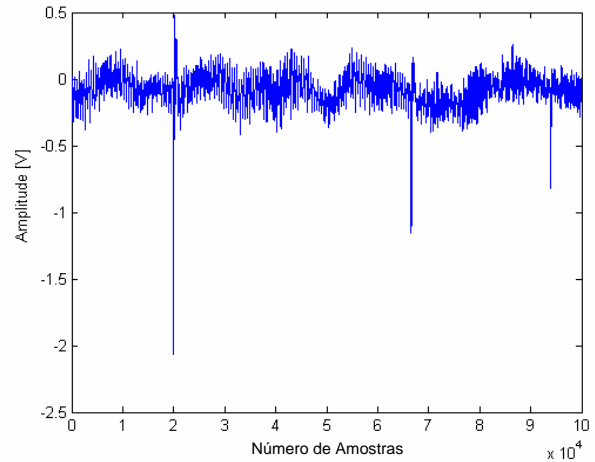


Figura 12. Sinal Adquirido.

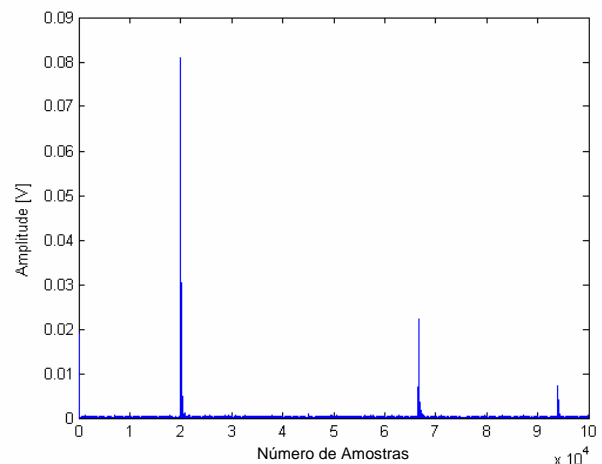


Figura 13. Sinal filtrado.

Pode-se observar a existência de duas reflexões. Calculando-se as distâncias tem-se:

$$d_1 = 40,24 [km]$$

$$d_2 = 0,55 [km]$$

A distância calculada a partir do primeiro pico e da primeira reflexão (segundo pico) d_1 revela a localização do defeito. Por outro lado, a distância d_2 revela que a reflexão seguinte ocorreu extremamente próxima ao terminal de monitoração, uma vez que o resultado se aproximou bastante de 0 km.

Durante a inspeção, constatou-se a presença de dois isoladores danificados da fase C a uma distância de 40,891 km.

B. Localização de Rompimento de Cabo

Um outro sinal adquirido durante a monitoração da linha de transmissão foi correlacionado a uma falta que ocorreu devido ao rompimento do cabo da fase B.

Analogamente ao caso anterior foi identificada a ocorrência de reflexões de ondas viajantes com amplitude bem definida e suficiente para análise e cálculo da localização do defeito.

Este sinal adquirido é mostrado na Figura 14.

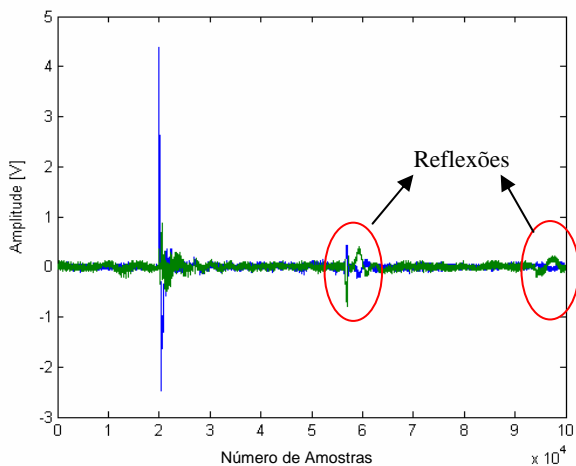


Figura 14. Sinal adquirido pelo rompimento do cabo.

A distância calculada para este caso foi de 1,5 km, sendo que o defeito ocorreu a 0,8 km do terminal de monitoração.

VII. SOFTWARE DESENVOLVIDO

Para efetuar a localização de defeitos em linhas de transmissão foi desenvolvida uma rotina computacional. Rotina esta capaz de informar a possível distância da ocorrência, a partir do sinal adquirido pela placa de aquisição de dados.

A estrutura deste programa fica melhor explicada através da apresentação do fluxograma na Figura 15.

A algoritmo desenvolvido parte da aquisição dos sinais carrier pela placa de aquisição de dados.

De posse dos sinais é realizado um procedimento de filtragem, com o objetivo de evidenciar as discontinuidades do sinal, ou seja, os picos de reflexão de ondas viajantes. Essa filtragem pode ser realizada através da transformada wavelet ou de filtros digitais IIR. A escolha entre estas técnicas é dependente da vontade do usuário.

Espera-se que a onda viajante trafegue do ponto de defeito até o ponto de medição, reflita neste último e volte para o ponto de defeito, reflita novamente e volte até o ponto de medição. Desta forma é possível identificar os picos de reflexão das ondas viajantes no terminal de medição, através do sinal filtrado.

Identificados os picos de reflexão, parte-se para a determinação dos instantes de ocorrência das reflexões, em outras palavras, o intervalo entre as duas reflexões.

Possuindo esse intervalo de tempo, e conhecendo os parâmetros da linha de transmissão, a ponto de determinar a velocidade de propagação das ondas viajantes, é possível calcular a distância de ocorrência do defeito.

VIII. CONCLUSÃO

Este trabalho esteve focado no desenvolvimento de programas para o auxílio da análise de sinais, na busca de outras técnicas pertinentes ao tipo de análise aplicada e principalmente nos resultados obtidos a partir do início da análise dos sinais.

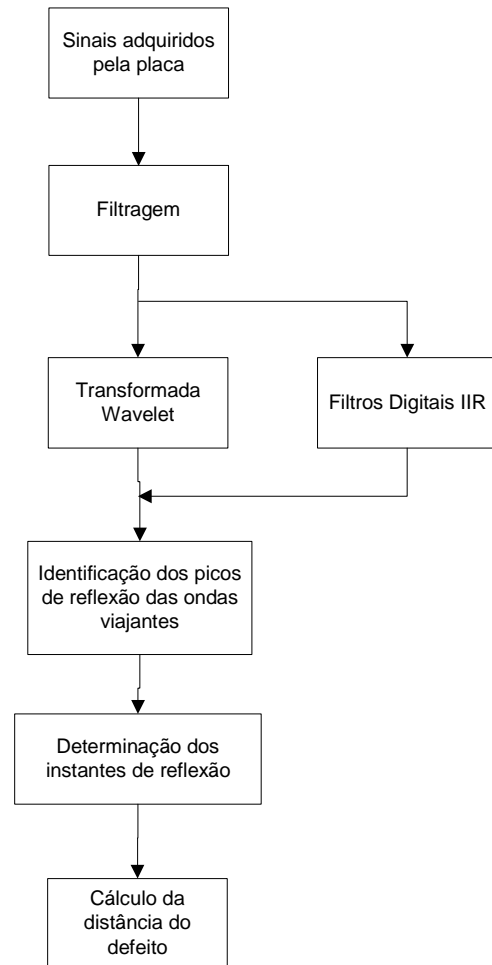


Figura 15. Fluxograma do software desenvolvido.

Sobre o sistema projetado e instalado para aquisição de sinais e as ferramentas desenvolvidas para análise com o objetivo de detectar, identificar e localizar os possíveis defeitos em linhas de transmissão, pode-se concluir que o primeiro objetivo foi executado com êxito, na medida que defeitos simulados foram capturados com sucesso em todos os testes executados. O segundo, identificação dos defeitos, também teve resultados satisfatórios através do uso de redes neurais, permitindo a identificação dos defeitos já correlacionados através dos testes executados, só não são mais conclusivos em função do pequeno número de amostras utilizadas para o treinamento da rede. Já o terceiro, localização de defeitos, apresentou bons resultados, com boa exatidão de localização, quando da existência de reflexões de ondas viajantes. Fato este que ocorreu em algumas situações de cadeias de isoladores quebrados onde o sistema detectou e capturou os sinais. Em análise off-line o defeito foi localizado e, posteriormente, confirmado pela inspeção em campo. Ainda, na ocorrência de falta (rompimento de cabo) ficou caracterizada a reflexão da onda viajante, e pode-se localizar o defeito com precisão melhor que nos casos anteriores, menor que 1% do comprimento da linha.

Como dito anteriormente, os resultados até o presente momento são suficientes para concluir sobre a normalidade na operação da linha e a causa do defeito, e ainda são bem promissores no que diz respeito a conclusões futuras, devido

à realização de novos tipos de testes e ao constante aprimoramento e implementação de técnicas de tratamento de sinais.

Objetiva-se para a continuidade do trabalho de pesquisa a realização de um maior número de testes e conseqüentemente a busca do maior número possível de conclusões a respeito da interferência no sinal de portadora, provocada por defeitos em linha de transmissão.

REFERÊNCIAS

- [1] P. G. Lang, D. M. Allan, Y. Zhou, "The investigation of insulation defects in transmission line disc insulators using remote detection techniques", Proc. of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, July, 1995, Australia.
- [2] C. R. Li, Q. Shi, Y. C. Cheng, "A technique on detecting faulty insulator strings on ground", High Voltage Engineering Symposium, Aug 1999.
- [3] S. Birlasekaran, H. J. Li, "Detection of faulty insulators on power transmission line, IEEE 0-7803-5935-6/2000.
- [4] Westinghous Electric Corporation, Electrical transmission and distribution reference book, 1964.