



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

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - V

**GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO
EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC**

**COMPARAÇÃO DE ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO DE UMA E DUAS PONTAS POR IMPEDÂNCIA COM O
MÉTODO DE ONDAS VIAJANTES EM REGISTROS REAIS**

Sergio Luiz Zimath*

**Carlos Alberto Dutra
REASON TECNOLOGIA S.A.**

Conrado Seibel

Marco Antônio Fernandes Ramos

**Jayme Evaristo da Silva Filho
FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.**

RESUMO

A desregulamentação do mercado tem mudado a forma com a qual empresas de transmissão de energia gerenciam suas linhas, pelo fato de que neste novo ambiente, elas são remuneradas pela disponibilidade das suas linhas e não pela quantidade de energia que transmitem. Neste modelo, as empresas de transmissão são então penalizadas proporcionalmente ao tempo que suas linhas não estão disponíveis para o sistema. Este artigo visa mostrar como o tempo de localização de uma falta pode ser significativamente reduzido usando a tecnologia de ondas viajantes comparando-a com métodos por impedância, melhorando assim o desempenho das linhas de transmissão.

PALAVRAS-CHAVE

Localização de Falhas, Ondas Viajantes, Linhas de Transmissão

1.0 - INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta a tecnologia de localização de faltas pelo método de ondas viajantes e também os primeiros resultados de um sistema instalado em Furnas, em uma linha de transmissão de 500 kV, com 248,6 km de extensão e que possui compensação em série. Os resultados obtidos com este sistema são comparados com os resultados obtidos considerando o método por impedância de uma ponta e duas pontas.

O sistema foi instalado no Circuito 2, da linha de transmissão de Samambaia-Serra da Mesa, que está em vermelho na Figura 1 a seguir.

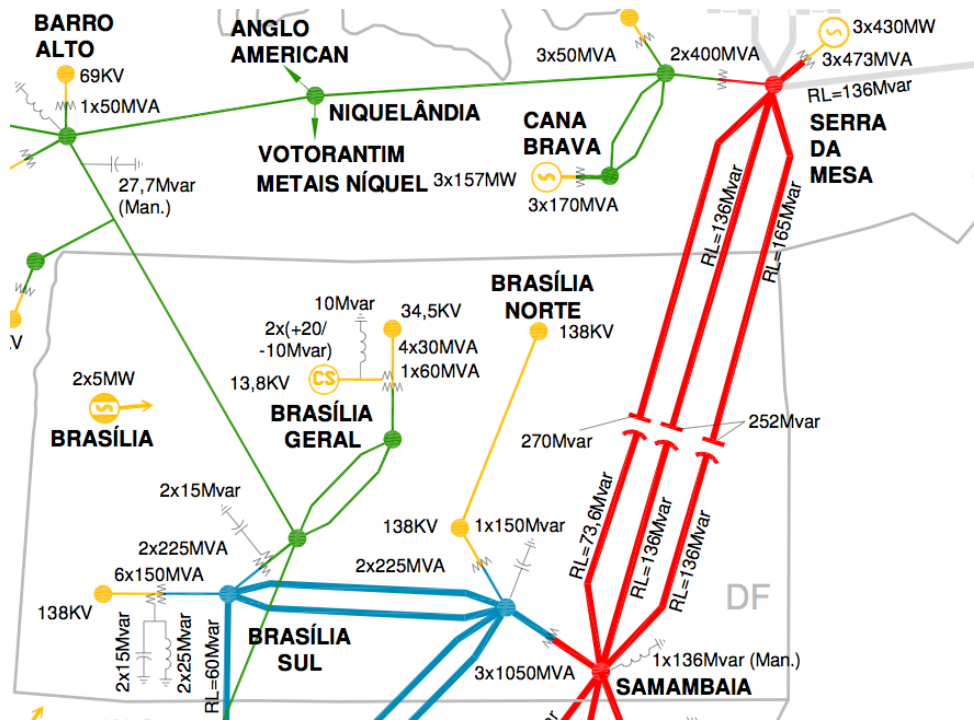


FIGURA 1 – Linha de transmissão de Serra da Mesa-Samambaia.

Este sistema foi instalado como uma demonstração tecnológica em Furnas, já que não havia muita experiência anterior com esta tecnologia de localização de falta no Brasil, e incentivado pelo fato das empresas de transmissão serem agora penalizadas pelo tempo que as linhas não estão disponíveis.

Esta linha de transmissão foi selecionada por apresentar um número elevado de atuações da proteção, ser uma linha longa e possuir compensação série, o que torna muito difícil a localização de faltas precisa pelos métodos de impedância tradicionais.

Ela também tem uma particularidade, pois se localiza na mesma região de um pássaro chamado "Curicaca", visto na Figura 2, que é regularmente encontrado apoiado nas torres.

O excremento deste pássaro é a principal causa de falhas nesta linha, geralmente quando ocorre notamos excremento em cima da cadeia de isoladores. Embora a maioria das vezes essas faltas não sejam permanentes, com religamento com sucesso, essas faltas podem tornar-se permanente em algum momento no futuro, devido às pequenas fissuras criadas nos isoladores causadas por arcos elétricos formados durante uma falta transitória.

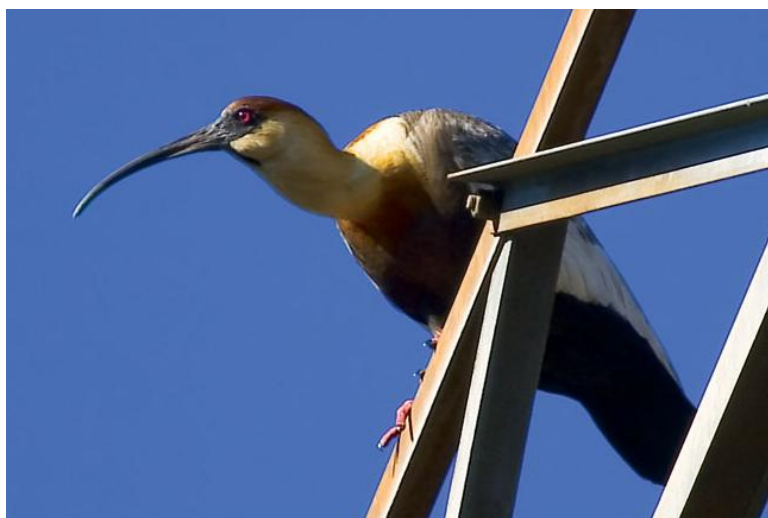


FIGURA 2 – Curicaca apoiada na estrutura de uma torre.

2.0 - LOCALIZADOR DE FALTAS POR ONDAS VIAJANTES

O sistema de localização da faltas por ondas viajantes é composto de 2 equipamentos, um em cada ponta da linha e recebem sinais de tensão das três fases da linha através de um TP, ambos equipamentos são sincronizados com um relógio GPS de forma a marcar o exato momento em que a frente de onda é chega em cada terminal.

Este método apenas utiliza as informações do comprimento da linha (l), da constante de propagação da onda viajante para a linha(k) e a diferença de tempo de chegada de cada onda viajante nas pontas da linha ($t_a - t_b$).

A equação utilizada para calcular a posição da falta é a seguinte:

$$d = \frac{l + kc(t_a - t_b)}{2} \quad (1)$$

Quando comparamos com o método de impedância, a primeira diferença que pode ser observada é a ausência de informações dos parâmetros da linha relacionados com a frequência nominal de 60Hz ou 50Hz.

Na verdade, a primeira operação que é feita na localização de faltas baseada no método de ondas viajantes, é a filtragem do conteúdo de frequência nominal a fim de eliminá-lo, aplicando um filtro passa-alta.

É importante notar a diferença entre o comprimento da linha e o comprimento do cabo, pois normalmente as informações sobre o comprimento da linha são compostas pela distância geográfica entre todas as torres da linha, informação suficiente para os métodos de impedância.

Mas pelo princípio de ondas viajantes, deve-se realmente medir o comprimento do cabo considerado na equação, levando em conta a curva catenária que é criada no cabo devido ao projeto mecânico e também o cabo que vai do TP até o equipamento localizador de faltas.

A Figura 3 mostra o comprimento de linha que é normalmente utilizado, composto pela soma das distâncias entre todas as torres de uma linha de transmissão.

Normalmente, nem mesmo a ligação entre a última estrutura e o barramento é considerada, já que o comprimento desta ligação não faz uma grande diferença em relação ao comprimento total da linha e assim, não resulta num problema de distância para relés de proteção que são projetados para trabalhar por zonas e não exatamente pela distância em relação a falta.

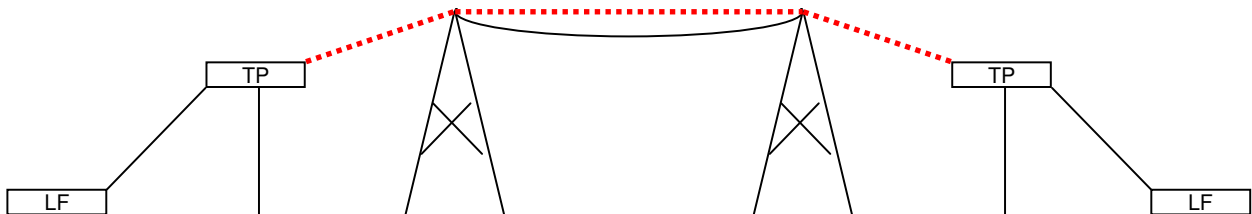


FIGURA 3: Comprimento do cabo pelo método de impedância.

Por outro lado, espera-se de localizadores de falta por ondas viajantes resultados com erros na ordem de algumas centenas de metros no máximo.

Neste caso, se faz necessário considerar todo o comprimento do cabo que é conectado entre os dois localizadores de falta, incluindo o cabo que vai do TP até os terminais do localizador de faltas.

Verificou-se comprimentos de cabo de 500 m ou mais percorrendo do TP ao dispositivo de localização de faltas instalado no painel, e como se trata de um dispositivo com uma precisão de algumas centenas de metros, esta distância de 500 metros fará uma enorme diferença no resultado final.

Desta forma, a distância correta a ser informada ao dispositivo de localização de faltas por ondas viajantes deve ser a soma do comprimento do cabo, além dos cabos internos a subestação como mostra a Figura 4.



FIGURA 4: Comprimento do cabo pelo método de ondas viajantes.

Olhando novamente a equação (1), outra informação importante que deve ser informada ao algoritmo é a velocidade de propagação da onda viajante.

Para linhas de transmissão aéreas este valor é geralmente cerca de 98% do valor da velocidade da luz e para linhas subterrâneas encontra-se em torno de 50% do valor da velocidade da luz.

Este valor pode ser calculado com base nos parâmetros da linha ou medido utilizando o próprio localizador de faltas. Embora os valores calculados estejam próximos do valor real, uma pequena diferença pode ter um grande impacto sobre a precisão, assim, a medida recomendada é a velocidade de propagação.

A medida do valor “real” da velocidade de propagação pode ser feita gerando uma onda viajante com a abertura de um disjuntor, ou com a comutação de um reator shunt da linha, por exemplo.

Uma vez que o comprimento correto do cabo da linha de transmissão é utilizado na equação e como a posição exata do disjuntor ou do reator shunt em relação ao comprimento do cabo deve ser conhecida, é apenas uma questão de ajustar a velocidade de propagação para obter a correta posição do dispositivo.

Quanto a diferença de tempo para a equação (1), esta é obtida pela captura da frente de onda das ondas viajantes geradas pela descontinuidade da energia ocorrida devido a faltas, comutação de um disjuntor, reator shunt ou a proteção de capacitores série.

Cada dispositivo funciona através da captação em um buffer circular com uma taxa de amostragem de 5 MHz com aquisição de pontos sincronizados com o sistema GPS.

A banda do filtro passa-faixa do localizador de falta é projetada para captar sinais de 1kHz a 1Mhz, eliminando, assim, completamente sinais de tensão ou corrente em frequência nominal.

O registro que é capturado na taxa de amostragem de 5MHz é geralmente zero, enquanto o sistema está em condições normais e só apresenta um valor quando há um evento no sistema.

A Figura 5 e a Figura 6 mostram os registros de uma falta registrada que ocorreu em 22/04/08 a partir de ambos os lados da linha de transmissão.

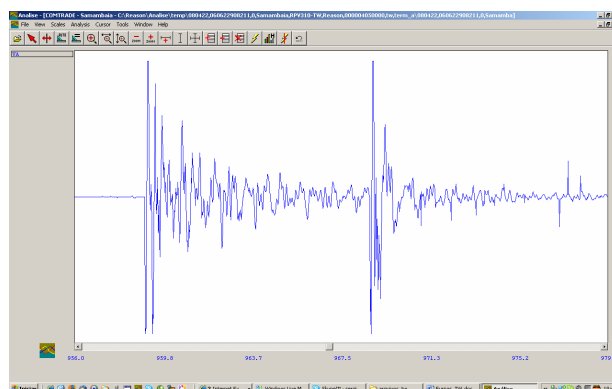


FIGURA 5: Onda viajante capturada no terminal de Samambaia.

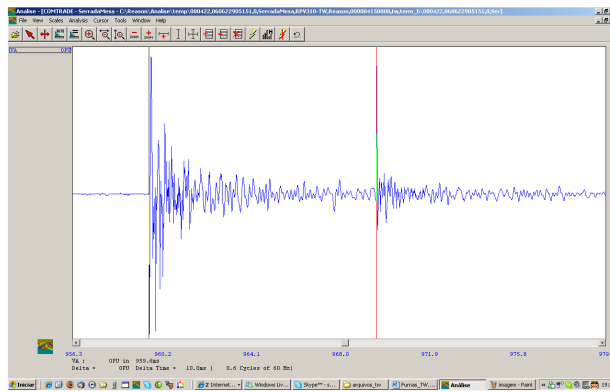


FIGURA 6: Onda viajante capturada no terminal de Serra da Mesa.

Em ambas as figuras, é possível ver que duas ondas viajantes foram capturadas espaçadas entre si em aproximadamente 10ms. Isto é devido à atuação da proteção de by-pass que ocorreu em torno de 10 ms após o início da falta, visando evitar uma sobretensão no capacitor série.

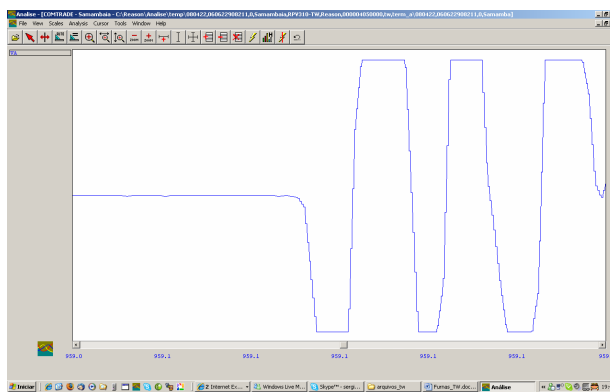


FIGURA 7: Detalhe da frente de onda capturada.

A Figura 7 mostra um zoom da frente de onda capturada onde é possível ver que a o range de medição não capturou os extremos da frente de onda da onda viajante, visto que o pico foi muito elevado. Isto no entanto não apresenta problema visto que não é a forma da onda, mas o instante inicial de chegada a informação mais importante.

A Figura 8 mostra um registro de falta, juntamente com o registro em alta velocidade a partir do momento da falta, onde é possível ver que as duas descontinuidades na tensão ocorreu em menos de um ciclo.

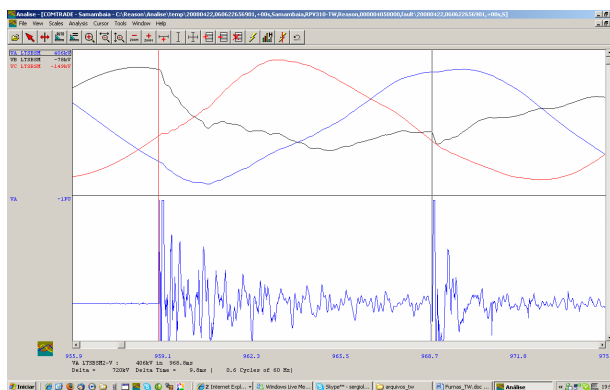


FIGURA 8: Registro de falta padrão e frente de onda.

Outro ponto importante relacionado ao dispositivo de localização de faltas por ondas viajantes é que eles não podem ser testados baseados no conjunto de testes padrão, pois normalmente a frequência máxima que pode ser reproduzida por malas de teste é de cerca de 1000Hz, valor abaixo das frequências de ondas viajantes.

Isto significa que os dispositivos não podem ser testados durante o comissionamento usando testes padrão. A única forma é efetivamente medir uma onda viajante gerada por um equipamento instalado em uma posição conhecida na linha, como um disjuntor, comutador ou reatores, por exemplo.

3.0 - RESULTADOS

Localização de faltas pelo método de impedância é a tecnologia mais conhecida e utilizada quando se fala em encontrar a posição de uma falta numa linha de transmissão.

Existem duas classes de algoritmos por impedância diferentes que podem ser usados para localizar uma falta pelo método de impedância: algoritmo por uma ponta e por duas pontas.

Há uma série de artigos publicados que descrevem as desvantagens de utilizar o algoritmo por uma ponta para localização de faltas devido ao fato de que parte da informação, a contribuição do outro lado da falta, é por diferentes formas não considerada na equação, a fim de tornar possível a localização da falta utilizando apenas as informações de tensão e correntes de um lado da linha.

Por outro lado, o algoritmo por duas pontas é menos propenso a erros já que se utiliza todas as informações disponíveis. Embora isso não melhore significativamente a precisão na localização da falta, irá apresentar uma solução muito mais estável que a encontrada pelo algoritmo por uma ponta, pois a principal razão para os erros vem do TP, TC e dos erros dos parâmetros da linha.

Mas em ambos os casos, a precisão da localização da falta ainda é relativa ao comprimento da linha, e oscila entre um erro de $\pm 1\%$ do comprimento da linha a em torno de $\pm 5\%$ na maioria dos casos. Para uma linha de transmissão como a apresentada neste artigo, com 248 km, teria-se ± 24 km de extensão de linha para ser averiguada pelos responsáveis da linha, a fim de encontrar a falta.

A Tabela 1 seguinte apresenta uma comparação dos erros apresentados utilizando algoritmo por uma ponta a partir do software de análise da Reason Tecnologia, algoritmos por uma e duas pontas a partir de software de Furnas Centrais Elétricas e da primeira falta localizada pelo localizador de faltas por ondas viajantes instalado em Furnas.

Tabela 1: Comparação de diversos algoritmos para a mesma falta.

	Samambaia		Serra da Mesa	
	Km	Erro	km	Erro
Posição real	41,9	-	206,6	-
Localizador de faltas por ondas viajantes	42,3	0,2%	206,2	0,2%
Algoritmo por uma ponta - Reason	32,2	3,9%	183,7	9,2%
Algoritmo por uma ponta - Furnas	31,5	4,2%	188,9	7,1%
Algoritmo por duas pontas - Furnas	30,4	4,7%	218,2	4,7%

É importante notar que, embora a linha de transmissão seja compensada em série, o que provoca frequências sub-síncronas durante as faltas, o dispositivo de proteção do compensador (by-pass) atuou muito rápido e as informações fasoriais usadas para localizar a falta pelos métodos de impedância foram obtidas apenas da frente de onda após a estabilização dos fasores em falta.

Além disso, tem-se que os pequenos erros obtidos no Quadro 1 pelos métodos de impedância são consequência de uma "melhor escolha" do instante para extrair os fasores a fim de reduzir os erros.

A Tabela 2 abaixo resume os resultados das primeiras faltas que ocorreram na linha de transmissão após o localizador de faltas por ondas viajantes ter sido instalado.

Tabela 2: Posição real e a indicada pelo localizador de faltas por ondas viajantes.

Data	Posição indicada (km)	Posição real (km)
22/04/08	206,26	206,64
21/05/08	206,26	206,64
03/06/08	121,9	121,6
07/06/08	122,04	121,6
27/09/08	213,25	213,68
01/10/08	197,45	197,5
07/10/08	196,19	197,5
10/10/08	138,23	140,07

20/10/08	140,58	140,07
30/10/08	145,51	144,35
01/11/08	145,48	144,35
11/11/08	201,27	201,14
11/11/08	138,26	137,5

Ocorreram diversas faltas onde o pessoal da manutenção da linha apenas encontrou as mesmas após ocorrer a segunda falta na mesma posição, já que a proteção atuou de forma a refechar a linha com sucesso e o pessoal da manutenção da linha apenas foi mandado ao local da falta depois da segunda falta na mesma posição.

4.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho mostra uma efetiva comparação entre diferentes métodos para localização de faltas incluindo o método por ondas viajantes para uma falta real ocorrida em uma linha de transmissão.

Já há uma razoável quantidade de faltas com uma precisão consistente, indicando a repetibilidade dos resultados.

A equipe de manutenção da linha foi capaz de encontrar uma falta indo diretamente para o ponto indicado pela equipamento de localização de faltas por ondas viajantes, reduzindo desta forma o tempo total necessário para localizar e resolver o problema na linha.

A precisão obtida pelo método de ondas viajantes é muito maior do que a precisão obtida por qualquer método de impedância e pode ser utilizado em qualquer linha de transmissão, incluindo linhas com compensação série, linhas paralelas e até mesmo em linhas de corrente contínua, obtendo a mesma precisão.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) nt0802-pt rev 3.2 - Traveling waves fault location – Technical note, Reason Tecnologia.
- (2) nt0805-pt rev 1.1 – Experimental traveling wave line parameter determination – Technical note, Reason Tecnologia.
- (3) “IEEE guide for determining fault location on AC transmission and distribution lines,” New York, jun. 2005.
- (4) Fault location errors in transmission lines with one and two side algorithms, XII Eriac, 2007

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Sergio Luiz Zimath nasceu em Joinville, Santa Catarina, em 23 de dezembro de 1971. Formado em Engenharia de Controle e Automação em 1997 na Universidade Federal de Santa Catarina. Tem trabalhado para Reason Tecnologia desde 1995. Responsável pelo desenvolvimento de diversos produtos da Reason, tais como RT1000 e RT2000 (relógios GPS), bem como do Registrador Digital de Perturbações RPIV, entre outros. Trabalhou em vários projetos de pesquisa e tem artigos publicados em conferências nacionais e internacionais.

Carlos Alberto Dutra nasceu em 1974 em Florianópolis. Graduiu-se em Engenharia de Controle e Automação na Universidade Federal de Santa Catarina em 1999 e desde 2003 trabalha na Reason Tecnologia S.A., onde atualmente é Gerente de Produto.

Conrado Seibel nasceu em 1962 em Florianópolis. Após se graduar em Engenharia Elétrica trabalhou por 6 anos na Mercedes Benz na Alemanha. É doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina. Trabalha na Reason Tecnologia desde 2002.

Marco Antônio Fernandes Ramos nasceu em 1966 no Rio de Janeiro. Graduiu-se em Engenharia Elétrica em 1992 na Universidade Santa Úrsula e obteve o título de mestrado na Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2002. Desde 1993 trabalha em Furnas Centrais Elétricas S.A. onde atualmente trabalha como engenheiro de proteção na Divisão de Proteção e Análise.

Jayme Evaristo da Silva Filho nasceu em 1964 no Rio de Janeiro, RJ. Formou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ em 1988. De 1988 a 2000 trabalhou na General Electric do Brasil Ltda. como Engenheiro de Aplicação, Supervisor de Engenharia de Aplicação e Gerente de Engenharia de sistemas de controle e proteção. De 2000 a 2003 trabalhou na Alstom Brasil Ltda., como Gerente de Sistemas e de 2003 a 2004 na ZIV do Brasil Ltda. como Gerente de Vendas. Desde 2004 trabalha em Furnas Centrais Elétricas S/A como Engenheiro Eletricista no Departamento de Estudos Elétricos - Divisão de Análise da Proteção.