

# Localização de Falhas em Relés de Proteção Baseada no Princípio das Ondas Viajantes: Projeto, Testes e Resultados

Stephen Marx

*Bonneville Power Administration*

Brian K. Johnson

*University of Idaho*

Armando Guzmán, Veselin Skendzic e Mangapathirao V. Mynam

*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Apresentado na

16th Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference

Atlanta, Georgia, EUA

6–7 de maio de 2013

Traduzido para o Português em julho de 2016

# Localização de Falhas em Relés de Proteção Baseada no Princípio das Ondas Viajantes: Projeto, Testes e Resultados

Stephen Marx, *Bonneville Power Administration*

Brian K. Johnson, *University of Idaho*

Armando Guzmán, Veselin Skendzic e Mangapathirao V. Mynam, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

**Sumário**—As falhas nas linhas de transmissão de energia causam transitórios que trafegam a uma velocidade próxima da velocidade da luz e se propagam ao longo da linha como ondas viajantes (“traveling waves” – TWs). Este artigo mostra como esses transitórios podem ser medidos em um relé de proteção e usados para melhorar sua função de localização de falhas. A função de localização de falhas baseada em TW implementada em um relé de proteção aproveita as vantagens dos elementos de proteção internos, do canal de comunicação com o terminal remoto e da sincronização dos tempos baseada no Sistema de Posicionamento Global (GPS). Esta abordagem fornece automaticamente uma estimativa precisa da localização da falta nas linhas de transmissão em um tempo de alguns segundos após a falta. O localizador de falhas baseado em TW, interno ao relé, usa medições de transformadores de corrente convencionais e não requer quaisquer considerações de instalações especiais ou fiação adicional. Esses relés detectam falhas internas à linha e usam algoritmos baseados em impedância e TW para otimizar a estimativa e a emissão de relatórios sobre a localização das falhas. Os algoritmos baseados em impedância e TW complementam um ao outro para fornecer uma estimativa precisa da localização da falta para todas as falhas internas, independentemente do ângulo de incidência da falta. Este artigo fornece um tutorial sobre a localização de falhas baseada em TW e descreve um algoritmo de localização de falhas baseado em TW que usa medições com sincronização de tempo das correntes das TWs nos terminais da linha para determinar a localização da falta. A implementação proposta é adequada para terminais de linha com um ou dois disjuntores. O artigo também discute métodos para teste do algoritmo de localização de falhas baseado em TW usando um sistema de reprodução e um modelo de hardware que simula uma linha de transmissão. O trabalho apresenta os detalhes e experiências de uma aplicação de campo desses relés em uma linha de transmissão de alta tensão.

## I. INTRODUÇÃO

A Administração de Energia de Bonneville (“Bonneville Power Administration” – BPA) tem usado a tecnologia das ondas viajantes (“traveling wave” – TW) para efetuar a localização de falhas em seus sistemas de transmissão de extra-alta tensão (EAT) desde a década de 50 [1]. Nos anos 60 e 70, a BPA instalou um sistema automático de localização de falhas que usava comunicações via micro-ondas para enviar as informações de chegada da TW para o terminal remoto visando efetuar a estimativa da localização da falta [2]. As referências [3] e [4] descrevem o desenvolvimento e a avaliação no campo do desempenho de um localizador de falhas digital para linhas de corrente contínua de alta tensão (“High-Voltage Direct

Current” – HVDC), o qual usa as medições de tensão e corrente de um terminal da linha para estimar a localização da falta. Usando medições de corrente e tensão, pode-se calcular as ondas incidentes e refletidas. As aplicações baseadas nas ondas incidentes são imunes aos efeitos causados pelas impedâncias das terminações. Em 1987, a BPA começou a usar as informações de tempo do Sistema de Posicionamento Global (“Global Positioning System” – GPS) para medir a chegada das TWs [5].

Posteriormente, concessionárias como a BPA usaram dispositivos dedicados para localização de falhas baseada em TW, os quais efetuam uma amostragem das correntes ou tensões a taxas de amostragem maiores do que 1 MHz [6]. Alguns desses dispositivos também incluem os registros de perturbações causadas por falhas e têm capacidade para reportar resultados precisos da localização das falhas [7].

Os relés de proteção numéricos incluem algoritmos de estimativa da localização da falta baseados nas medições de tensão e corrente e na impedância da linha. Na maioria das aplicações, esses relés apenas usam medições do terminal local. Alguns relés também usam informações do terminal remoto para estimar a localização da falta. Usando as informações dos terminais local e remoto minimiza os erros devidos ao acoplamento mútuo com linhas adjacentes, à não homogeneidade do sistema e à resistência de falta [8] [9]. Em algumas aplicações, tais como linhas com compensação série, existe um desafio para os métodos de localização de falta baseados em impedância, levando as concessionárias a exigirem uma estimativa mais precisa do que os relés tradicionais oferecem.

Este artigo discute os princípios básicos das TWs, um relé de proteção que estima a localização da falta usando informações das TWs e os benefícios de se ter uma estimativa da localização da falta baseada em TW dentro de um relé de proteção. O artigo também descreve como testar o sistema de localização de falhas via TW usando sinais analógicos com valores baixos de energia e um modelo analógico da linha de transmissão. Além disso, compartilhamos as experiências de campo da instalação de uma linha de transmissão de 161 kV na BPA.

## II. VISÃO GERAL DAS ONDAS VIAJANTES NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Uma falta em uma linha de transmissão gera TWs que se propagam a partir da localização da falta para os terminais da linha com uma velocidade de propagação dependente da indutância e da capacitância da linha. A Fig. 1 mostra o circuito equivalente de um segmento com comprimento  $\Delta x$  de uma linha de transmissão com dois condutores. O circuito inclui a resistência  $R$ , indutância  $L$ , condutância  $G$  e a capacitância  $C$  da linha em ‘por unidade’ do comprimento total da linha [10].

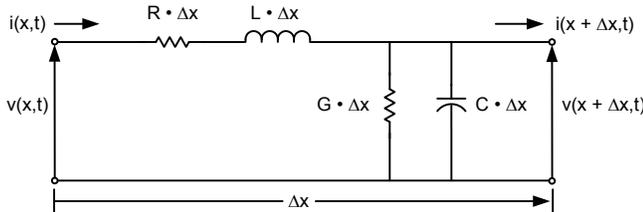


Fig. 1. Circuito equivalente de um segmento de uma linha de transmissão com dois condutores.

Usamos a lei das tensões de Kirchhoff, como mostrado em (1), e a lei das correntes de Kirchhoff, mostrado em (2), para relacionar as tensões e correntes nas localizações  $x$  e  $x + \Delta x$ .

$$v(x, t) = R \cdot \Delta x \cdot i(x, t) + L \cdot \Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + v(x + \Delta x, t) \quad (1)$$

$$i(x, t) = G \cdot \Delta x \cdot v(x + \Delta x, t) + C \cdot \Delta x \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} + i(x + \Delta x, t) \quad (2)$$

As Equações (3) e (4) determinam a tensão e a corrente como uma função de  $x$  e tempo para a linha de transmissão com dois condutores no domínio do tempo à medida que o comprimento do segmento  $\Delta x$  se aproxima de zero.

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -R \cdot i(x, t) - L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -G \cdot v(x, t) - C \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \quad (4)$$

Diferenciamos (3) em relação à  $x$  e (4) em relação à  $t$  para obter (5) e (6), respectivamente.

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = -R \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} - L \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x \partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x \partial t} = -G \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} - C \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} \quad (6)$$

Substituímos  $\frac{\partial i(x, t)}{\partial x}$  de (4) e  $\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x \partial t}$  de (6) em (5) para obter a equação da onda de tensão mostrada em (7).

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} + (RC + GL) \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} + GR \cdot v(x, t) \quad (7)$$

De forma similar, diferenciamos (3) em relação à  $t$  e (4) em relação à  $x$  para obter (8) e (9), respectivamente.

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x \partial t} = -R \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} - L \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = -G \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} - C \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x \partial t} \quad (9)$$

Substituímos  $\frac{\partial v(x, t)}{\partial x}$  de (3) e  $\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x \partial t}$  de (8) em (9) para obter a equação da onda de corrente mostrada em (10).

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2} + (RC + GL) \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + GR \cdot i(x, t) \quad (10)$$

As Equações (7) e (10) determinam de que forma as ondas de tensão e corrente se propagam ao longo de uma linha de transmissão com dois condutores.

Para analisar as TWs de corrente e tensão em linhas de transmissão multifásicas, usamos um Programa de Transitórios Eletromagnéticos (“Electromagnetic Transients Program” – EMTP) que modela as linhas de transmissão considerando as variações na indutância e resistência do condutor devido ao efeito pelicular [11] [12] [13]. A Fig. 2 mostra como as ondas de corrente se propagam através de uma linha de 400 kV em resposta a uma mudança no degrau da tensão nominal da fase A e fase B no terminal de envio (a mudança de degrau ocorre em  $t = 0$ ).

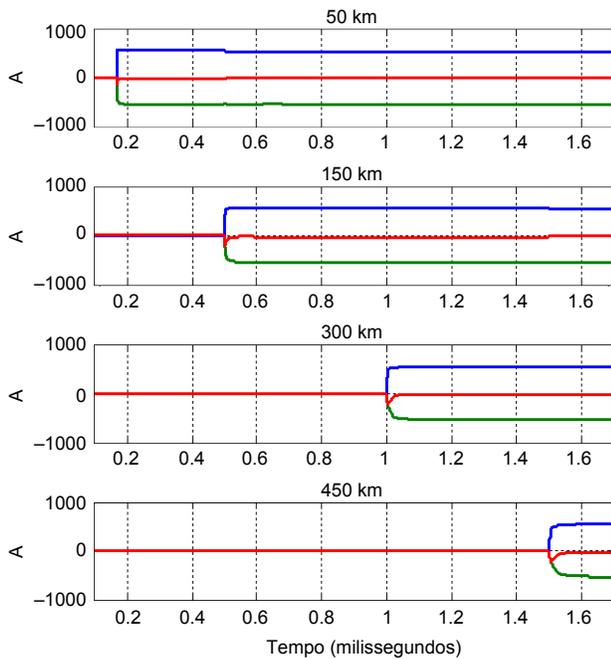


Fig. 2. Ondas de corrente em 50, 150, 300 e 450 quilômetros trafegando em uma linha de 400 kV para uma mudança no degrau da tensão nominal no terminal de envio, com a fase A em verde, fase B em azul e fase C em vermelho.

### III. LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA NAS ONDAS VIAJANTES PARA LINHAS DE DOIS TERMINAIS

A localização de faltas baseada em TW fornece mais precisão quando comparada aos métodos de localização de faltas que usam impedâncias. Os métodos baseados em um terminal (Tipo A) e dois terminais (Tipo D) consistem nos dois métodos computacionais mais comuns de localização de faltas usando TWs [1]. O método Tipo A usa a diferença de tempo entre o instante de chegada da primeira onda e as reflexões sucessivas provenientes da localização da falta para calcular a localização da falta. Este método é atrativo porque só depende de informações locais; portanto, ele não requer um canal de comunicação. Contudo, identificar as reflexões é um grande desafio. As reflexões podem ser provenientes da localização da falta, do terminal remoto ou de um ponto atrás do terminal local. Identificar com precisão a reflexão a partir da localização da falta representa um desafio para a localização da falta baseada em TW em um terminal, especialmente em linhas de transmissão *ac*. O método baseado em dois terminais supera o desafio de identificação das reflexões da falta, mas exige as informações de TW do terminal remoto. Este método Tipo D usa a diferença de tempo entre o instante de chegada das primeiras TWs capturadas em ambos os terminais juntamente com o comprimento da linha e velocidade de propagação da onda para calcular a localização da falta. A Fig. 3 mostra a propagação das ondas para os Terminais A e B após uma condição de falta em uma linha de transmissão.

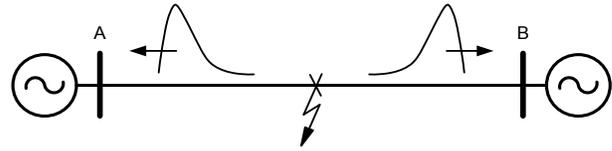


Fig. 3. Propagação das TWs para os Terminais A e B.

Os dispositivos de medição nos terminais da linha detectam as TWs e atribuem estampas de tempo precisas para o instante de chegada da onda usando uma referência de tempo comum (ex., IRIG-B ou IEEE 1588). A precisão típica das estampas de tempo é melhor do que 1 microssegundo. A localização de faltas baseada em TW é calculada usando (11).

$$TWFL = \frac{LL + (T_{waveA} - T_{waveB}) \cdot c \cdot LPVEL}{2} \quad (11)$$

onde:

TWFL é a localização de faltas baseada em TW.

LL é o comprimento da linha.

$T_{waveA}$  é o tempo de chegada da TW registrado no Terminal A.

$T_{waveB}$  é o tempo de chegada da TW registrado no Terminal B.

$c$  é a velocidade da luz.

LPVEL é a velocidade de propagação da TW em 'por unidade' da velocidade da luz.

A velocidade de propagação da TW é um parâmetro essencial no cálculo da localização da falta, sendo normalmente obtido a partir de programas de estimação dos parâmetros da linha. Podemos também estimar a velocidade de propagação usando medições de TW incluindo o seguinte:

- Informações das TWs locais registradas durante testes de energização do reator ou da linha.
- Informações das TWs locais e remotas registradas durante faltas externas.

As medições de corrente e/ou tensão capturam as TWs. A largura de banda de frequência adequada dos transformadores de corrente (TCs) torna as TWs de corrente mais adequadas para esta aplicação do que as TWs de tensão medidas nos terminais secundários do transformador abaixador do Transformador de Tensão Capacitivo (CCVT) [14]. Instalações típicas possuem comunicação entre a subestação e o centro de controle, onde as ferramentas de análise computacionais restituem as informações das TWs capturadas nos terminais da linha e calculam a localização da falta. Neste artigo, discutimos as instalações onde os relés de proteção trocam informações das TWs obtidas a partir das correntes de fase e calculam automaticamente a localização da falta nos terminais da linha num tempo de alguns segundos após a falta.

#### IV. LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA EM TW NOS RELÉS DE PROTEÇÃO

##### A. Benefícios da Localização de Falta Baseada em TW em um Relé de Proteção

Os relés de proteção numéricos incluem a função de estimação da localização da falta baseada nas medições de corrente e tensão e na impedância da linha desde 1982 [15] [16]. Esses relés usam as medições de tensão e corrente coletadas no terminal local e reportam os resultados da estimação da localização da falta na subestação e no centro de controle através de mensagens automáticas logo após a ocorrência de uma falta. Embora esta abordagem forneça estimativas com precisão de 2% do comprimento da linha, há casos onde o acoplamento mútuo, a resistência de falta e a não homogeneidade do sistema podem causar erros relevantes. Nesses casos, os métodos de localização da falta baseados em impedância dos relés de proteção podem ser melhorados usando as medições locais e remotas (dois terminais) [8] [9] [17].

A estimação da localização de faltas baseada em impedância requer a presença da falta durante alguns ciclos para fornecer resultados precisos. Embora este requisito não seja um problema nas aplicações de redes da subtransmissão, ele pode ser um problema nas aplicações de EAT e ultra-alta tensão (UAT), onde as faltas são eliminadas, algumas vezes, em menos de dois ciclos. Além disso, esses métodos de estimação baseados em impedância podem não ser aplicáveis às linhas com compensação série ou linhas próximas com compensação série devido a oscilações subsíncronas, inversão de tensão, e assim por diante. Devido à importância da localização de faltas para evitar repetições de faltas e ao alto custo associado à procura de faltas na linha, as concessionárias exigem dispositivos para uma localização precisa de faltas em todas as aplicações. Por este motivo, algumas concessionárias têm instalado dispositivos dedicados que detectam o tempo de chegada das TWs nos terminais da linha e usam essas informações para estimar a localização da falta [6] [18]. Embora esses dispositivos forneçam uma estimação da localização da falta mais precisa do que os relés que usam métodos baseados em impedância para estimar a localização da falta, há casos em que eles não podem estimar a localização da falta quando a falta ocorre no cruzamento da tensão pelo zero.

Os relés de proteção que incluem ambos os métodos de localização da falta baseado na impedância e baseado em TW têm a vantagem de fornecer a localização da falta mesmo nos casos em que a amplitude da TW é muito baixa para uma detecção confiável (ex., faltas que ocorrem com tensão zero). Nesses casos, os relés estimam a localização da falta usando as medições de corrente e tensão local e remota e a impedância da linha. Se as medições remotas não estiverem disponíveis, o relé estima a localização da falta usando apenas medições locais, proporcionando assim uma resposta robusta com a melhor precisão possível para todas as condições de falta.

##### B. Comunicação entre Relés

O relé discutido neste artigo usa um canal de 64 kbps que efetua a troca de correntes para atender à proteção diferencial. O relé obtém vantagens desta largura de banda e inclui informações da TW dentro do pacote de dados sem afetar o desempenho do elemento diferencial. Os relés trocam os tempos de chegada das TWs (ver Fig. 4) e usam essas informações para estimar a localização da falta, disponibilizar os resultados na localização do relé e enviar os resultados para o centro de controle num tempo de alguns segundos após a ocorrência da falta.

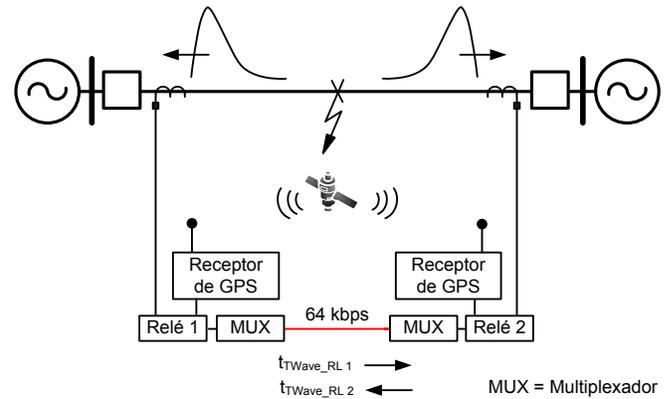


Fig. 4. Os relés trocam o tempo de chegada da TW para estimar a localização da falta em tempo real.

##### C. Medições das Ondas Viajantes

Os transitórios de alta frequência gerados pelas faltas no sistema de potência se propagam a velocidades próximas da velocidade da luz. No entanto, as linhas de transmissão de alta tensão são otimizadas para operar na frequência nominal do sistema de potência com valores padrão de 50 ou 60 Hz, e algumas delas são linhas *dc*. Um esforço significativo de engenharia é feito para reduzir as perdas na linha de transmissão nessas frequências, sem tentar considerar seu comportamento nas altas frequências (0,1 a 1 MHz) que são usadas pelas TWs.

Felizmente, a física associada à construção de linhas de transmissão de alta tensão eficientes ajuda com a propagação das TWs. Por várias razões econômicas, operacionais e ambientais, as linhas de transmissão de alta tensão são construídas como estruturas regulares, com distâncias uniformes entre os condutores de fase, dielétrico uniforme (ar), seção transversal do condutor constante e suporte da torre de transmissão regular, conforme ilustrado na Fig. 5. Devido a todos esses fatores, as linhas de transmissão podem transportar sinais bem dentro da faixa de megahertz. Este fato tem sido usado há muito tempo e pode ser melhor exemplificado através da comunicação baseada em PLC (“power line carrier”) que opera na faixa de 100 a 600 kHz. Além das linhas de transmissão com perdas bem definidas, a localização de faltas baseada em TW é também ajudada pelo fato de as faltas no sistema de potência gerarem uma quantidade significativa de energia na faixa de frequência de interesse. Esta energia fornece níveis de sinais nas extremidades da linha de transmissão suficientes para indicarem a presença de uma falta na linha.

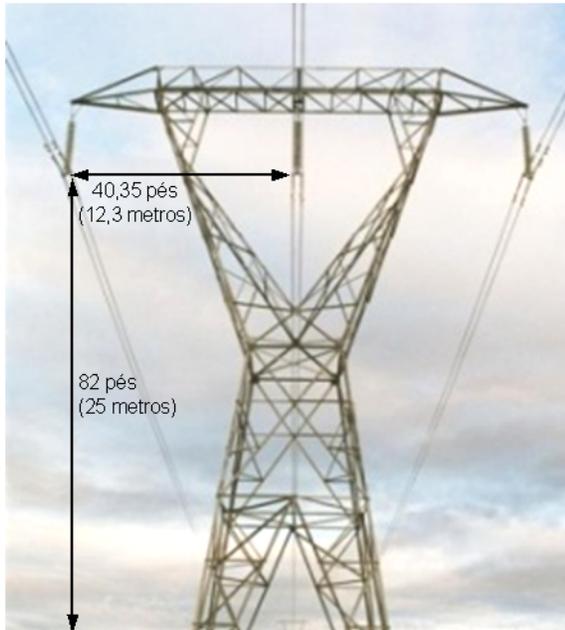


Fig. 5. Torre de transmissão de alta tensão típica.

A chegada das TWs nas subestações com energia suficiente é apenas o pré-requisito inicial para localização com sucesso de faltas baseada em TW. Uma vez que as ondas chegam, elas precisam ser medidas (extraídas das medições de tensão e/ou corrente) e fornecidas para o algoritmo de estimação da localização de faltas. As correntes e tensões na linha de transmissão são medidas usando transformadores de potencial (TPs) e correntes (TCs) padrão. As respostas dos TCs e TPs foram otimizadas para operação na frequência nominal. Os sinais das TWs podem ser medidos usando transdutores de alta frequência específicos similares àqueles usados nos laboratórios de alta tensão, mas o alto custo e a natureza personalizada desses dispositivos fazem com que esta abordagem não seja prática nas aplicações em larga escala das concessionárias.

Sob a perspectiva das concessionárias, seria ideal se o dispositivo de localização de faltas baseada em TW pudesse ser instalado na casa de controle da subestação usando práticas de fiação convencionais. Além disso, é também altamente desejável que o novo dispositivo seja implementado sem a necessidade de uma nova infraestrutura de sincronização de tempo e comunicação. Enquanto estudavam este problema, os autores decidiram começar investigando a resposta de frequência dos transformadores de instrumento convencionais. Os transformadores de medição foram classificados de acordo com as seguintes subcategorias.

Os transformadores de corrente incluem:

- TCs com núcleo de ferro convencionais
- TCs de baixa energia não convencionais
  - TCs ópticos
  - TCs de baixa potência
  - Bobinas de Rogowski

Os transformadores de potencial incluem:

- TPs convencionais
  - CCVTs
  - TPs indutivos
  - TPs baseados em núcleo magnético aberto

- TPs de baixa energia não convencionais
  - Divisores de alta tensão capacitivos, resistivos e compensados
  - TPs baseados no tap da bucha do transformador (divisores capacitivos)
  - TPs ópticos

A comparação das tecnologias disponíveis mostra que as duas opções de escolha mais populares usadas para medições de corrente e tensão nas linhas de transmissão de alta tensão (maior do que 69 kV) são os TCs convencionais (projeto baseado na bucha ou independente) e CCVTs.

A construção dos TCs convencionais é muito simples (um núcleo toroidal com pelo menos um enrolamento secundário). Os TCs convencionais têm boa resposta em alta frequência [19]. Os resultados da medição da largura de banda do TC reportados na literatura variam, mas o consenso comum é que a passa banda utilizável (ponto  $-3$  dB) facilmente atinge 100 kHz [19] e pode frequentemente estar mais perto do nível de 200 kHz [20] ou 500 kHz [21]. As medições efetuadas pelos autores confirmam esses resultados (300 kHz, em nosso caso), com a descoberta adicional de que a largura de banda da medição é inversamente proporcional à relação do TC. Os TCs de baixa relação possuem menos espiras e menor capacitância entre enrolamentos, proporcionando assim uma maior largura de banda. Este efeito é especialmente pronunciado nos TCs de entrada, os quais são normalmente usados para medir as correntes dentro do relé de proteção.

A Fig. 6 ilustra os resultados obtidos usando um gerador de teste em conformidade com IEC 61000-4-5 para injetar um pulso de 2 kA (8 por 20 microssegundos) no primário do TC testado. A montagem do teste incluiu 70 metros de cabo #10 (5,26 mm<sup>2</sup>) conectando o relé de proteção ao secundário do TC.

Os resultados mostrados na Fig. 6 demonstram que o equipamento originalmente construído para operar em 60 Hz funciona muito bem em frequências bem além da faixa do projeto original. A corrente de saída observada nos terminais secundários do TC (o traço do meio) é compatível com a corrente primária medida usando um shunt de alta frequência (o traço superior).

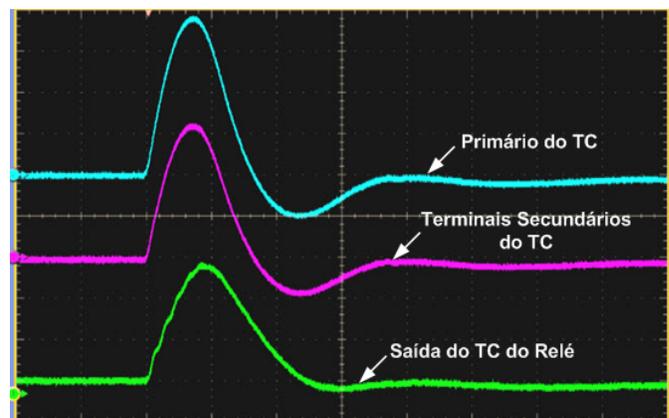


Fig. 6. Uma resposta do TC 600:5 medida usando um transitório de 2 kA com uma forma de onda de uma descarga atmosférica de 8 por 20 microssegundos e 70 metros (230 pés) de cabeamento secundário.

O traço inferior mostra o sinal registrado no secundário do TC de entrada (dentro do relé). A forma de onda registrada é uma representação razoavelmente fiel do sinal primário. Dados obtidos neste e em outros testes foram usados para projetar um circuito de entrada otimizado para aplicações de TW, com a resposta de frequência mostrada na Fig. 7. A resposta é plana até 1 MHz com a atenuação de alta frequência controlada estendendo-se até a faixa de radiofrequência.

A corrente medida pelo relé (ver Fig. 6) tem uma ondulação (“ripple”) adicional. Simulações adicionais confirmaram que

esta ondulação foi contribuída pelo cabo secundário e que este cabo não se comporta como uma linha de transmissão terminada adequadamente. Em uma extremidade, o cabo está conectado ao TC (uma fonte de corrente com uma impedância se aproximando da impedância de uma fonte infinita) e termina em um curto-circuito na extremidade do relé. Esta configuração cria múltiplas reflexões, resultando em múltiplas ressonâncias, conforme descrito em [22]. A frequência da ondulação observada foi consistente com o comprimento do cabo secundário.

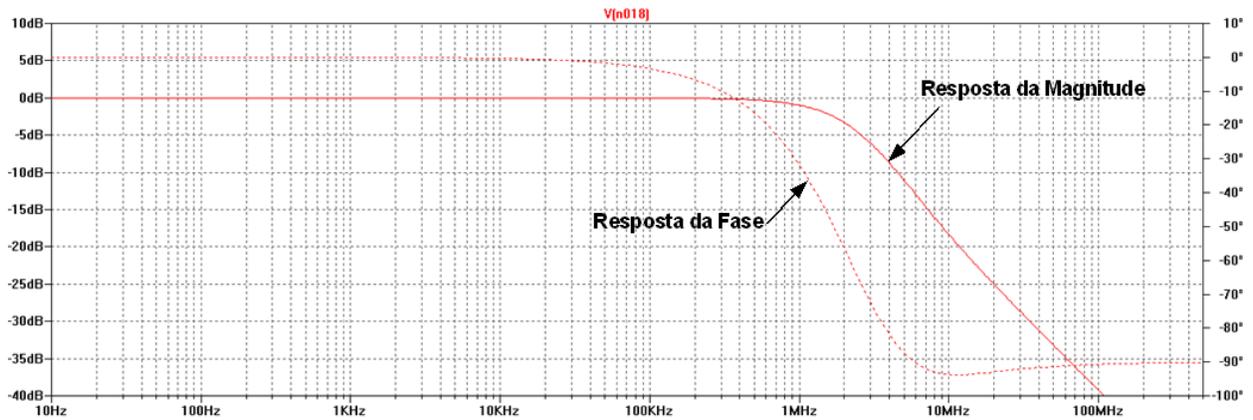


Fig. 7. Resposta da frequência do circuito analógico do relé (excluindo o filtro *anti-aliasing*).

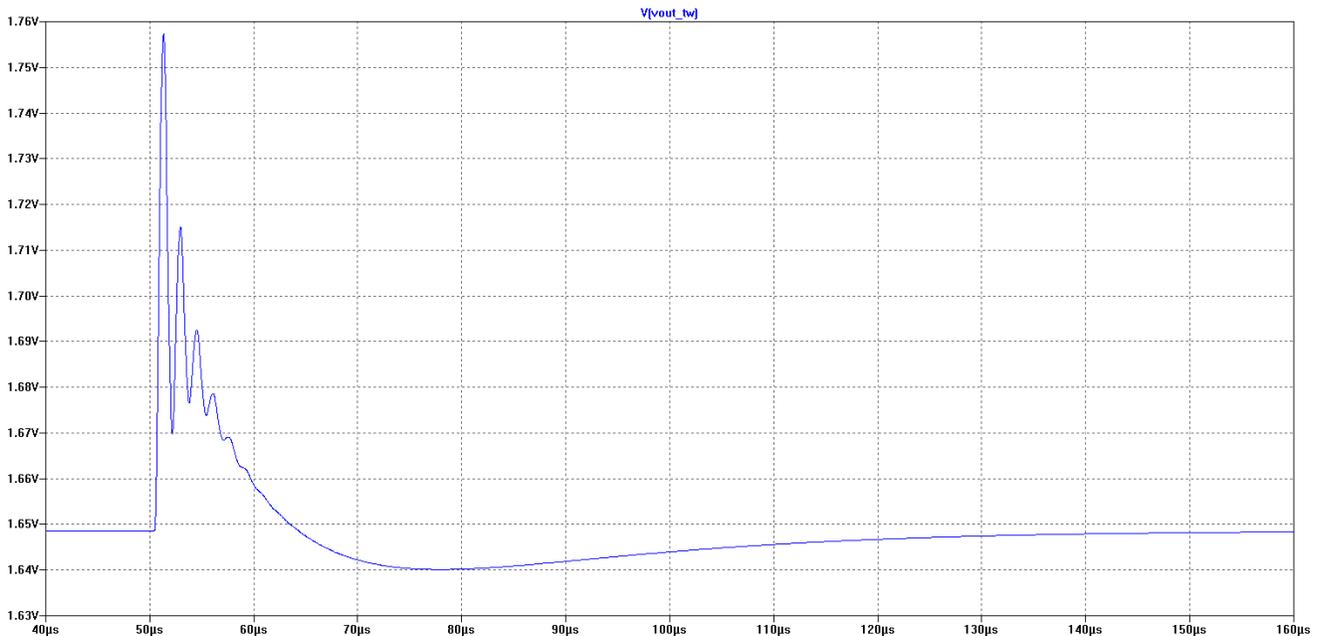


Fig. 8. Simulação LTspice mostrando o *ringing* do sinal de corrente na extremidade do relé causado pela fiação secundária do TC.

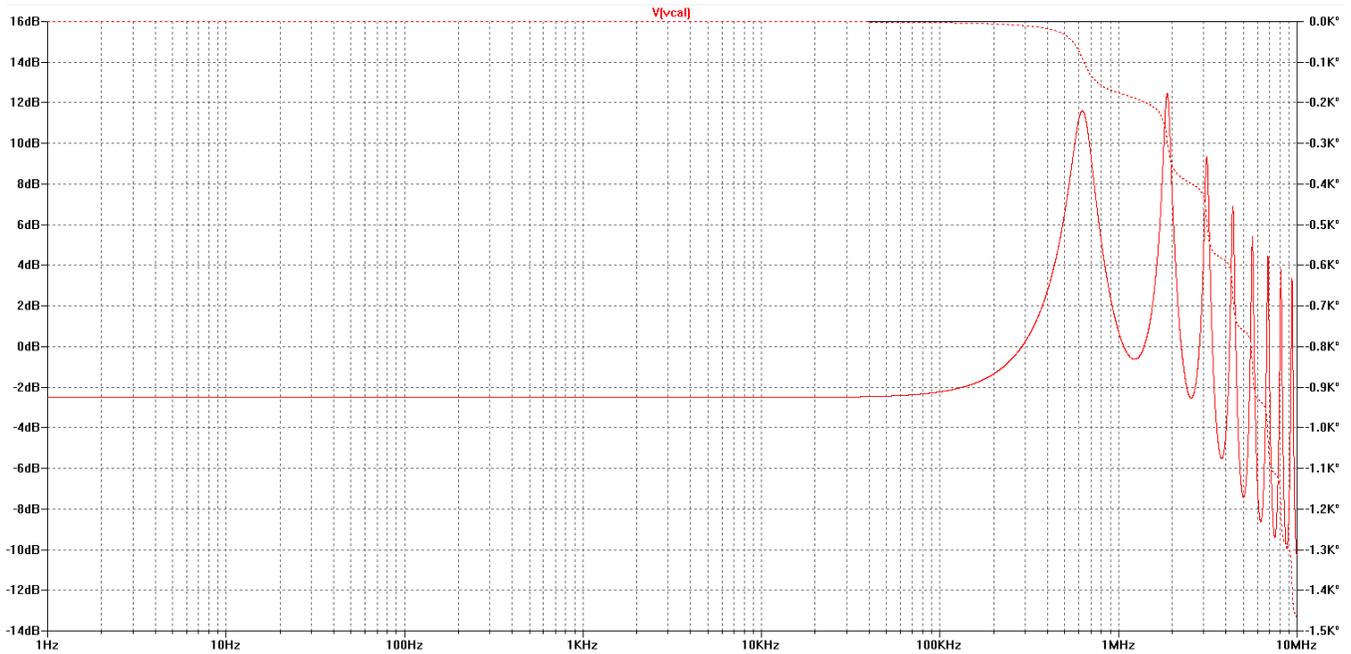


Fig. 9. Simulação LTspice mostrando os picos na resposta da frequência causados pela fiação secundária do TC.

A Fig. 8 mostra os resultados de uma simulação LTspice, demonstrando os efeitos da oscilação (“ringing”) do cabo secundário, enquanto a Fig. 9 mostra os picos da resposta da frequência causados pelo mesmo efeito.

Os efeitos do *ringing* estão presentes na vida real, conforme demonstrado pela forma de onda transitória da TW exibida na Fig. 10. Esta forma de onda foi registrada no campo durante uma falta real no sistema de potência.

O conteúdo espectral da TW é inerentemente limitado pela atenuação de alta frequência fornecida pela linha de transmissão do sistema de potência. No entanto, como o transitório de TW atinge a subestação (a localização do relé), ele é capaz de excitar um número elevado de ressonâncias de alta frequência locais, as quais não têm valor para a estimação da localização de faltas. Portanto, as frequências de amostragem, encontradas na maioria dos sistemas TW, estão normalmente em algum ponto da faixa entre 0,5 e 5 MHz.

Os transitórios da tensão da TW também são apropriados para a estimação da localização de faltas. Infelizmente, a qualidade das medições fornecidas pelos TPs convencionais é significativamente inferior àquelas dos TCs correspondentes. Os CCVTs normalmente usados em níveis de transmissão são sintonizados com a frequência nominal do sistema de potência. Embora as pilhas dos capacitores de alta frequência usados nesses transformadores sejam frequentemente utilizáveis até 1 MHz, o reator de sintonização elimina os sinais de alta frequência, deixando apenas os transitórios involuntários causados pela capacitância parasita, que tendem a ser diferentes para cada projeto do CCVT [23]. Como as medições de tensão capturadas nos terminais secundários do transformador abaixador do CCVT não medem corretamente os transitórios de TW, alguns sistemas utilizam transdutores de alta frequência adicionais montados em série com a pilha de CCVT ou divisores resistivos-capacitivos não convencionais para capturar as TWs de tensão.

O localizador de faltas baseado em TW, descrito neste artigo, não requer fiação adicional dos TCs ou TPs porque o relé tem capacidade para usar as mesmas medições de corrente para a proteção de linha e estimação da localização da falta.

O subsistema de localização de faltas baseado em TW é implementado em paralelo com a cadeia de aquisição de dados convencional, garantindo não haver qualquer interferência com as funções de proteção para missão crítica. O subsistema de localização de faltas via TW usa conversores analógico-digital (A/D) de alta velocidade que amostram as correntes de fase a 1,56 MHz e cria relatórios de evento COMTRADE dedicados contendo informações das TWs.

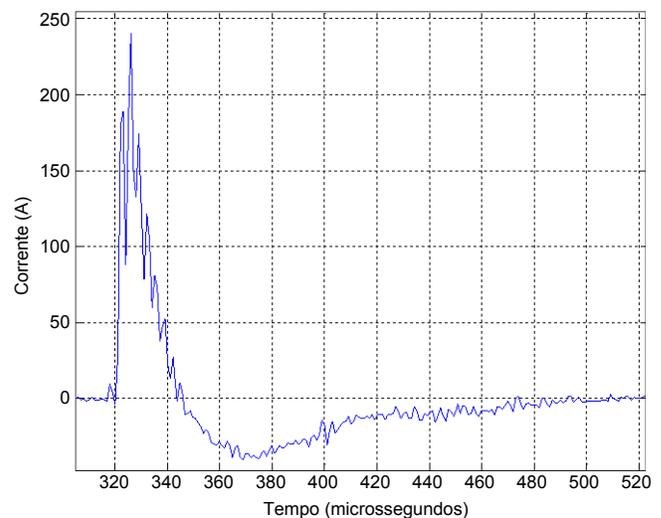


Fig. 10. Forma de onda TW registrada no campo mostrando os efeitos do *ringing* numa aplicação de uma subestação real.

### D. Monitoramento das Correntes em Aplicações com Dois Disjuntores

O relé de proteção tem dois conjuntos de entradas de corrente para medir as correntes através de dois disjuntores em esquemas de disjuntor e meio e barra dupla com dois disjuntores, conforme ilustrado na Fig. 11. Este recurso permite que o relé monitore as correntes da linha baseando-se em variáveis lógicas programáveis pelo usuário que selecionam quais as correntes a serem usadas de acordo com os requisitos de operação do sistema de potência. O algoritmo de localização de faltas usa as correntes TWIA, TWIB e TWIC selecionadas para estimação da localização da falta.

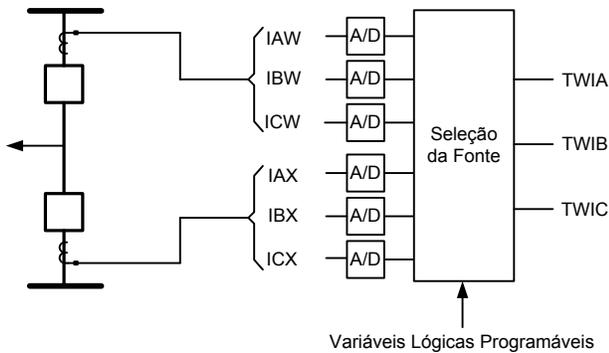


Fig. 11. Seleção da fonte de corrente para localização de faltas baseada em TW nas aplicações de barra dupla com dois disjuntores.

## V. TESTES DAS ONDAS VIAJANTES

### A. Testes Usando Sinais Analógicos com Valores Baixos de Energia

Para verificar a precisão da estimação da localização de faltas baseada em TW, criamos um modelo do sistema de potência usando um EMTP. O modelo do sistema de potência inclui modelos de linha de transmissão dependentes da frequência e capacitância efetiva dos terminais nos barramentos. A Tabela I mostra as capacitâncias típicas dos terminais para geradores, transformadores e sistemas de barramentos [24].

TABELA I  
CAPACITÂNCIAS TÍPICAS DOS TERMINAIS EM MICROFARADAYS ( $\mu\text{F}$ )

	Máxima	Mínima	Média
<b>Hidrogeradores (Polos Salientes)</b>	0,001	0,0002	0,0006
<b>Geradores (Turbina a Vapor)</b>	0,001	0,0001	0,0005
<b>Transformadores (Distribuição)</b>	0,002	0,0004	0,0010
<b>Transformadores (Potência)</b>	0,001	0,0002	0,0005
<b>Sistemas dos Barramentos</b>	0,015	0,0020	0,0050

Simulamos faltas fase-terra e fase-fase em localizações conhecidas de uma linha de 189 milhas. Salvamos os sinais de corrente de ambos os terminais (extremidade de envio e

extremidade de recebimento), os quais foram amostrados a uma taxa de 3 MHz como arquivos de valores separados por vírgula (“comma-separated value” – CSV). Usamos um gerador de sinais com capacidade de reproduzir dados a uma taxa de amostragem da ordem de megahertz com resolução de 16 bits (ver Fig. 12). O gerador de sinais reproduz os arquivos CSV via interface analógica de baixa energia (“low-energy analog” – LEA) do relé. Duas unidades de reprodução forneceram as correntes trifásicas de cada terminal da linha para os relés correspondentes. As unidades de reprodução foram configuradas para injetar os sinais de forma síncrona em ambos os relés.

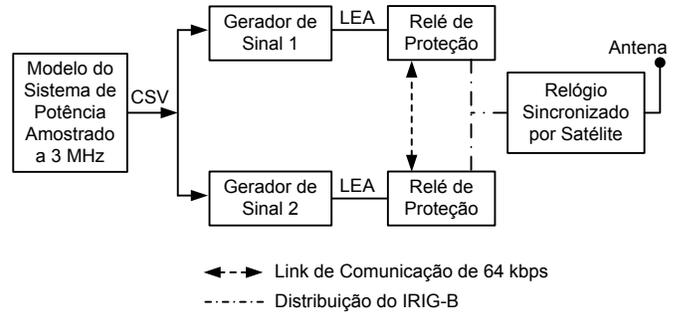


Fig. 12. Configuração de teste usando sinais da LEA para teste do sistema de localização de falta via TW.

A Fig. 13 e a Fig. 14 mostram as correntes de fase nos terminais de envio e recebimento, respectivamente, para uma falta AB a 160,45 milhas (a partir do terminal de envio).

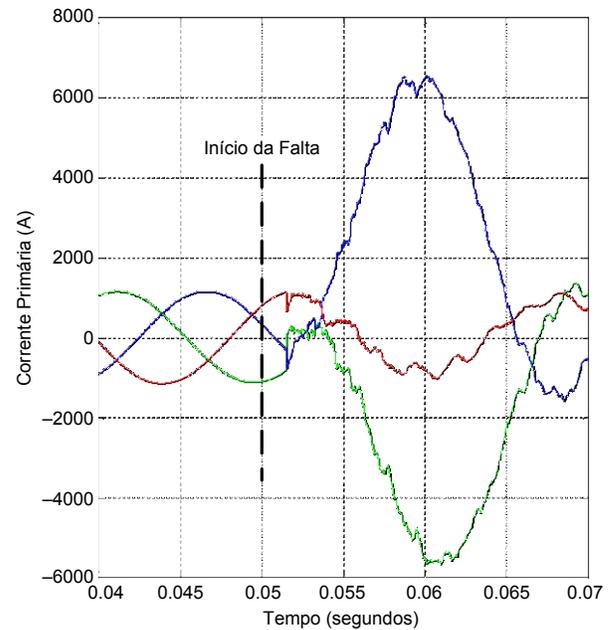


Fig. 13. Correntes de fase aplicadas ao terminal da extremidade de envio para uma falta AB.

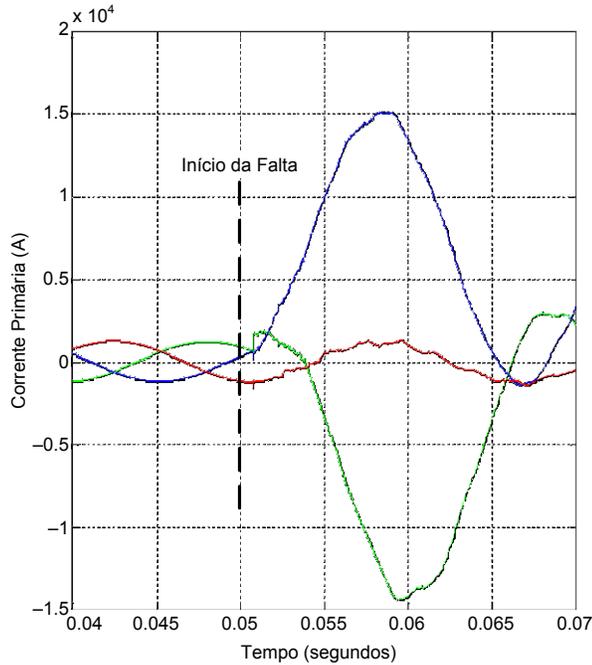


Fig. 14. Correntes de fase aplicadas ao terminal da extremidade de recebimento para uma falta AB.

Os relés filtram as correntes de fase para capturar o conteúdo de alta frequência dos sinais. Os relés efetuam a troca das estampas de tempo da onda de alta frequência restituída. A Fig. 15 e a Fig. 16 mostram o conteúdo de alta frequência das correntes de fase que foram restituídas dos relés.

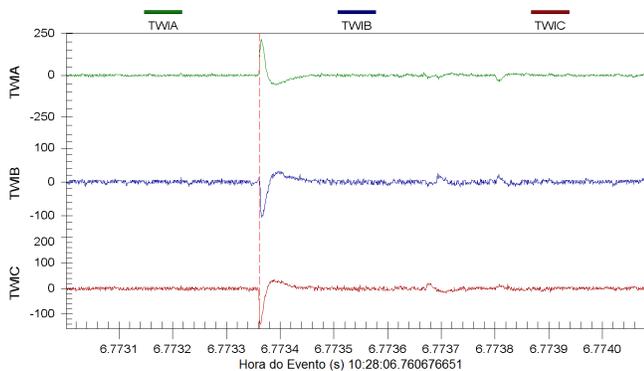


Fig. 15. TWs capturadas no terminal de envio para uma falta AB.

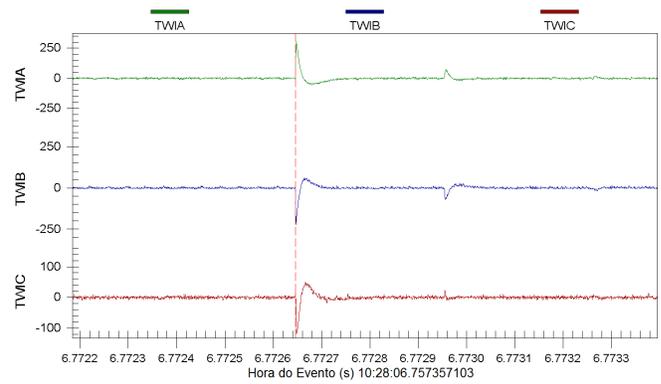


Fig. 16. TWs capturadas no terminal de recebimento para uma falta AB.

Calculamos a velocidade de propagação das TWs usando as informações das TWs obtidas em um evento de energização da linha.

Os relés registraram as seguintes estampas de tempo do terminal esquerdo (TwaveL) e terminal direito (TwaveR) para este evento:

- TwaveL = 6,773364044 segundos
- TwaveR = 6,772648441 segundos
- LL = 189 milhas
- LPVEL = 0,9903
- $c = 186282,39705$  milhas por segundo

A distância até a falta é 160,51 milhas, conforme mostrado em (12).

Neste caso, o erro de estimação da localização da falta é de 0,06 milha.

$$D_{\text{Fault}} = \frac{189 \text{ miles}}{2} + \frac{0,9903 \cdot 186,282,39705 \text{ miles/s} \cdot (6,773364044 - 6,772648441)}{2} \quad (12)$$

$$D_{\text{Fault}} = 160,51 \text{ miles}$$

### B. Testes Usando um Modelo Físico da Linha

Uma verificação adicional foi efetuada utilizando o modelo físico da linha de transmissão monofásica mostrado na Fig. 17. Embora menos preciso e significativamente menos versátil do que as simulações do EMTP, o modelo físico da linha de transmissão de baixa energia forneceu capacidade para testar todo o sistema (incluindo os TCs de entrada do relé).

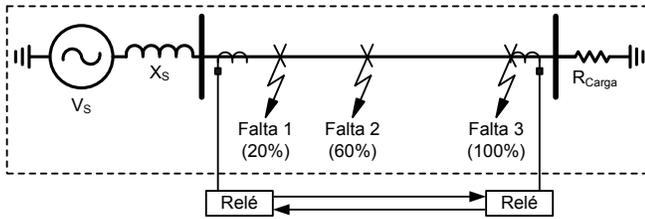


Fig. 17. Modelo físico da linha de transmissão.

O modelo físico da linha de transmissão foi implementado usando um total de 500 seções  $\pi$  para simular uma linha de 38 milhas. O cartão personalizado desenvolvido para este modelo está mostrado na Fig. 18. O modelo opera em 48 V, 1 A, com um nível máximo da corrente de falta de 5 A. As faltas podem ser aplicadas em três locais. A Fig. 17 mostra faltas a 20, 60 e 100% do comprimento da linha.



Fig. 18. Seção do modelo da linha de transmissão usado para simular um segmento monofásico de 3,8 milhas. O modelo da falta baseado em tiristores é visível na parte inferior do lado direito. O modelo da linha completo usa 10 seções.

## VI. INSTALAÇÃO NO CAMPO

### A. Experiência com a Localização de Faltas

A BPA possui e opera as subestações Goshen e Drummond. A linha Goshen-Drummond é operada em 161 kV e tem um comprimento de 72,77 milhas de acordo os dados do sistema da BPA. Esta linha de transmissão está localizada a leste de Idaho, perto da fronteira de Wyoming (ver Fig. 19). A linha compartilha um direito de passagem com duas outras linhas de 161 kV por aproximadamente 4,75 milhas.

Em seguida, ela compartilha o direito de passagem com outra linha de 161 kV nas próximas 17 milhas. A linha foi originalmente construída para 115 kV; mais tarde, ela foi submetida a um *upgrade* para 161 kV sem efetuar a troca dos condutores ou isoladores.

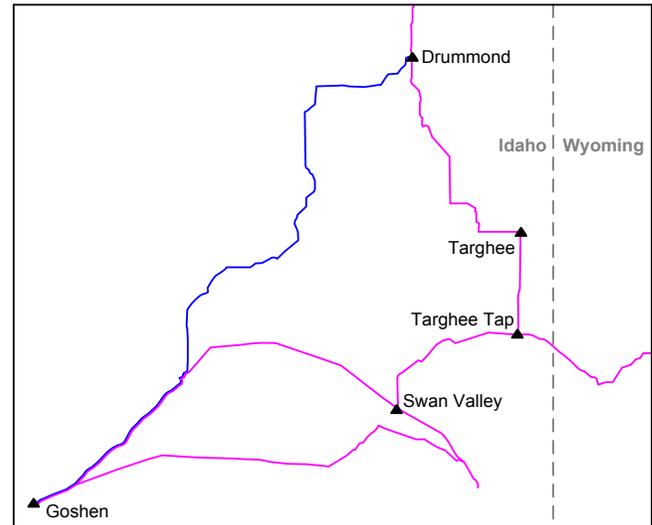


Fig. 19. Linha Goshen-Drummond de 161 kV (azul) e linhas adjacentes de 161 kV (magenta).

Após o *upgrade* para 161 kV, houve 40 faltas na linha nos últimos cinco anos. As causas mais comuns das faltas nesta linha incluem o seguinte:

- Choque dos condutores causado pelo vento.
- Agricultores pulverizando fertilizantes nos condutores e isoladores.
- Projéteis arremessados contra os condutores e isoladores.

No passado, quando da ocorrência de uma falta permanente, um técnico responsável pela manutenção da linha dirigia ao longo da linha até encontrar a falta. Para uma linha longa construída em terrenos acidentados, esta abordagem podia causar uma interrupção prolongada. Posteriormente, a BPA passou a usar registros oscilográficos das faltas para estimar a localização da falta. As equipes técnicas da BPA calculavam a impedância da falta a partir das correntes e tensões de falta e estimavam a localização da falta. Essas informações forneciam ao técnico responsável um ponto de partida para procurar a falta. Para faltas temporárias, esses técnicos de linha inspecionavam cada isolador à procura de uma indicação de onde ocorreu o arco. Com a chegada dos relés digitais, o relé estima a localização da falta baseado na impedância e no comprimento da linha. Se qualquer um desses dados não for preciso, então a localização não é precisa. Múltiplas seções, diferentes configurações de torre, resistência de falta, não homogeneidade do sistema e acoplamento mútuo de sequência-zero desafiam a precisão dos métodos de localização de faltas baseados em impedância.

A linha Goshen-Drummond é composta por quatro estruturas de torres diferentes, como mostrado na Fig. 20. A linha se estende por 18 seções. A Tabela II mostra o tipo da torre e o comprimento da linha associados a cada seção.

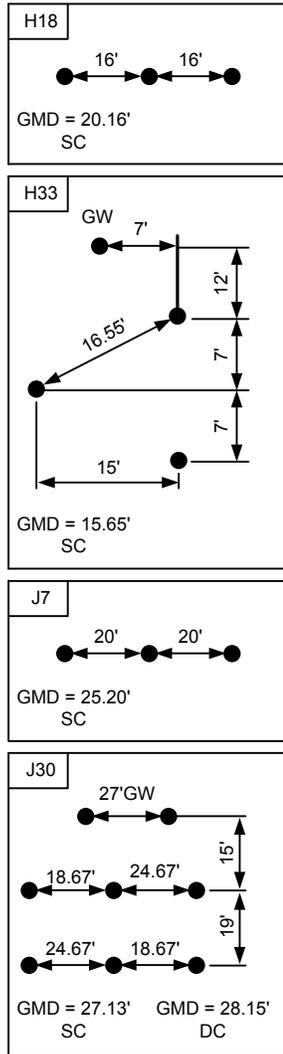


Fig. 20. Estruturas das torres na linha Goshen-Drummond.

TABELA II  
TIPO DA TORRE E COMPRIMENTO DA SEÇÃO DA LINHA

Tipo da Torre	Comprimento (milhas)
H18	0,12
J30	21,05
J7	0,68
H33	11,63
J7	0,52
J7	0,25
J7	0,94
H33	2,22
J7	4,08
J30	0,79
J30	0,42
J30	0,08
J7	8,86
H33	5,41
J7	0,37
J7	1,27
H33	5,82
J7	8,27

A Fig. 21 mostra o diagrama unifilar que inclui a linha Goshen-Drummond e as conexões dos TCs dos relés. Observe que a terminação da linha em Drummond é um autotransformador.

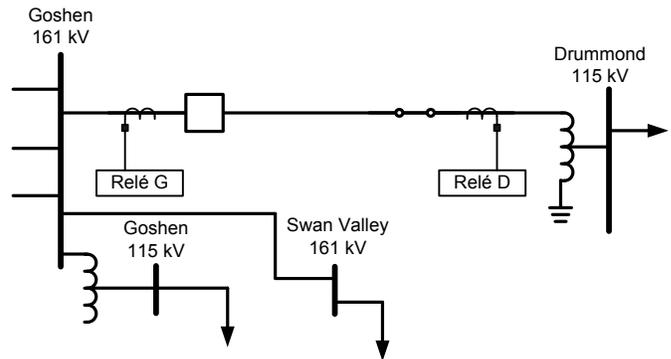


Fig. 21. Sistema de transmissão incluindo a linha Goshen-Drummond.

### B. Instalação do Dispositivo de Ondas Viajantes

Em 4 de abril de 2012, a BPA instalou dois relés com recursos de localização via TW na linha Goshen-Drummond de 161 kV. Esses relés têm capacidade para trocar informações das TWs através de um canal de 64 kbps e estimar a localização de faltas em tempo real, porém os canais de comunicação não estavam disponíveis na instalação. Portanto, restituímos manualmente os registros de evento no formato COMTRADE com informações das TWs e efetuamos a estimação da localização das faltas após a ocorrência de cada falta. Os registros de evento incluem as correntes de fase das TWs e as informações das estampas de tempo.

### C. Velocidade de Propagação e Comprimento da Linha

Conforme mencionado anteriormente, a localização de faltas baseada nas TWs de dois terminais depende dos ajustes da velocidade de propagação e do comprimento da linha juntamente com a diferença de tempo medida entre os tempos de chegada das TWs capturadas em ambos os terminais da linha de transmissão. Normalmente, as concessionárias têm uma estimativa do comprimento da linha baseada no comprimento linear ou geográfico, ou “milhas de estrada” da linha de transmissão; algumas concessionárias consideram a flecha da linha nas suas estimativas. A inclusão da flecha na estimativa do comprimento da linha reduz os erros da localização de faltas via TW.

Medimos a velocidade de propagação baseando-se no comprimento da linha e tempo de tráfego das ondas. Estimamos o tempo de tráfego usando as informações das TWs que foram capturadas durante a energização da linha. A linha foi energizada a partir de Goshen, enquanto o terminal de Drummond estava aberto e capturava os relatórios de evento para determinar a velocidade de propagação da onda. A Fig. 22 mostra as correntes e tensões de fase capturadas no terminal Goshen e amostradas a 8 kHz.

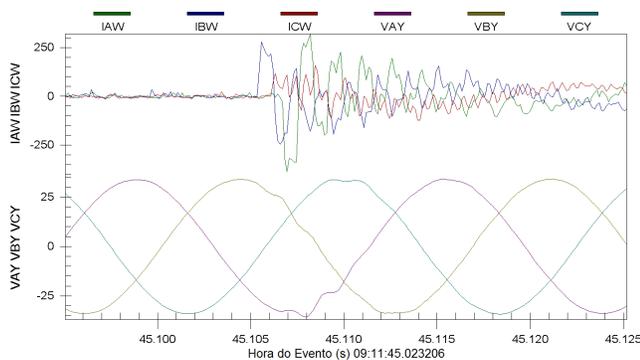


Fig. 22. Correntes e tensões de fase capturadas durante a energização da linha a partir de Goshen.

As correntes de fase representadas na Fig. 22 mostram a discordância de polos e a sequência de fechamento dos polos: fase B, fase C e fase A. Além disso, pode-se observar que os polos da fase B e fase A fecharam perto do pico de suas tensões correspondentes, enquanto o polo da fase C fechou perto do cruzamento da tensão pelo zero. A Fig. 23 mostra as correntes de fase filtradas através de um filtro analógico passa-banda, preservando o conteúdo de alta frequência e rejeitando o

conteúdo da frequência fundamental; as correntes são amostradas a 1,56 MHz.

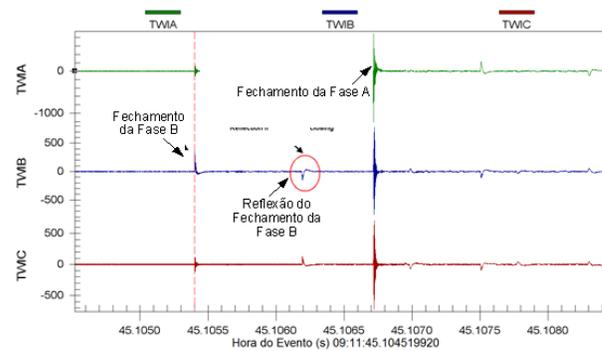


Fig. 23. Correntes de fase das TW capturadas durante a energização da linha.

A Fig. 23 mostra que não há nenhum transitório detectável correspondente ao fechamento da fase C uma vez que o polo fechou próximo da tensão zero. As informações da Fig. 23 podem ser usadas para determinar a discordância de polos entre os contatos do disjuntor com uma precisão de centenas de nanossegundos. Essas informações podem ainda ser usadas para determinar se é necessário efetuar uma manutenção corretiva do disjuntor. Usamos as estampas de tempo correspondentes ao fechamento do polo da fase B e a onda refletida a partir dos terminais abertos para calcular a velocidade de propagação. Os cálculos da velocidade de propagação estão mostrados em (13) e (14), com um tempo de tráfego igual a 790,605 microssegundos e comprimento da linha igual a 72,77 milhas.

$$LPVEL = \frac{2 \cdot LL}{\text{Travel time}} \cdot \frac{1}{c} \quad (13)$$

$$LPVEL = \frac{2 \cdot 72.77 \text{ miles}}{790.605 \mu\text{s}} \cdot \frac{1}{186282.39705 \text{ miles/s}} \quad (14)$$

$$= 0.98821$$

### D. Faltas no Sistema de Potência e Estimações da Localização das Faltas

#### 1) Evento 1: Falta da Fase C para Terra

A primeira falta ocorreu em 24 de abril de 2012. A Fig. 24 e a Fig. 25 mostram as TWs capturadas nos terminais de Goshen e Drummond para a falta da fase C para terra.

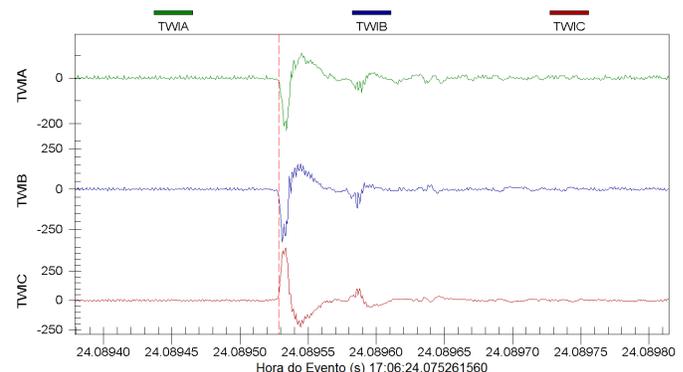


Fig. 24. Correntes de fase em Goshen para a falta da fase C para terra a 67,91 milhas a partir do terminal Goshen.

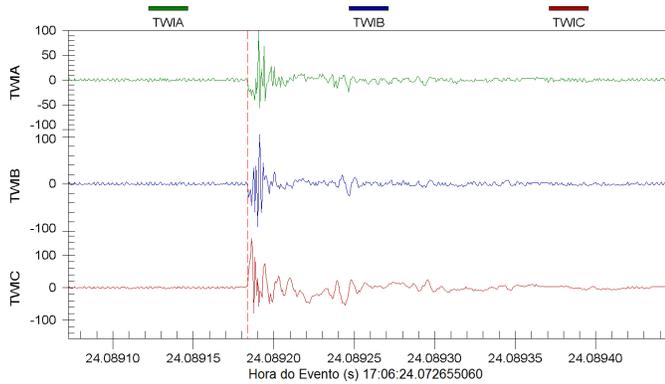


Fig. 25. Correntes de fase em Drummond para a falta da fase C para terra a 67,91 milhas a partir do terminal Goshen.

As estampas de tempo correspondentes à chegada das TWs obtidas a partir dos registros de evento incluem o seguinte:

- Goshen:  $T_{\text{waveGosh}} = 24,089532202$  segundos
- Drummond:  $T_{\text{waveDrum}} = 24,089186645$  segundos

Baseando-se nos tempos medidos referentes à chegada das TWs, estimamos a partir de (11) uma localização da falta a 68,19 milhas a partir do terminal Goshen. Durante a inspeção da linha, a equipe de linha encontrou um isolador danificado a 67,91 milhas a partir do terminal Goshen. A Fig. 26 mostra o isolador danificado. A equipe de linha reportou que a causa do dano ao isolador poderia ser um *flashover*.



Fig. 26. Isolador danificado a 67,91 milhas a partir do terminal Goshen.

## 2) Evento 2: Falta da Fase B para Terra

A segunda falta ocorreu em 11 de maio de 2012. Esta falta permanente foi causada por um projétil de chumbo arremessado contra os isoladores da fase B em alta velocidade. A Fig. 27 e a Fig. 28 mostram os componentes de alta frequência das correntes de fase capturadas em ambos os terminais.

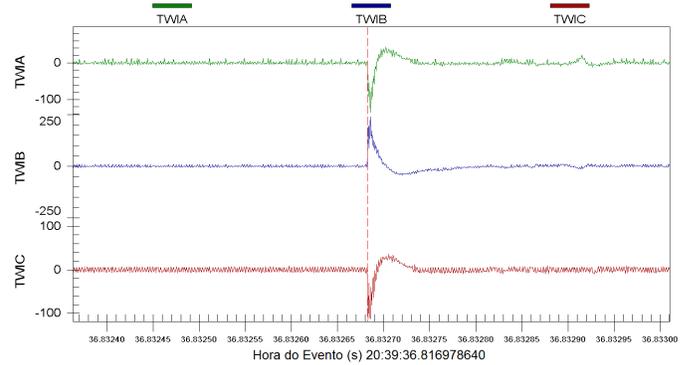


Fig. 27. Correntes de fase em Goshen para a falta da fase B para terra a 38,16 milhas a partir do terminal Goshen.

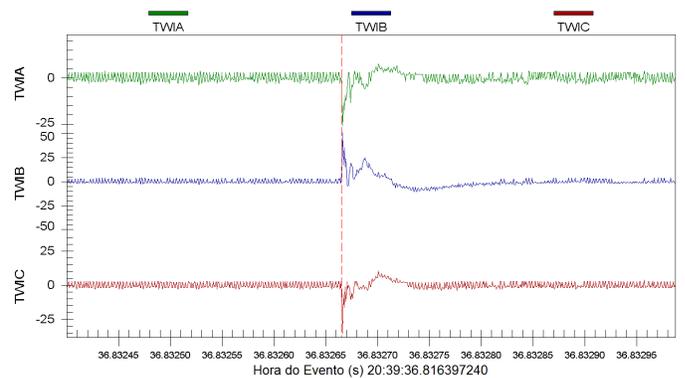


Fig. 28. Correntes de fase em Drummond para a falta da fase B para terra a 38,16 milhas a partir do terminal Goshen.

As estampas de tempo correspondentes à chegada das TWs obtidas a partir dos registros de evento incluem o seguinte:

- Goshen:  $T_{\text{waveGosh}} = 36,832684476$  segundos
- Drummond:  $T_{\text{waveDrum}} = 36,832667109$  segundos

Estimamos uma localização da falta de 37,98 milhas a partir do terminal Goshen. A equipe de linha encontrou a falta a 38,16 milhas a partir do terminal Goshen. A Fig. 29 mostra um dos isoladores danificados na cadeia de isoladores.



Fig. 29. Isolador danificado a 38,16 milhas a partir do terminal Goshen.

### 3) Evento 3: Falta da Fase B para Terra

A terceira falta ocorreu em 26 de maio de 2012. A Fig. 30 e a Fig. 31 mostram os componentes de alta frequência das correntes de fase capturadas em ambos os terminais.

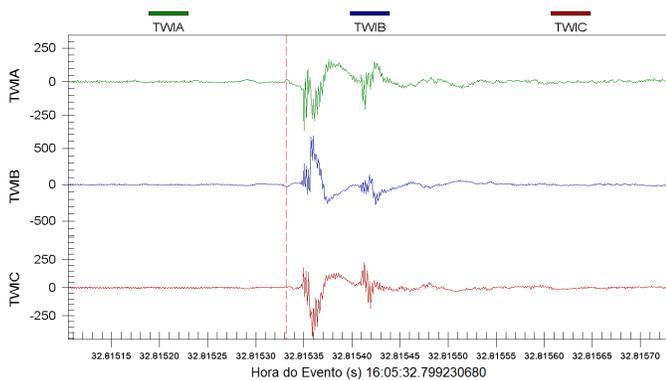


Fig. 30. Correntes de fase em Goshen para a falta da fase B para terra a 66,86 milhas a partir do terminal Goshen.

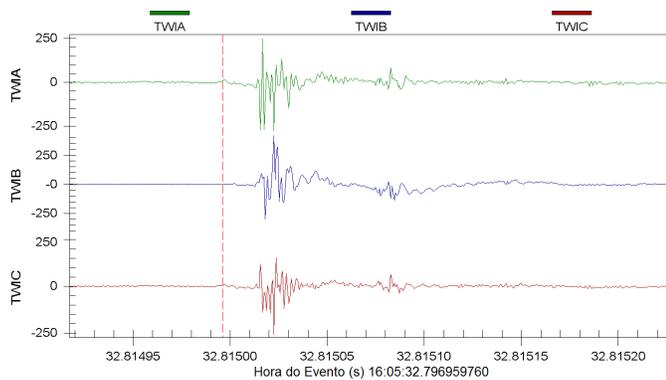


Fig. 31. Correntes de fase em Drummond para a falta da fase B para terra a 66,86 milhas a partir do terminal Goshen.

Baseando-se nos registros anteriores ao evento em questão no terminal Goshen, suspeita-se que a falta tenha sido causada por uma descarga atmosférica. As estampas de tempo correspondentes à chegada das TWs obtidas a partir dos registros de evento incluem o seguinte:

- Goshen:  $T_{\text{wave}}^{\text{Gosh}} = 32,815358756$  segundos
- Drummond:  $T_{\text{wave}}^{\text{Drum}} = 32,815023378$  segundos

Estimamos uma localização da falta a 67,25 milhas a partir do terminal Goshen. A equipe de linha encontrou a falta a 66,86 milhas a partir do terminal Goshen.

### 4) Sumário dos Resultados

A Tabela III fornece a localização da falta reportada pelo relé baseada nas medições de TW e a localização da falta real reportada pela BPA. Os erros entre as distâncias estimadas com base em TW e as distâncias relatadas pela BPA são atribuídos à não uniformidade da flecha da linha devido às variações na elevação do terreno e diferenças nas estruturas das torres. A BPA está trabalhando no sentido de fornecer estimativas precisas do comprimento da linha para inclusão da flecha da linha.

TABELA III  
LOCALIZAÇÕES DAS FALTAS REPORTADAS E ERROS ASSOCIADOS

Nº do Evento	Fase c/ Defeito	Distância Estím. c/ Base em TW	Distância Reportada pela BPA	Erro
1	C	68,19 milhas	67,91 milhas	0,28 milha
2	B	37,98 milhas	38,16 milhas	-0,18 milha
3	B	67,25 milhas	66,86 milhas	0,39 milha

## VII. CONCLUSÃO

A adição da localização de faltas baseada em TW aos relés de proteção de linhas melhora sua capacidade de localizar faltas em comparação com os relés que usam apenas métodos de localização de faltas baseados em impedância.

Os relés que utilizam os métodos baseados em impedância e TW para estimar a localização da falta fornecem resultados independentes do ângulo de incidência da falta. Esses relés fornecem a localização da falta nos terminais da linha num tempo de alguns segundos sem necessidade de um software e computador adicional.

Os casos de campo demonstram que os relés com capacidade de localização de faltas via TW podem localizar faltas dentro de um vão das torres em aplicações que incluem linhas com acoplamento mútuo. Além disso, não há necessidade de equipamentos de comunicação e fiação secundária adicional quando a localização de faltas baseada em TW for parte do relé diferencial de linha.

## VIII. REFERÊNCIAS

- [1] T. W. Stringfield, D. J. Marhart, and R. F. Stevens, "Fault Location Methods for Overhead Lines," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers – Part III: Power Apparatus and Systems*, Vol. 76, Issue 3, April 1957, pp. 518–530.
- [2] D. J. Marhart and N. W. Haagenson, "Automatic Fault Locator for Bonneville Power Administration," proceedings of the 1972 IEEE Power and Energy Society Summer Meeting, San Francisco, CA, July 1972.
- [3] M. Ando, E. O. Schweitzer, III, and R. A. Baker, "Development and Field-Data Evaluation of Single-End Fault Locator for Two-Terminal HVDC Transmission Lines, Part I: Data Collection System and Field Data," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, Issue 12, December 1985, pp. 3524–3530.
- [4] M. Ando, E. O. Schweitzer, III, and R. A. Baker, "Development and Field-Data Evaluation of Single-End Fault Locator for Two-Terminal HVDC Transmission Lines, Part II: Algorithm and Evaluation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, Issue 12, December 1985, pp. 3531–3537.
- [5] M. A. Street, "Delivery and Application of Precise Timing for a Traveling Wave Powerline Fault Locator System," proceedings of the 22nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Vienna, VA, December 1990, pp. 355–360.
- [6] P. F. Gale, "Overhead Line Fault Location Based on Travelling Waves and GPS," proceedings of the Precise Measurements in Power Systems Conference, Arlington, VA, October 1993.
- [7] M. Aurangzeb, P. A. Crossley, and P. Gale, "Fault Location on a Transmission Line Using High Frequency Travelling Waves Measured at a Single Line End," proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 4, Singapore, January 2000, pp. 2437–2442.

- [8] D. A. Tziouvaras, J. Roberts, and G. Benmouyal, "New Multi-Ended Fault Location Design for Two- or Three-Terminal Lines," proceedings of the 7th International Conference on Developments in Power System Protection, Amsterdam, Netherlands, April 2001.
- [9] K. Zimmerman and D. Costello, "Impedance-Based Fault Location Experience," proceedings of the 31st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2004.
- [10] B. S. Guru and H. R. Hiziroglu, *Electromagnetic Field Theory Fundamentals*. PWS Publishing Company, Boston, MA, June 1997.
- [11] P. Moreno, P. Gómez, J. L. Naredo, and J. L. Guardado, "Frequency Domain Transient Analysis of Electrical Networks Including Non-linear Conditions," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 27, Issue 2, February 2005, pp. 139–146.
- [12] D. E. Hedman, "Propagation on Overhead Transmission Lines I: Theory of Modal Analysis," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 84, Issue 3, March 1965, pp. 200–205.
- [13] S. A. Schelkunoff, "The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields," *The Bell System Technical Journal*, Vol. 13, No. 4, October 1934, pp. 532–579.
- [14] D. Hou and J. Roberts, "Capacitive Voltage Transformers: Transient Overreach Concerns and Solutions for Distance Relaying," proceedings of the 22nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 1995.
- [15] E. O. Schweitzer, III, "Evaluation and Development of Transmission Line Fault-Locating Techniques Which Use Sinusoidal Steady-State Information," proceedings of the 9th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 1982.
- [16] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, and T. Matsushima, "Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, Issue 8, August 1982, pp. 2892–2898.
- [17] B. Kasztenny, B. Le, and N. Fischer, "A New Multiterminal Fault Location Algorithm Embedded in Line Current Differential Relays," proceedings of the 11th International Conference on Developments in Power System Protection, Birmingham, UK, April 2012.
- [18] H. Lee, "Development of an Accurate Travelling Wave Fault Locator Using the Global Positioning System Satellites," proceedings of the 20th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 1993.
- [19] D. A. Douglass, "Current Transformer Accuracy With Asymmetric and High Frequency Fault Current," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 100, Issue 3, March 1981, pp. 1006–1012.
- [20] M. A. Redfern, S. C. Terry, F. V. P. Robinson, and Z. Q. Bo, "A Laboratory Investigation Into the use of MV Current Transformers for Transient Based Protection," proceedings of the 2003 International Conference on Power Systems Transients (IPST), New Orleans, LA, September–October 2003.
- [21] A. M. Elhaffar, "Power Transmission Line Fault Location Based on Current Traveling Waves," doctoral dissertation, Helsinki University of Technology, Finland, March 2008.
- [22] D. J. Spoor, J. Zhu, and P. Nichols, "Filtering Effects of Substation Secondary Circuits on Power System Traveling Wave Transients," proceedings of the 8th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Vol. 3, September 2005, pp. 2360–2365.
- [23] M. Kezunovic, L. Kojovic, V. Skendzic, C. W. Fromen, D. Sevcik, and S. L. Nilsson, "Digital Models of Coupling Capacitor Voltage Transformers for Protective Relay Studies," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, Issue 4, October 1992, pp. 1927–1935.
- [24] L. V. Bewley, *Traveling Waves on Transmission Systems*. Dover Publications, Mineola, NY, 1963.

## IX. BIOGRAFIAS

**Stephen Marx** recebeu seu BSEE da University of Utah em 1988. Ele ingressou na Bonneville Power Administration (BPA) em 1988. Atualmente, ele é o *District Engineer* em Idaho Falls, Idaho, para a BPA. Ele tem mais de 25 anos de experiência em medição e proteção de sistemas de potência. Stephen realiza conferências na Hands-On Relay School, em Pullman, Washington, desde 2007. Ele é um engenheiro profissional registrado no estado de Oregon. Ele é membro do IEEE e é autor e coautor de diversos artigos técnicos.

**Brian K. Johnson** recebeu um Ph.D. em engenharia elétrica da University of Wisconsin-Madison em 1992. Atualmente, ele é professor no Departamento ECE da University of Idaho, Moscow. Seus interesses incluem eletrônica de potência, proteção de sistemas de potência, e modelagem e simulação de transitórios do sistema de potência. Dr. Johnson é um engenheiro profissional registrado no estado de Idaho.

**Armando Guzmán** recebeu seu BSEE com louvor da Guadalajara Autonomous University (UAG), México. Ele recebeu um diploma em engenharia de fibra óptica do Monterrey Institute of Technology and Advanced Studies (ITESM), México, e seu MSEE e MECE da University of Idaho, Estados Unidos. Trabalhou como supervisor regional do Departamento de Proteção na Região de Transmissão Oeste da Federal Electricity Commission (a empresa concessionária de energia elétrica do México) em Guadalajara, México, por 13 anos. Realizou conferências na UAG e University of Idaho sobre proteção de sistemas de potência e estabilidade de sistemas de potência. Desde 1993, ele está na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., em Pullman, Washington, onde é um *fellow engineer* na área de pesquisas. Ele detém inúmeras patentes na área de medição e proteção de sistemas de potência e é membro sênior do IEEE.

**Veselin Skendzic** é um engenheiro principal de pesquisas na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Ele recebeu seu BS em engenharia elétrica da FESB, University of Split, Croácia; seu Masters of Science da ETF, Zagreb, Croácia; e seu Ph.D. da Texas A&M University. Ele tem mais de 25 anos de experiência em problemas relacionados à proteção de sistemas de potência e projeto de circuitos eletrônicos. Ele é membro sênior do IEEE, escreveu diversos artigos técnicos e contribuiu ativamente para o desenvolvimento de normas IEEE e IEC. Ele é membro da IEEE Power Engineering Society (PES) e do IEEE Power System Relaying Committee (PSRC) e *ex-chairman* do PSRC Relay Communications Subcommittee (H).

**Mangapathirao (Venkat) Mynam** recebeu seu MSEE da University of Idaho em 2003 e seu BE em engenharia elétrica e eletrônica da Andhra University College of Engineering, Índia, em 2000. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) em 2003 como engenheiro de proteção associado na divisão de serviços de engenharia. Atualmente, ele trabalha como engenheiro líder na área de pesquisa e desenvolvimento da SEL. Ele foi selecionado para participar do U.S. National Academy of Engineering (NAE) 15th Annual U.S. Frontiers of Engineering Symposium. Ele é membro sênior do IEEE.