

# Prevenção de Falhas em Linhas de Transmissão com Monitoramento Contínuo Baseado em Ondas Viajantes

Bogdan Kaszteny, Mangapathirao V. Mynam, Titiksha Joshi e Dennis Holmbo  
*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Apresentado na  
15th International Conference on Developments in Power System Protection  
Liverpool, Reino Unido  
9–12 de março de 2020

Traduzido para o português em fevereiro de 2021

# Prevenção de Faltas em Linhas de Transmissão com Monitoramento Contínuo Baseado em Ondas Viajantes

Bogdan Kasztenny, Mangapathirao V. Mynam, Titiksha Joshi, e Dennis Holmbo,  
*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

**Resumo**—O presente artigo apresenta um novo método de monitoramento contínuo de precursores de faltas em linhas transmissão. Baseado em um método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais para localização dos distúrbios, a função de monitoramento é ativada por ondas viajantes de corrente tão pequenas quanto algumas dezenas de Ampères primários. A função classifica as localizações dos eventos internos detectados e cria um alarme se o contador de eventos exceder um limite definido pelo usuário em qualquer localização ao longo da linha. Espera-se que a função de monitoramento da linha detecte contaminação orgânica e química de isoladores, rachaduras em isoladores, aproximação da vegetação, e outros eventos, com uma precisão de aproximadamente 300 metros. Esse artigo descreve a função, compartilha detalhes essenciais da implementação, e relata eventos selecionados que foram capturados da versão protótipo de um relé de proteção de linha implementado com a função de monitoramento de linha.

**Palavras chave**—Linhas de transmissão, prevenção de faltas, monitoramento de condição, ondas viajantes.

## I. INTRODUÇÃO

A maioria das faltas nos sistemas elétricos ocorre nas linhas de transmissão. Ao utilizar o ar como isolante e se estender por dezenas de centenas de quilômetros, as linhas ficam expostas a diversos fatores que eventualmente causam falhas. Algumas causas das faltas nas linhas são desenvolvidas ao longo de dias, semanas, ou mesmo meses, incluindo a aproximação da vegetação, contaminação dos isoladores por agentes químicos e por aves, além de envelhecimento. Com a gradual degradação do isolamento, uma linha de transmissão pode passar por precursores de faltas – eventos que não são faltas permanentes, mas sim eventos de baixa energia que duram menos do que um milissegundo, causando apenas transitórios na rede. Os relés convencionais de proteção de linhas não incluem nenhuma função dedicada para detectar, registrar ou responder a esses precursores de faltas.

A partir do momento que uma corrente dos precursores de falta alcança um nível de algumas dezenas de Ampères, ela pode ser detectada nos terminais da linha através de ondas viajantes de corrente. O método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais [1] é especialmente útil. Para localizar um evento de forma exata, o método só precisa detectar e colocar a estampa de tempo nas primeiras ondas causadas pelo evento em ambos os terminais da linha. Portanto, o método não só é simples, mas também sensível.

Este artigo apresenta a teoria, implementação, e experiência em campo com uma função de monitoramento de linhas baseada em ondas viajantes, com às seguintes características principais:

- É ativada a partir de ondas viajantes de corrente geradas por precursores de falta (com ou sem atuação da proteção)
- Localiza os eventos com alta exatidão através do método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais
- Classifica os eventos para localizações ao longo da linha
- Emite um alarme se o contador de eventos, em qualquer localização ao longo da linha, exceder o limite estipulado pelo usuário

A função de monitoramento de linha permite ao usuário monitorar continuamente a presença de isoladores sujos ou rachados, invasão da vegetação nas faixa de servidão, faltas incipientes em cabos subterrâneos ou movimentação dos condutores (amortecimento insuficiente ou espaçadores defeituosos). A utilização dessa nova função de monitoramento de linha proporciona:

- Enviar a equipe de manutenção da linha para a localização do problema.
- Confirmar e corrigir o problema através da limpeza de isoladores sujos, poda da vegetação, instalação de amortecedores ou espaçadores na linha, entre outros.
- Reiniciar o contador de eventos para a localidade do problema relatado após realizada a manutenção adequada e identificada a causa raiz.

O chaveamento de rotina de capacitores série ou cargas em derivação dentro da linha gera ondas viajantes que podem levar a falsos alarmes da função de monitoramento de linhas para as localidades dos capacitores série ou das cargas em derivação. Ao invés de utilizar um contador de eventos com tempo ilimitado para essas localizações, a função trabalha com uma soma de eventos em um tempo definido de 24 horas para monitorar e notificar pela contagem de eventos diários. Isso permite que o usuário monitore chaveamentos não usuais em capacitores série e cargas em derivação.

O método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais exige uma referência de tempo comum e um canal para troca de estampas de tempo das ondas viajantes. A nossa implementação utiliza relógios de satélite em ambos os

terminais da linha e um econômico canal multiplexado de baixa largura de banda sobre SDH, SONET, MPLS. Nossa implementação também trabalha com um canal direto de fibra (sem necessidade de relógios de satélite).

Quando ativada por eventos de baixa energia sem atuação da proteção, a lógica de monitoramento da linha deve distinguir eventos internos dos diversos eventos externos que acontecem todos os dias, como chaveamentos de rotina ou faltas na rede circundante. O método descrito trabalha somente com ondas viajantes de corrente pois a aquisição de ondas viajantes de tensão não é prática através dos TPs utilizados atualmente. Sem as ondas viajantes de tensão, é mais difícil distinguir eventos de baixa energia internos e externos. Esse artigo apresenta diversos métodos novos para obter a seletividade necessária. Um dos métodos compara as polaridades das ondas viajantes de corrente entre os terminais da linha e entre a tensão pré falta. Outro método distingue os precursores de falta de descargas atmosféricas comparando as ondas viajantes do modo terra com as ondas viajantes do modo aéreo. Esse artigo ilustra os princípios apresentados com registros de campo de mais de uma dúzia de instalações piloto com um dispositivo experimental baseado em [2] com uma taxa de amostragem de 1 MHz e uma acurácia de tempo de 0.1  $\mu$ s.

## II. EXEMPLO DE CAMPO DE UM PRECURSOR DE FALTA

O relé [2] foi instalado em uma linha de 110 kV, de 56.3 km de extensão em um sistema de 50 Hz. O propósito desse teste foi verificar os elementos de proteção e esquemas baseados em ondas viajantes e grandezas incrementais assim como a localização de faltas baseada em ondas viajantes. Em janeiro de 2018, uma falta da fase A para a terra (AG) ocorreu internamente à linha a uma distância de aproximadamente 14 km de um dos terminais. O elemento de distância por grandezas incrementais do relé local, TD21 [3], atuou em 2 ms, incluindo o tempo de processamento do relé e o tempo de fechamento de uma saída de estado sólido indicada para trip. A Fig. 1 mostra as tensões e correntes locais para essa falta (a saída de trip não estava conectada à bobina do disjuntor).

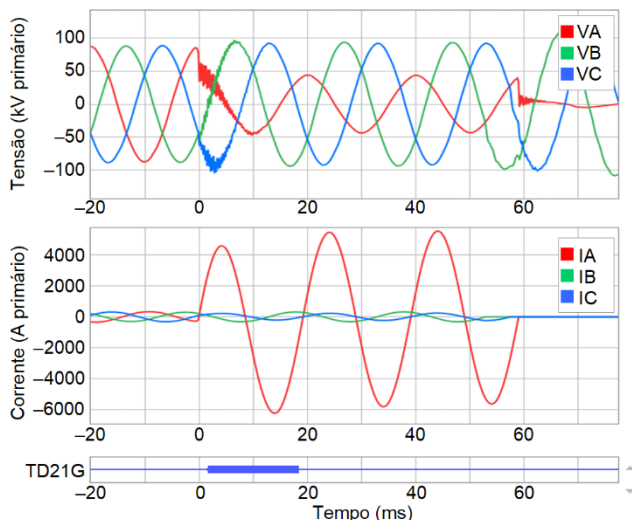


Fig. 1. Tensões e correntes para uma falta AG

A Fig. 2 mostra as ondas viajantes de corrente locais (em vermelho) e remotas (em azul) no registro IEEE COMTRADE do relé de 1 MHz. O relé calcula esses sinais utilizando um filtro differentiator-smoother [1] [2] [3]. A onda viajante de corrente local chegou 97.306  $\mu$ s antes da onda viajante de corrente remota, o que, dado o comprimento da linha de 56.31 km e o tempo de propagação da onda viajante na linha de 196.68  $\mu$ s, indica que a falta estava localizada a 14.226 km do terminal local (veja (4)). As ondas viajantes de corrente estavam a um nível de 50 A primários, o que é pequeno, mas esperado para uma linha de 110 kV.

Uma inspeção detalhada dessas ondas viajantes de corrente revela, entretanto, que pequenas ondas viajantes de corrente estavam presentes 10 ms antes da falta (veja a Fig. 3). Durante esse precursor de falta, a onda viajante de corrente local chegou 98.042  $\mu$ s antes da onda viajante de corrente remota, uma diferença de tempo quase idêntica à medida durante a falta (97.306  $\mu$ s). A falta ocorreu quando a tensão estava próxima ao pico (Fig. 1), conforme esperado para uma linha com uma tensão nominal relativamente baixa. Dez milissegundos antes da falta, a tensão também estava em seu pico, o que explica o tempo do precursor. A Fig. 4 mostra o sinal de tensão de 1 MHz no momento do precursor. É possível observar pequenos transitórios no sinal de tensão. Quando reamostrados para 10 kHz (Fig. 1), esses pequenos transitórios se tornam praticamente invisíveis. Os relés que amostram em valores de alguns kHz não registrariam qualquer sinal desse precursor.

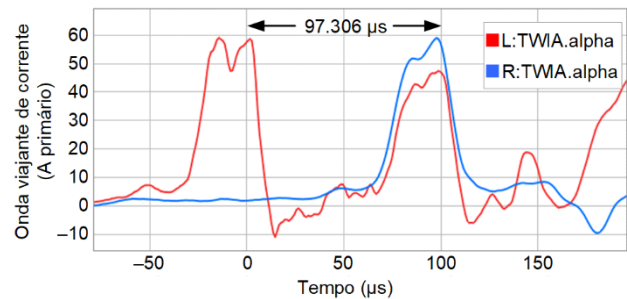


Fig. 2. Ondas viajantes de corrente durante a falta

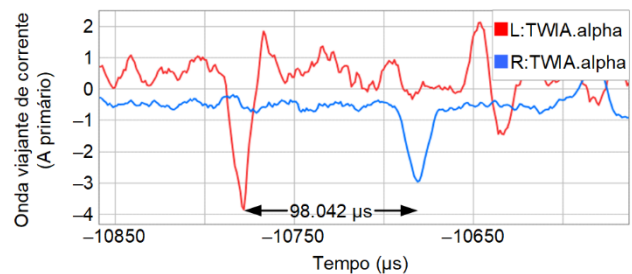


Fig. 3. Ondas viajantes de corrente 10 ms antes da falta

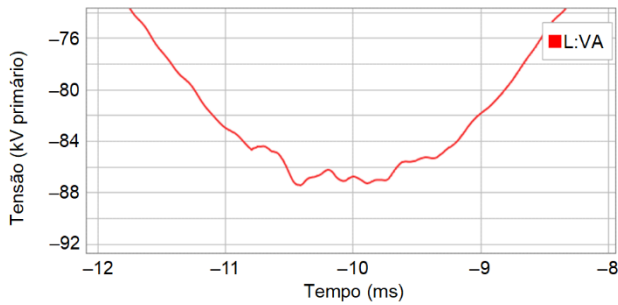


Fig. 4. Tensão local da fase A 10 ms antes da falta

O usuário havia configurado o registro pré falta de 1 MHz em somente 100 ms, e não foi encontrado nenhum precursor mais cedo nesse pequeno intervalo pré falta. Entretanto, inspecionando o próximo registro, foi encontrado um segundo precursor 0.5 ms antes da falta (veja a Fig. 5). Mais uma vez, a diferença na chegada da onda viajante de corrente foi de  $98.005 \mu\text{s}$  – um valor quase idêntico ao da falta e do primeiro precursor.

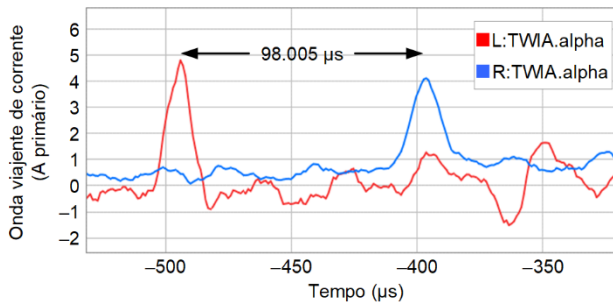


Fig. 5. Ondas viajantes de corrente 0.5 ms antes da falta

Perceba que o nível de sinal das ondas viajantes de corrente nos precursores foi da ordem de 4-5 Amperes primários. Ainda assim, o relé [2] foi capaz de medir esses sinais (as ondas viajantes na Fig. 5 estão claramente acima do ruído). Em linhas com tensões mais altas, esses sinais serão proporcionalmente mais altos. Além disso, perceba que a polaridade das ondas viajantes de corrente acompanha a polaridade da tensão pré falta – as ondas viajantes de corrente na Fig. 2 e na Fig. 5 são positivas, assim como a tensão da fase afetada em 0 ms; as ondas viajantes de corrente na Fig. 3 são negativas, assim como é a tensão da fase afetada em  $-10$  ms.

Neste evento de campo, 10 ms antes da falta, o primeiro precursor sinalizou que havia um problema a 14.120 km; 0.5 ms antes da falta, o segundo precursor sinalizou que havia um problema a 14.126 km; finalmente, uma falta ocorreu a 14.226 km (as localizações dos precursores e da falta coincidem em 100 m).

### III. CAUSAS DOS PRECURSORES DE FALTA

É justificável assumir que os precursores de faltas prevêm muitas faltas nas linhas, com exceções óbvias de causas puramente mecânicas como objetos e detritos voadores e problemas estruturais abruptos com as torres, condutores de potência, cabos guarda, ou isoladores.

#### A. Contaminação Orgânica dos Isoladores

A contaminação orgânica por aves se desenvolve ao longo do tempo. No processo de acumulação da contaminação, a substância contaminante passa por ciclos de adição, secagem, umidificação e limpeza pela chuva, secagem devido a descargas parciais, e assim por diante. Esse ciclo pode durar dias e semanas. Durante esse tempo, eventos de baixa energia ocorrem na localização contaminada.

#### B. Contaminação Química dos Isoladores

A contaminação química se desenvolve graças a compostos químicos semicondutores, especialmente o sal. A contaminação química pode passar por um ciclo similar de depósito, limpeza pela chuva, queima por descargas parciais, e assim por diante. Esses ciclos podem durar dias e semanas antes de uma falta de alta corrente ocorrer. A contaminação química ocorre em linhas ao longo de costas oceânicas, indústrias químicas, ou estradas que tem o gelo removido por sal. As concessionárias de energia regularmente lavam os isoladores nessas localizações quimicamente ativas, e suas agendas de limpeza fornecem uma boa indicação em relação ao tempo necessário para uma contaminação química começar a causar faltas.

#### C. Aproximação da Vegetação

A aproximação da vegetação (árvores e arbustos de rápido crescimento) também pode levar a longos períodos de atividade elétrica, mas sem causar uma falta permanente de alta corrente. A vegetação progride de forma relativamente lenta, e quando folhas, ramos ou pequenos galhos chegam perto de um condutor energizado, eles são expostos aos campos elétricos e magnéticos da linha. Como resultado, eles secam e morrem parcialmente, e sua baixa condutividade (devido ao tamanho reduzido) se torna ainda menor devido à secagem causada pela corrente. Uma realimentação negativa acontece quando o galho invasivo é tratado eletricamente, e, como resultado, se torna menos condutivo, portanto, pode permanecer naquele estado sem causar uma falta. Os contatos com árvores se tornam faltas de alta corrente somente se alguma mudança ocorrer, como a árvore se inclinar devido a problemas com a raiz, um grande galho se quebrar, ou um vento forte arrastar um galho para perto de um condutor. Antes dessa mudança, a aproximação da vegetação pode gerar eventos elétricos por dias ou semanas.

Devido a exigências rigorosas de poda, a aproximação da vegetação não deve acontecer em linhas de transmissão. Entretanto, ela pode aparecer em linhas de sub-transmissão e em linhas sobrecarregadas devido ao decaimento dos condutores (o decaimento de condutores em linhas sobrecarregadas e faltas devido a administração inadequada de vegetação contribuíram para o blackout Norte Americano de 2003).

#### D. Incêndios em Arbustos

Um incêndio em um arbusto ao longo da linha imediatamente cria fumaça e ar quente ionizado que suspende pequenos detritos e fuligem. Essa contaminação pode degradar severamente a qualidade do ar como meio isolante entre os condutores e pode iniciar atividades de descarga antes de uma falta de alta corrente. Detectar essa atividade pode ajudar na

análise de causa-efeito (determinar se a falta na linha causou o incêndio ou se o incêndio causou a falta na linha).

#### E. Falhas Ocultas e Envelhecimento em Isoladores

Eventos como descargas por falhas ocultas e envelhecimento em isoladores tem probabilidade de se espalhar por algum tempo. Além disso, faltas transitórias seguidas por religamento automático com sucesso podem progressivamente enfraquecer um isolador por contaminação com subprodutos do arco e estresse mecânico de forças eletromagnéticas. Detectar eventos de baixa energia e manter o controle do número de faltas transitórias na mesma localidade nos permite identificar isoladores que tem maior chance de falhar.

### IV. FUNÇÃO DE MONITORAMENTO DE LINHA

#### A. Localizando Eventos

A função de monitoramento de linha utiliza o método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais para localizar os eventos na linha [1]. A Fig. 6 mostra um diagrama de Bewley para uma falta na localização F em uma linha de comprimento LL. (A seção 4.1 inclui material obtido diretamente de [1].)

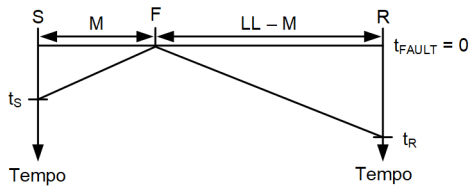


Fig. 6. Diagrama de Bewley para uma falta na linha

A falta está a  $M$  (quilômetros ou milhas) de distância do terminal local (S) e  $LL - M$  (quilômetros ou milhas) de distância do terminal remoto (R). A velocidade de propagação das ondas viajantes (PV) na linha é a relação entre o comprimento total da linha (LL) e o tempo de propagação de onda viajante na linha (TWLPT):

$$PV = \frac{LL}{TWLPT} \quad (1)$$

A primeira onda viajante de corrente chega ao terminal S em:

$$t_s = \frac{M}{PV} \quad (2)$$

A primeira onda viajante de corrente chega ao terminal R em:

$$t_r = \frac{LL - M}{PV} \quad (3)$$

Resolvendo (2) e (3) para a localização da falta,  $M$ , e fatorando em (1) para a velocidade de propagação, obtemos a seguinte equação para a localização da falta:

$$M = \frac{LL}{2} \cdot \left( 1 + \frac{t_s - t_r}{TWLPT} \right) \quad (4)$$

O método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais (4) é simples, ainda assim muito exato.

Ele exige somente a identificação e estampa de tempo das primeiras ondas viajantes em ambos os terminais da linha. Uma grande vantagem do método de localização de faltas de dois terminais nas aplicações de monitoramento de linha é que ele não precisa isolar e identificar a origem das ondas viajantes subsequentes. Os eventos de baixa energia geram somente pequenas ondas viajantes de corrente. Não podemos contar com múltiplas reflexões dessas ondas viajantes entre os terminais da linha e a localização do evento. Só é possível contar com a primeira onda viajante vinda da localização do evento (veja a Fig. 3 e a Fig. 5 para um exemplo dos níveis de sinal das ondas viajantes).

O método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais tem um histórico comprovado em campo com exatidão comprovada de um vão de torre (300 metros) em média [1]. Quando testado sob condições ideais, o método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais (4) implementado em um hardware [2] gera um erro consideravelmente menor que 20 metros no 90º percentil e um erro menor que 10 metros na mediana.

Nossa implementação do localizador de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais [2] permite aplicações em linhas híbridas, que são linhas compostas por seções aéreas assim como seções de cabos isolados [1]. A função de monitoramento de linha usa a implementação [1], e, portanto, também se aplica em linhas híbridas.

#### B. Classificando Eventos e Gerando Alarmes

Em referência à Fig. 7, a função de monitoramento de linha representa uma linha de transmissão de dois terminais com intervalos de 0.25 km. A lógica associa um lote para cada um dos intervalos e marca em cada lote o ponto médio do intervalo correspondente, como 0.25, 0.50, 0.75, e assim por diante. A não ser pelo primeiro e pelo último lote, um lote marcado como  $L$  cobre eventos de  $(L - 0.125)$  até  $(L + 0.125)$ . Cada lote tem um contador associado a si que conta os eventos dentro daquele lote. O contador tem um alcance de 0 a 255 por lote. Quando o contador alcança seu limite superior, ele não é mais incrementado, mas permanece em 255 até que seja zerado pelo usuário.

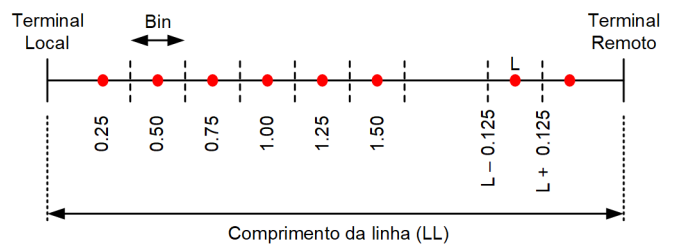


Fig. 7. Linha de transmissão dividida em lotes para contagem dos eventos na linha

Quando a função de monitoramento da linha detecta um evento na linha e obtém uma localização de evento válida a  $M$  (quilômetros ou milhas) pelo método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais, ela determina o lote cuja a localização é  $M$  e incrementa o contador daquele lote.

A lógica de monitoramento da linha é ativada por dois tipos de eventos: eventos de baixa energia e eventos de alta energia (faltas). Definimos um evento de baixa energia como um evento que ativa os detectores de perturbação de ondas viajantes em ambos os terminais da linha, mas a proteção da linha não atua. Espera-se que os eventos de baixa energia sejam precursores de falta, como uma descarga por um isolador sujo ou com defeito, uma falta incipiente em um cabo isolado, uma descarga por aproximação da vegetação, ar ionizado com fuligem de um incêndio sob a linha, acoplamento de uma descarga atmosférica nos cabos guarda, e outras circunstâncias similares. Definimos um evento de alta energia ou falta como um evento que ativa os detectores de distúrbios por ondas viajantes em ambos os terminais da linha e é sucedido pela atuação da proteção.

A função de monitoramento da linha compara os valores de todos os contadores com o limiar de alarme definido pelo usuário. É possível que um evento recorrente de uma mesma localidade incremente três contadores adjacentes devido ao desvio natural nos resultados de localização de falta de aproximadamente  $\pm 300$  m. A Fig. 8 mostra esse fenômeno. Para resolver o potencial problema do desvio, a lógica de monitoramento de linha ativa o alarme para o lote  $n$  se a soma dos contadores dos lotes  $n - 1$ ,  $n$ , e  $n + 1$  ultrapassar o limite e se o valor do contador do lote  $n$  for o maior entre os contadores  $n - 1$ ,  $n$ , e  $n + 1$ .

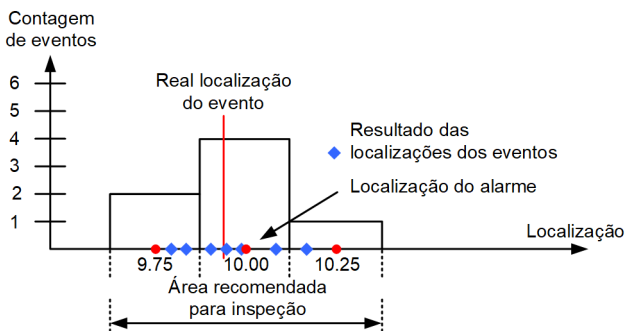


Fig. 8. Eventos recorrentes na mesma localização podem incrementar contadores em três lotes adjacentes (erro por desvio na localização)

### C. Capacitores Série e Cargas em Derivação

Qualquer mudança brusca na tensão gera ondas viajantes de corrente. A retirada ou inserção de capacitores série dentro da linha e o chaveamento de cargas em derivação causa mudanças abruptas na tensão e gera ondas viajantes. Algumas vezes as cargas em derivação utilizam chaves seccionadoras ao invés de disjuntores. Esses dispositivos são propensos a restrikes, que também geram ondas viajantes de corrente. Operações de comutadores de tape em transformadores tem probabilidade de gerar ondas viajantes de corrente que chegam nos terminais da linha. Por último, pequenas ondas viajantes podem chegar aos terminais da linha para faltas à jusante de cargas em derivação. A função de monitoramento da linha detectaria esses eventos de chaveamento como eventos de baixa energia. Nossa implementação resolve esse desafio ao estabelecer regiões de bloqueio em volta das localizações das derivações e de capacitores série (veja a Fig. 9). A função conta os eventos dentro das regiões de bloqueio de forma diferente. Ao invés de uma soma vitalícia, a função contabiliza um total diário e aplica

um limiar de alarme separado para monitorar os capacitores série e cargas em derivação.

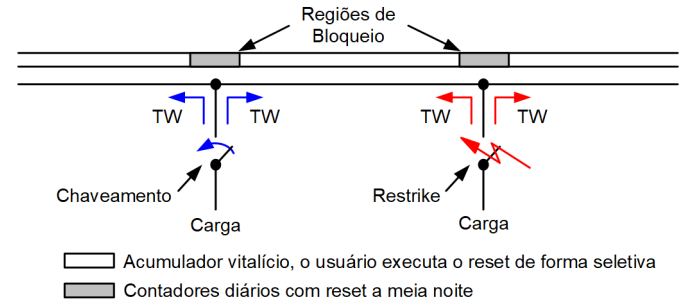


Fig. 9. Regiões de bloqueio para acomodar eventos de chaveamento em tapes e capacitores série

## V. SELETIVIDADE E CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS

Por ser intencionalmente muito sensível, a lógica de monitoramento de linha será ativada por diversos eventos diariamente. A maioria desses eventos são eventos de chaveamento, externos à linha monitorada. Com o fim de evitar a geração de alarmes falsos, a lógica de monitoramento de linha deve ser seletiva e distinguir entre eventos internos à linha e os demais eventos.

### A. Eventos Internos e Externos

Para serem entendidas como internas à linha monitorada, as ondas viajantes de corrente locais e remotas devem chegar dentro de um intervalo de tempo não maior do que o tempo de propagação das ondas viajantes por toda a linha, TWLPT (veja (4) e a Fig. 6). Se a diferença entre os tempos de chegada das ondas viajantes nos terminais local e remoto for maior do que o tempo de propagação da onda viajante na linha, então o evento é classificado como externo e não é catalogado.

Entretanto, eventos externos (faltas ou chaveamentos) que estão localizados em um ponto com tempo de tráfego similar das ondas viajantes aos dois terminais da linha monitorada vão gerar ondas viajantes que chegam aos terminais da linha com uma diferença de tempo próxima ao valor de TWLPT. Nossa solução diferencia eventos internos e externos comparando as polaridades das primeiras ondas viajantes de corrente em ambos os terminais da linha [3]. Para um evento externo, uma onda viajante que entrou na linha em um terminal com uma determinada polaridade vai sair da linha após o tempo de propagação da onda viajante com polaridade invertida. Para um evento interno, as primeiras ondas viajantes em ambos os terminais da linha chegam com a mesma polaridade (ambas positivas ou ambas negativas). Nossa implementação decide qual dos seis métodos aéreos de ondas viajantes de corrente utilizar, e checka a polaridade desse modo aéreo em ambos os terminais da linha.

Ainda, podem haver casos onde as duas ondas viajantes de corrente estarão na mesma polaridade para um evento externo. Uma falta em uma linha paralela é um caso. A falta gera duas ondas viajantes que viajam da falta na linha paralela em direção aos terminais da linha monitorada. Essas ondas viajantes de corrente entram na linha monitorada por fora e tem a mesma polaridade. Resolvemos esse problema ao comparar a

polaridade da onda viajante de corrente com a polaridade da tensão pré falta. Um curto-circuito afunda a tensão pré falta – uma tensão positiva diminui em direção ao zero, e uma tensão negativa aumenta em direção ao zero. Admita que um evento ocorre quando a tensão antes do evento estava positiva. O evento causa uma mudança negativa na tensão (tensão positiva diminui) e, portanto, gera uma onda viajante de corrente negativa. Para um evento na linha monitorada, essa onda viajante de corrente negativa chega na direção oposta à polaridade do TC, e, portanto, ela aparece para o dispositivo de monitoramento de linha como uma onda viajante de corrente positiva. Como resultado, eventos na linha monitorada que ocorrem quando a tensão pré falta é positiva geram ondas viajantes de corrente positivas; eventos reversos que ocorrem quando a tensão pré falta é positiva geram ondas viajantes de corrente negativas.

É claro que, ao comparar a polaridade da onda viajante de corrente com a polaridade da tensão pré falta, devemos combinar o modo da tensão ao modo aéreo da onda viajante de corrente. Por exemplo, se selecionarmos o modo alfa referenciado à fase A para a onda viajante de corrente, utilizamos a tensão pré falta instantânea da fase A. Se selecionarmos o modo beta referenciado para as fases B-C para a onda viajante de corrente, utilizamos a tensão pré falta instantânea VB – VC.

Idealmente, gostaríamos de utilizar a tensão pré falta na localização do evento pois as tensões nos terminais vão diferir da tensão na localização do evento devido à queda de tensão ao longo da linha carregada. Se a função de monitoramento da linha tiver acesso às tensões de ambos os terminais (aplicações com fibra direta), ela pode aproximar a tensão na localização do evento como uma média entre as tensões dos dois terminais ponderada pela localização da falta em PU. Se a lógica de monitoramento tiver acesso somente à tensão local (aplicações com canal multiplexado), ela utiliza somente a tensão local ao custo de uma seletividade ligeiramente degradada.

### B. Ondas Viajantes de Corrente Induzidas por Descargas Atmosféricas

Nossa experiência em campo mostra que descargas atmosféricas podem induzir ondas viajantes de corrente nos condutores, que podem ser interpretadas como causadas por eventos internos. A descarga de corrente no cabo guarda (se a descarga atingir o cabo guarda) ou no ar próximo à linha, induz ondas viajantes de corrente nos condutores (os condutores agem como longas antenas). Porém, os três condutores estão localizados a uma distância similar em relação a descarga de corrente. Como resultado, as ondas viajantes induzidas nos condutores são similares (mesma polaridade, magnitudes similares). Assim, as ondas viajantes de corrente causadas pelas descargas atmosféricas contêm um modo de terra muito elevado. Por outro lado, as ondas viajantes de corrente causadas por faltas contêm um elevado modo aéreo com padrões influenciados pelo tipo da falta e ponto da onda de tensão. Identificamos descargas atmosféricas verificando o nível do modo de terra em relação ao maior modo aéreo das ondas viajantes [3].

### C. Faltas Incipientes em Cabos Isolados

Os cabos isolados atenuam ondas viajantes de corrente muito mais do que em linhas aéreas. Mesmo assim, podemos aplicar o conceito de monitoramento de linhas para cabos isolados se eles não forem muito longos. Faltas incipientes em cabos isolados costumam se tornar eventos de alta corrente, mas de curta duração, com a corrente de falta tendo uma duração de um, dois, ou somente alguns meio-ciclos. Podemos detectar esses padrões de um, dois, ou múltiplos meio-ciclos e associá-los com eventos de baixa energia precedentes. Independentemente de a falta incipiente no cabo subterrâneo com alta corrente ser o primeiro evento detectado ou for precedida por eventos de baixa energia, a função de monitoramento da linha fornece uma localização de falta precisa. A função de localização de falta por si só é uma melhoria muito significativa sobre a localização de faltas baseada em impedância para essas faltas incipientes em cabos isolados.

### D. Classificação de Eventos

Nosso foco é na confiabilidade (sensibilidade) e segurança na função de monitoramento de linha, e portanto classificamos eventos somente como internos e externos. Uma análise mais detalhada dos eventos internos pode ser realizada ao examinar assinaturas de ondas viajantes de corrente. Por exemplo, é possível realizar um estudo para distinguir entre um contato com árvores e uma contaminação orgânica dos isoladores. Tal análise não faz parte do escopo deste artigo.

## VI. EXEMPLOS DE CAMPO

Na época em que este artigo foi finalizado, havia em torno de meia dúzia de instalações piloto do dispositivo de monitoramento de linha [2] com mais uma dúzia pendentes. Essas linhas vão desde 69 kV até 500 kV e de 8 milhas até mais de 200 milhas. O intuito dos testes em campo é confirmar que quando os precursores de faltas se tornam grandes o suficiente para serem confiavelmente detectados com ondas viajantes de corrente nos terminais da linha, ainda há tempo suficiente (dias, não milissegundos) para corrigir este problema e prevenir as faltas.

A Fig. 10 mostra as tensões e correntes (a  $\pm 4$  ms do evento) e as ondas viajantes de corrente locais e remotas ( $-50$  até  $+150$   $\mu$ s) para um evento em uma linha de 115 kV, com 20.65 milhas de extensão, em um sistema de 60 Hz.

As ondas viajantes de corrente locais e remotas chegam com a mesma polaridade, com uma diferença de somente 0.9  $\mu$ s, apontando para um evento localizado em metade do comprimento da linha (10.243 milhas do terminal remoto).

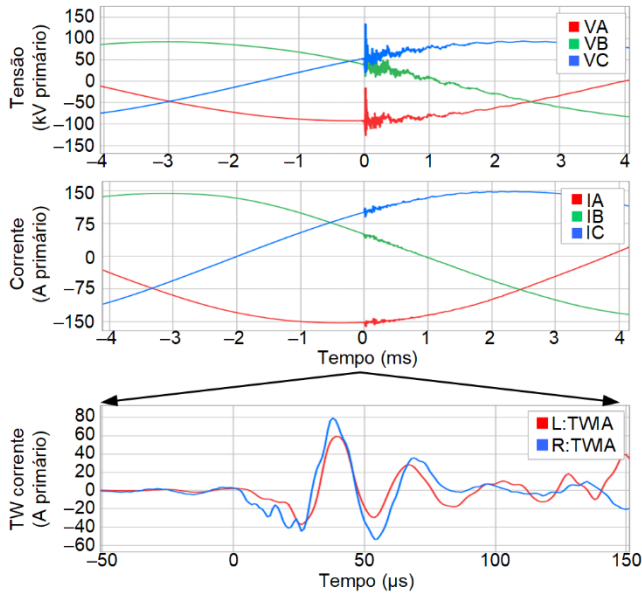


Fig. 10. Tensões e correntes locais, e ondas viajantes de corrente locais e remotas (registro de 1 MHz) para uma instalação piloto de 115 kV

A Fig. 11 mostra as tensões e correntes (a  $\pm 4$  ms do evento) e as ondas viajantes de corrente locais e remotas ( $-50$  a  $+150$   $\mu$ s) para um evento em uma linha de 69 kV, com extensão de 8.49 milhas em um sistema de 60 Hz.

As ondas viajantes de corrente locais e remotas chegam com a mesma polaridade, com uma diferença de 31.464  $\mu$ s, apontando para um evento localizado a 1.373 milhas do terminal remoto.

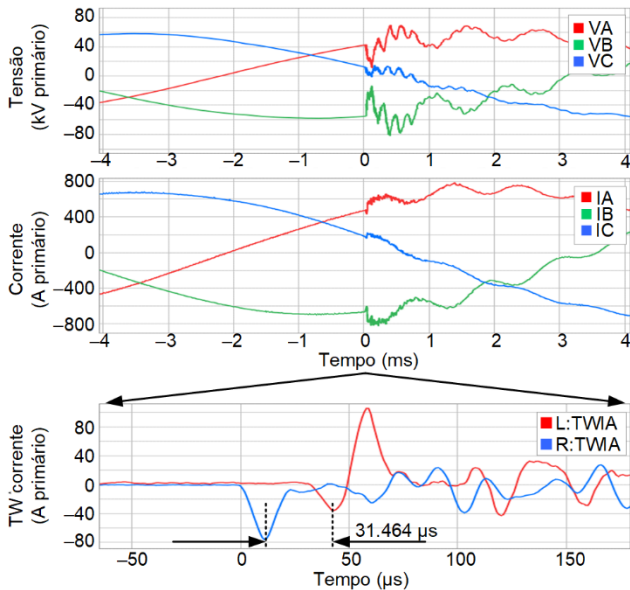


Fig. 11. Tensões e correntes locais, e ondas viajantes de corrente locais e remotas (registro de 1 MHz) para uma instalação piloto de 69 kV

## VII. CONCLUSÃO

Este artigo apresenta uma função de monitoramento de linha para monitoramento contínuo de linhas de transmissão de alta tensão para aplicação de manutenção preventiva através da identificação e localização de precursores de faltas utilizando ondas viajantes. Essa aplicação de monitoramento tem um alto potencial para reduzir o número de faltas em linhas e interrupções não-programadas. O artigo descreve a função em detalhes, compartilha sua implementação em uma plataforma de hardware de relé [2], e mostra diversos eventos de campo de instalações piloto. Espera-se que a lógica detecte contaminações e rachaduras de isoladores, aproximação da vegetação, faltas temporárias recorrentes, e assim por diante. Na época em que o artigo foi finalizado, foram capturados diversos eventos de campo de meia dúzia de instalações piloto, mas ainda não haviam sido inspecionadas as localizações suspeitas em busca de sinais de potenciais problemas pendentes. Tal validação positiva leva tempo pois estamos preocupados não com faltas na linha, mas com precursores de faltas, ou seja, potenciais faltas no futuro.

## VIII. REFERÊNCIAS

- [1] Kasztenny, B., Guzmán, A., Mynam, M. V., et al.: "Controlling Autoreclosing on Overhead Lines With Underground Cable Sections Using Traveling-Wave Fault Location Based on Measurements From Line Terminals Only," apresentado na 14a Conferência Internacional de Desenvolvimentos na Proteção de Sistemas Elétricos, Belfast, Reino Unido, Março de 2018.
- [2] Manual de Instruções do SEL-T400L. Disponível em: <https://selinc.com>.
- [3] Schweitzer, E. O., Kasztenny, B., Mynam, M., et al.: "New Time-Domain Line Protection Principles and Implementation," apresentado na 13a Conferência Internacional de Desenvolvimentos na Proteção de Sistemas Elétricos, Belfast, Reino Unido, Março de 2016.