

# Localização Rápida de Falhas Poupa Recursos e Melhora a Qualidade do Serviço

Artur Hoff, *Terna Plus*

Ricardo Abboud, Renan Bernardes e Paulo Lima  
*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Edição revisada lançada em outubro de 2021

Apresentada originalmente na  
48<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conference, outubro de 2021

Traduzido para o português em agosto de 2023

# Localização Rápida de Falhas Poupa Recursos e Melhora a Qualidade do Serviço

Artur Hoff, *Terna Plus*

Ricardo Abboud, Renan Bernardes e Paulo Lima, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

**Resumo** — Este artigo discute os conceitos, projeto, benefícios e implantação de um sistema de localização de faltas por ondas viajantes (TWFL) para um sistema de transmissão de 500/230 kV no Brasil com comprimentos de linha variando de 158 a 355 km (98 a 221 milhas). O sistema usa a infraestrutura de comunicação existente para enviar a localização precisa da falta em tempo real para o centro de controle, sem qualquer intervenção humana. O sistema também é capaz de monitorar a linha, fornecendo uma ferramenta importante para o pessoal de manutenção. A função de monitoramento preditivo de faltas detecta precursores de faltas ao longo da linha, como isoladores sujos ou rachados, defeitos incipientes em cabos, vegetação invasora, espaçamento marginal ou blindagem marginal contra raios. Este recurso é usado para reduzir o número de faltas nas linhas e para permitir a manutenção com base nas condições encontradas. O artigo também discute os conceitos de diferentes métodos de localização de faltas.

## I. INTRODUÇÃO

A desregulamentação dos mercados de energia em diferentes partes do mundo mudou a forma como Agentes de Transmissão (ATs) gerenciam e operam seus ativos, impondo requisitos de desempenho mais rígidos e rigorosos. Em tais mercados desregulamentados, como o mercado brasileiro, a remuneração dos ATs é baseada no período de tempo durante o qual os ativos estão disponíveis para transportar energia pelo sistema de transmissão, não com base no montante de energia que é realmente transmitido; no caso de uma linha de transmissão, os ganhos estão relacionados com o tempo em que a linha está em serviço. Pesadas penalidades financeiras são aplicadas quando a linha de transmissão é inesperadamente retirada de serviço, por exemplo, devido a uma falta permanente. Toda a receita mensal de uma linha de transmissão pode ser totalmente consumida pela cobrança de parcela variável em questão de horas, se a falta não for localizada e o problema resolvido rapidamente. O tempo necessário para colocar a linha em serviço novamente é frequentemente gasto na localização do ponto de falta, tornando a precisão de um sistema de localização de faltas de extrema importância para reduzir o tempo de recomposição da linha e minimizar penalidades.

A localização de faltas com base na impedância calculada em um terminal é um método comumente utilizado para ajudar as equipes de manutenção a encontrar faltas nas linhas de transmissão, mas é suscetível a imprecisões.

Modernos relés digitais tornaram possível amostrar sinais de tensão e corrente na taxa (frequência da ordem de 1 MHz) necessária para capturar informações de ondas viajantes (TW - *traveling-wave*). Essa nova tecnologia é a base para elementos

de proteção de ultra alta velocidade (UHS - *ultra-high-speed*), localização de falta por onda viajante de alta precisão (TWFL - *traveling-wave fault locating*) e oscilografia de alta resolução em relés de proteção. Os relés também armazenam registros oscilográficos, permitindo a análise de fenômenos transitórios rápidos no sistema de potência; esses registros agora estão disponíveis para qualquer linha de transmissão protegida com relés com capacidade de TW.

A TWFL é altamente precisa. Ela pode localizar a falha com uma precisão melhor de um vão de uma torre, independentemente do comprimento da linha, e pode, portanto, fornecer informações extremamente precisas sobre a localização da falta. Quando usada corretamente, a TWFL reduz drasticamente o custo de identificação do local onde há necessidade de reparo, em comparação com o respectivo custo dos métodos tradicionais. Portanto, a instalação de um sistema de TWFL é geralmente menos dispendiosa do que a perda econômica que ele poupa apenas em seu primeiro uso.

O crescimento da vegetação na faixa de servidão da linha é uma importante causa potencial de faltas permanentes. No entanto, em muitos casos, as primeiras faltas causadas pela vegetação são temporárias, portanto, um sistema de TWFL preciso pode identificar locais com faltas temporárias repetitivas antes que se tornem defeitos permanentes, dando às equipes de operação e manutenção a oportunidade de aparar a vegetação de maneira adequada em tempo hábil. Com isso, o sistema de TWFL ajuda a prevenir a ocorrência de faltas permanentes que causam interrupções no serviço, o que reduz penalidades e aumenta a confiabilidade do sistema de transmissão.

## II. FUNDAMENTOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Existem vários métodos de localização de faltas aplicáveis às linhas de transmissão, os quais podem ser divididos em duas categorias principais - métodos baseados em medição de impedância e métodos baseados em TW. Ambos os tipos de métodos têm vantagens e seus próprios desafios; portanto, aplicá-los juntos no mesmo dispositivo permite que eles se complementem. As seções a seguir fornecem uma breve descrição de alguns métodos comumente aplicados.

### A. Métodos Baseados em Medição de Impedância

#### 1) Localização de faltas baseada em medição de impedância em um terminal (SEZFL)

O método SEZFL (*Single-Ended Impedance-Based Fault Locating*) usa tensões e correntes medidas em uma única

extremidade da linha de transmissão, extrai suas componentes de frequência fundamental usando um filtro digital, calcula seus valores fasoriais, determina o tipo de falta e, finalmente, aplica uma equação baseada em impedância até a falta aos fasores do respectivo *loop* de falta para produzir uma estimativa de localização de falta. Este método está disponível na grande maioria dos relés de proteção de linhas de transmissão [1] [2].

A Fig. 1 apresenta um sistema elétrico simples de duas fontes onde uma falta ocorre a uma distância  $m$  (em por unidade de comprimento de linha) da Barra S. O método SEZFL calcula a localização da falta “ $m$ ” usando (1).

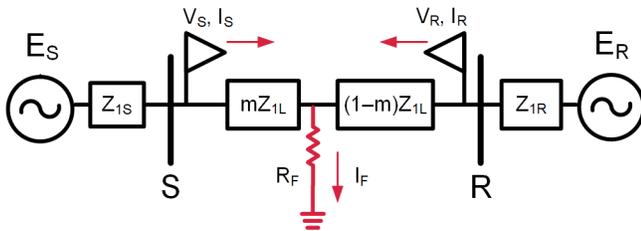


Fig. 1. Sistema exemplo com duas fontes.

$$m = \frac{\text{Im}(V_S \cdot [I_P]^* \cdot e^{-jT})}{\text{Im}(Z_{IL} \cdot I_S \cdot [I_P]^* \cdot e^{-jT})} \quad (1)$$

onde:

$m$  é a distância da Barra S até a falta em por unidade (pu ou  $0/1$ ) do comprimento de linha.

$V_S$  é a tensão medida no Terminal S para o *loop* de falta selecionado.

$I_S$  é a corrente medida no Terminal S para o *loop* de falta selecionado.

$I_P$  é a corrente de polarização selecionada de acordo com o tipo de falta.

$Z_{IL}$  é a impedância de sequência positiva da linha.

$T$  é o fator de correção da não homogeneidade.

O método SEZFL determina o *loop* de falta e seleciona as tensões e correntes a serem aplicadas em (1) de acordo com a Tabela I.

TABELA I  
TENSÕES E CORRENTE DOS *LOOPS* DE FALTA PARA SEZFL

| <i>Loop</i> | $V_S$                            | $I_S$                            | $I_P^\dagger$ |
|-------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------|
| AG          | $V_A$                            | $(I_a + 3 \cdot k_0 \cdot I_0)$  | $I_2$         |
| BG          | $V_B$                            | $(I_b + 3 \cdot k_0 \cdot I_0)$  | $I_2$         |
| CG          | $V_C$                            | $(I_c + 3 \cdot k_0 \cdot I_0)$  | $I_2$         |
| AB ou ABG   | $V_{AB}$                         | $I_{AB}$                         | $I_2$         |
| BC ou BCG   | $V_{BC}$                         | $I_{BC}$                         | $I_2$         |
| CA ou CAG   | $V_{CA}$                         | $I_{CA}$                         | $I_2$         |
| ABC         | $V_{AB}$ ou $V_{BC}$ ou $V_{CA}$ | $I_{AB}$ ou $I_{BC}$ ou $I_{CA}$ | $I_1$         |

<sup>†</sup> Há outras opções; a tabela apresenta a melhor opção.

O fator de compensação de sequência zero  $k_0$  é calculado pelo uso de (2).

$$k_0 = \frac{(Z_{0L} - Z_{1L})}{3Z_{1L}} \quad (2)$$

onde:

$Z_{1L}$  é a impedância de sequência positiva da linha.

$Z_{0L}$  é a impedância de sequência zero da linha.

A distância  $M$  em quilômetros ou milhas pode ser encontrada multiplicando  $m$  pelo comprimento total da linha ( $LL$ ), dado em quilômetros ou milhas, conforme mostrado em (3).

$$M = m \cdot LL \quad (3)$$

O método SEZFL tem sido usado por décadas em relés digitais com resultados práticos relativamente bons. A exatidão e a sensibilidade do método podem ser avaliadas usando (1) e resultados de cálculos de curto-circuito. A vantagem deste método é que não requer comunicação nem sincronização de tempo. No entanto, a exatidão do método é afetada pela resistência de falta combinada com o carregamento da linha, efeito das fontes intermediárias de corrente no sentido da falta (*infeed*), acoplamento mútuo de sequência zero, assimetria da linha de transmissão, resposta transitória de transformadores capacitivos de potencial (CCVTs - *capacitively-coupled voltage transformer*) e saturação de transformadores de corrente (CTs - *current transformers*). Mesmo com o uso de fator de correção de não homogeneidade e de polarização de corrente de sequência zero para faltas monofásicas (SLG - *single-phase-to-ground*), este método pode não produzir resultados ideais. O desempenho deste método é altamente dependente da exatidão dos valores das impedâncias de sequência positiva ( $Z_{1L}$ ) e de sequência zero ( $Z_{0L}$ ) da linha. O método não é aplicável a linhas com compensação série ou linhas híbridas (compostas por seções aéreas e subterrâneas).

## 2) Localização de falta baseada em medição de impedância em dois terminais (DEZFL)

O método DEZFL (*Double-Ended Impedance-Based Fault Locating*) usa tensões e correntes medidas em ambas as extremidades da linha de transmissão e requer um canal de comunicação para implementar a função DEZFL em tempo real em relés de proteção. O método também requer alinhamento de tempo dos dados medidos em ambos os terminais. Se um canal de comunicação não estiver disponível, o método pode ser aplicado *off-line* usando cálculos manuais ou automatizados.

O método DEZFL é baseado no perfil de tensão de sequência negativa ao longo da linha em falta para defeitos desequilibrados e no perfil de tensão de sequência positiva para defeitos desequilibrados. A Fig. 2 mostra os perfis de tensão para faltas entre fases e fase-terra.

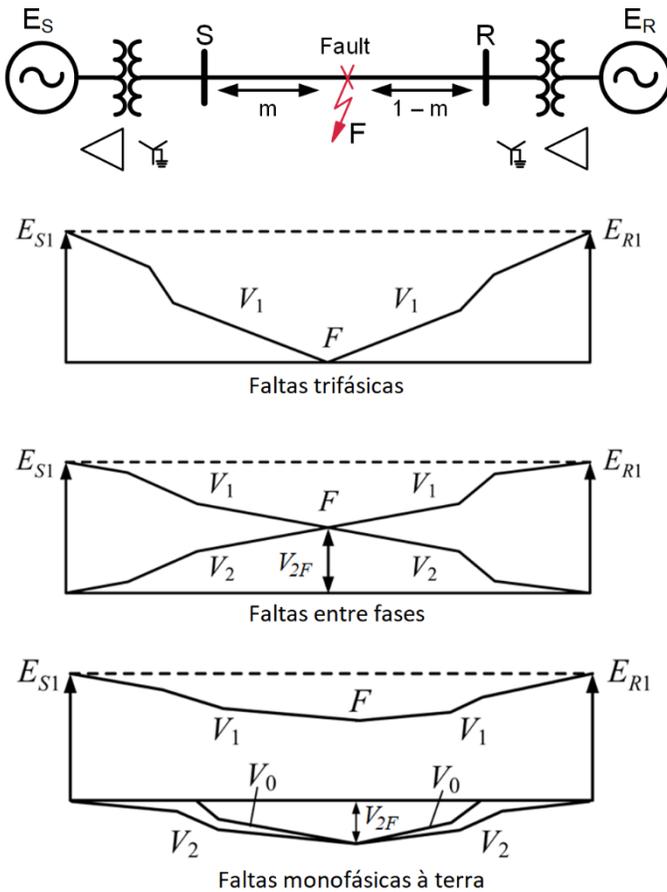


Fig. 2. Perfis de tensão ao longo da linha sob falta.

Podemos aplicar a lei de tensão de Kirchhoff no sistema equivalente mostrado na Fig. 2 quando as tensões e correntes estão disponíveis em ambos os terminais, como mostrado em (4) e (5) [3] [4].

$$V_F = V_S - mZ_{IL} \cdot I_S \quad (4)$$

$$V_F = V_R - (1-m)Z_{IL} \cdot I_R \quad (5)$$

onde:

$V_S$  é a tensão medida no Terminal S (tensão de sequência negativa para faltas desequilibradas e tensão de sequência positiva para faltas equilibradas).

$I_S$  é a corrente medida no Terminal S (corrente de sequência negativa para faltas desequilibradas e corrente de sequência positiva para faltas equilibradas).

$V_R$  é a tensão medida no Terminal R (tensão de sequência-negativa para faltas desequilibradas e tensão de sequência positiva para faltas equilibradas).

$I_R$  é a corrente medida no Terminal R (corrente de sequência negativa para faltas desequilibradas e corrente de sequência positiva para faltas equilibradas).

$V_F$  é a tensão no local da falta (tensão de sequência-negativa para faltas desequilibradas e tensão de sequência positiva para faltas equilibradas).

Resolvendo (4) e (5) para  $m$ , obtemos (6):

$$m = \frac{V_S - V_R + Z_{IL} \cdot I_S}{(I_S + I_R) \cdot Z_{IL}} \quad (6)$$

Quando um canal de comunicação direta entre os dispositivos instalados nos terminais S e R está disponível, o método DEZFL pode ser usado para localização de falta em tempo real. Se um canal não estiver disponível, podemos obter informações de tensão e corrente a partir das oscilografias do relé e realizar um cálculo *off-line* usando (6).

O método DEZFL não é afetado pela resistência de falta, carregamento de linha, não homogeneidade do sistema ou acoplamento mútuo de sequência zero, o que melhora a exatidão em comparação com o método SEZFL [4]. O método é fácil de implementar em relés diferenciais de linha e não requer sincronismo de tempo externo quando aplicado com alta largura de banda e canais de comunicação simétricos (como uma conexão direta de fibra óptica relé a relé).

As linhas não transpostas afetam a exatidão deste método, mas menos do que afetam o método SEZFL. O desempenho do método DEZFL dificilmente pode ser afetado por transitórios de CCVTs e saturação de TCs devido à componente exponencial decrescente, especialmente quando aplicado a terminais de linha que têm proteção UHS e disjuntores com tempo de interrupção de dois ciclos.

Como ocorre com o método SEZFL, a exatidão de DEZFL depende da exatidão do parâmetro  $Z_{IL}$ , mas não depende de  $Z_{0L}$ .

Ambos os métodos baseados em impedância têm limitações para aplicações em linhas com compensação série. Além disso, a redução no tempo de eliminação de faltas assegurada por relés modernos reduz as informações disponíveis para métodos de localização de faltas baseados em impedância e afeta seu desempenho. Para se ter um cálculo confiável, os fasores devem ser estimados após desaparecerem os transitórios nos sinais medidos e antes que os transitórios criados pela abertura do disjuntor apareçam. Com a curta duração da falta em sistemas de extra alta tensão (EHV - *extra-high voltage*) e ultra alta tensão (UHV - *ultra-high voltage*) (aproximadamente dois ciclos quando a proteção UHS é aplicada), praticamente não há tempo para os sinais medidos se estabilizarem [5]

## B. Métodos Baseados em Ondas Viajantes

### 1) Localização de faltas baseada em ondas viajantes de dois terminais (DETWFL)

O método DETWFL (*Double-Ended Traveling-Wave-Based Fault Locating*) usa os tempos de chegada das primeiras TWs em ambas as extremidades da linha para localizar a falta.

A Fig. 3 mostra uma falta em uma linha de transmissão a uma distância  $M$  do Terminal S. A falta propaga duas ondas que viajam da localização da falta em direção aos Terminais S e R. Em linhas aéreas, a velocidade das TWs é próxima à velocidade da luz.

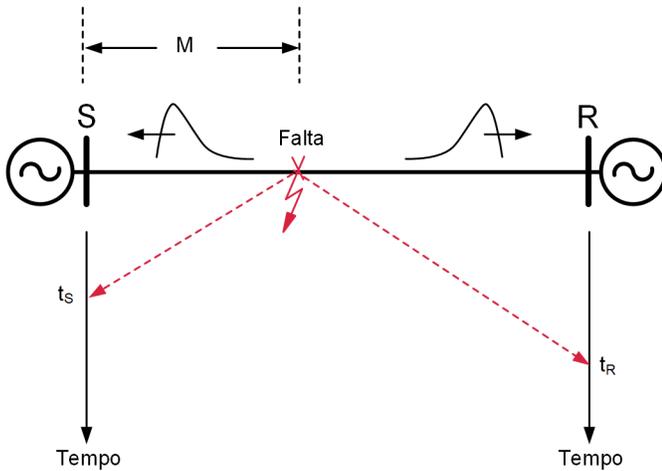


Fig. 3. A falta propaga TWs que se deslocam em direção às extremidades da linha.

A Fig. 3 também mostra o diagrama de Bewley representando as TWs no plano distância-tempo [6]. Os tempos de chegada das primeiras TWs nos terminais S e R são  $t_s$  e  $t_r$ , respectivamente. Supondo que a falta esteja mais próxima do Terminal S,  $t_s < t_r$ . Para este caso, o método DETWFL usa (7) para localizar a falha [6].

$$M = \frac{LL}{2} \left[ 1 + \frac{t_s - t_r}{TWLPT} \right] \quad (7)$$

onde:

M é a distância para a localização da falha de S em quilômetros ou milhas.

LL é o comprimento total da linha em quilômetros ou milhas.

$t_s$  é o tempo de viagem das TWs até o Terminal S.

$t_r$  é o tempo de viagem das TWs até o Terminal R.

TWLPT é o tempo de propagação de TW de uma ponta até a outra ponta na linha de transmissão.

O tempo de propagação de TW (TWLPT) pode ser medido durante o comissionamento, executando um teste de energização da linha.

O método DETWFL adquire e filtra os sinais de entrada de corrente, extrai e processa os sinais de TWs e marca o instante de chegada das TWs com precisão de microssegundos ou melhor. O relé de cada terminal da linha envia as informações de tempo de chegada com registro de data e horário para o relé do outro terminal da linha. As referências [6] e [7] discutem os requisitos para executar essas tarefas de forma confiável.

Como a resposta de frequência dos TCs é melhor do que a dos CCVTs ou dos transformadores indutivos de potencial (VTs - *voltage transformers*), é preferível usar correntes para TWFL.

O método DETWFL, como os dois métodos baseados em impedância discutidos anteriormente, pode ser implementado em um localizador de falta autônomo ou podem ser incorporados em um relé digital de proteção.

Para localização de falta em tempo real, o método requer um canal de comunicação conectando os relés de proteção em ambas as extremidades da linha, que pode ser o mesmo canal

usado para o esquema diferencial de corrente de linha ou pode ser uma porta de comunicação dedicada para troca de dados DETWFL. A Fig. 4 mostra um exemplo usando um canal de comunicação multiplexado, onde cada relé se conecta ao multiplexador por meio de uma placa de comunicação IEEE C37.94. Em tais aplicações, uma fonte de tempo externa, como um relógio (*clock*) do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite System*), é necessária para marcar o horário das TWs medidas com a exatidão necessária; então, os valores  $t_s$  e  $t_r$  resultantes são enviados em tempo real entre os dois relés e usados em (7) para calcular m.

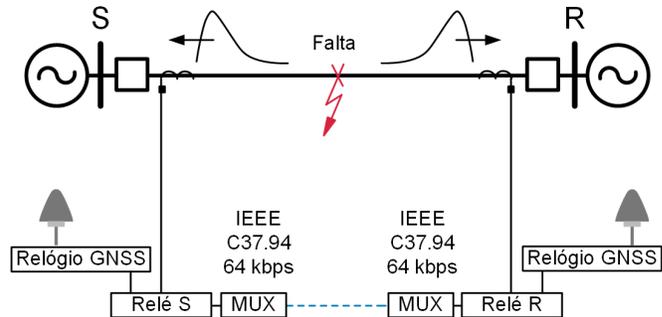


Fig. 4. Implementação de DETWFL com um canal de comunicação multiplexado.

Para aplicações em que uma fibra óptica dedicada está disponível para conectar diretamente os relés, conforme mostrado na Fig. 5, um relógio GNSS não é necessário para DETWFL. A sincronização do tempo pode ser realizada através do canal direto de comunicação. A eliminação da sincronização de tempo externa adicional naturalmente torna o sistema mais confiável e robusto.

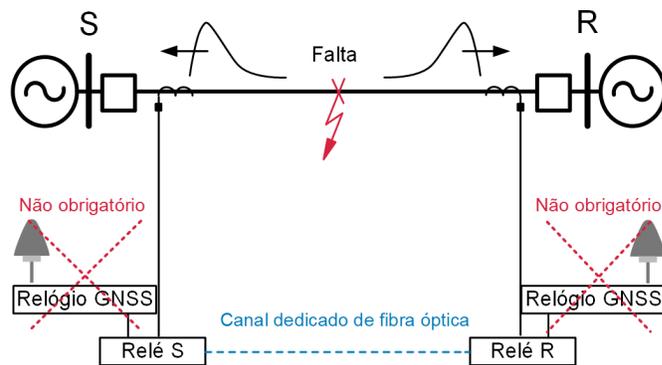


Fig. 5. Implementação de DETWFL com canal direto de comunicação de fibra óptica.

As informações de localização de faltas pelo método DETWFL podem ser enviadas em tempo real para um centro de controle usando a infraestrutura de automação da subestação, conforme mostrado na Fig. 6. Diferentes opções de protocolos de comunicação estão disponíveis, como DNP3, IEC 61850, Modbus, IEC 60870-5-101, IEC 60870-5-104 e mais. Não é necessário instalar nenhum *software* ou dispositivo adicional no centro de controle para cálculos *off-line*. Uma falha na comunicação de uma das subestações para a central de controle não invalida o método DETWFL, pois as informações

de localização da falta podem ser enviadas pelo relé instalado na outra subestação.

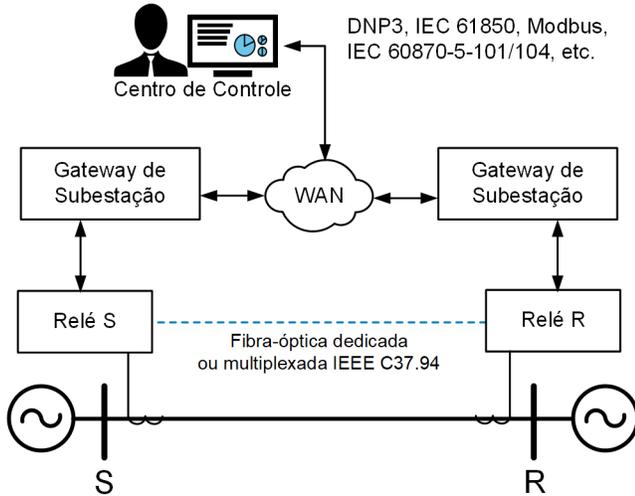


Fig. 6. Os relés com função DETWFL podem enviar informações de localização de faltas diretamente para um centro de controle usando diferentes protocolos.

Em aplicações onde um canal de comunicação entre os relés não está disponível, é possível coletar o tempo de chegada das TWs de ambos os relés por meio de comunicação remota e realizar um cálculo *off-line* usando (7) [8].

Os resultados de campo mostraram que o método de localização de faltas DETWFL pode atingir uma exatidão de 300 m (1.000 pés) em média, ou cerca de um vão de torre, para linhas de qualquer comprimento [9].

Em aplicações onde os cabos dos secundários dos TCs têm diferenças consideráveis de comprimento, causando diferenças significativas no tempo de propagação de TW nos terminais da linha, a precisão do método DETWFL pode ser afetada. Assumindo que a velocidade de propagação TW para cabos seja 70 por cento da velocidade da luz no espaço livre, 50 m de diferença no comprimento do cabo entre os terminais de linha pode resultar em 36 m de erro de localização de falha para o método DETWFL em uma linha aérea [9].

O método DETWFL pode compensar o atraso dos cabos entre os TCs e o relé, modificando (7) para incluir o atraso de propagação nos cabos dos TCs, conforme mostrado em (8).

$$M = \frac{LL}{2} \left[ 1 + \frac{(t_s - TWCT_S) - (t_R - TWCT_R)}{TWLPT} \right] \quad (8)$$

onde:

$M$  é a distância para a localização da falha de S em quilômetros ou milhas.

$LL$  é o comprimento total da linha em quilômetros ou milhas.

$t_s$  é o tempo de viagem das TWs até o Terminal S.

$t_R$  é o tempo de viagem das TWs até o Terminal R.

$TWCT_S$  é o tempo de propagação das TWs nos cabos dos TCs no Terminal S.

$TWCT_R$  é o tempo de propagação das TWs nos cabos dos TCs no Terminal R.

$TWLPT$  é o tempo de propagação de TW de uma ponta até outra ponta na linha de transmissão.

O método DETWFL supera as seguintes limitações dos métodos de localização de faltas baseados em impedância:

- A exatidão não depende das impedâncias  $Z_{IL}$  e  $Z_{OL}$ .
- O método é aplicável a linhas com compensação série.
- O método não é afetado pela resistência de falta, carregamento de linha, acoplamento mútuo de sequência zero, *infeed* ou não homogeneidade do sistema.
- O método é aplicável em linhas híbridas quando é implementada a compensação adequada.
- Com a exatidão aprimorada propiciada por este método, o valor da localização da falta pode ser usado para inibir o religamento automático do disjuntor em tempo real, dependendo da localização da falta. Esta é uma boa solução para implementar o religamento automático adaptativo em linhas híbridas, permitindo o religamento automático para faltas em seções aéreas e o seu bloqueio para faltas em seções subterrâneas.

## 2) Localização de faltas baseada em ondas viajantes de um terminal (SETWFL)

O método SETWFL usa a diferença de tempo entre a chegada da primeira TW vinda diretamente da falta e a chegada da primeira TW refletida da falta para estimar a localização da falta [10].

A Fig. 7 mostra o diagrama de Bewley para uma falta em uma linha de transmissão. A falta está a uma distância  $M$  do Terminal S e a uma distância  $LL - M$  do Terminal R. Uma TW emitida no local da falha chega ao Terminal S no tempo  $t_{s1}$ . Parte da onda reflete, viaja de volta para a falta, reflete novamente na falta e, então, chega ao Terminal S no tempo  $t_{s3}$ . Durante o intervalo de tempo  $(t_{s3} - t_{s1})$ , a TW percorreu uma distância igual a  $2M$ .

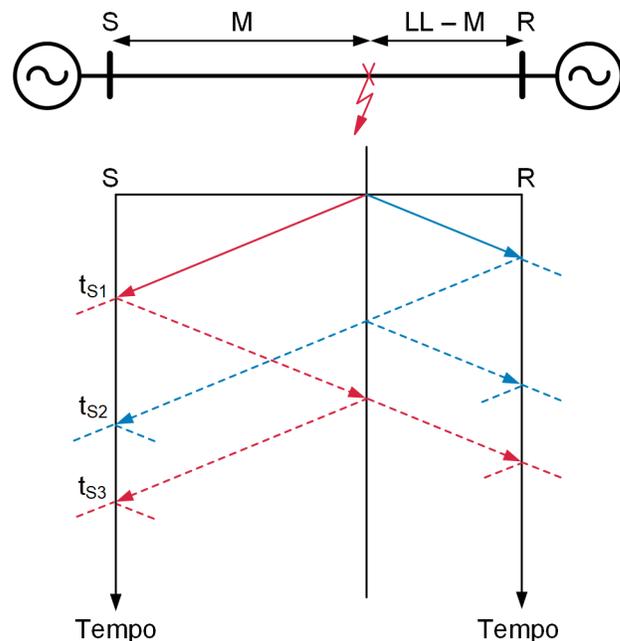


Fig. 7. Diagrama de Bewley explicando o método SETWFL.

Conforme mencionado anteriormente, o tempo de propagação da linha de transmissão TWLPT é um parâmetro conhecido, que é medido durante o comissionamento através da realização de um teste de energização da linha. O método usa (10) para calcular  $M$  [10].

$$2 \cdot M = (t_{s3} - t_{s1}) \cdot \frac{LL}{TWLPT} \quad (9)$$

$$M = \frac{(t_{s3} - t_{s1}) \cdot LL}{2 \cdot TWLPT} \quad (10)$$

O método SETWFL funciona bem se identificar corretamente o tempo de chegada da primeira TW que retorna da falta (tempo  $t_{s3}$ ). Se, em vez disso, o método SETWFL usar o tempo de chegada de alguma outra reflexão de onda como o primeiro retorno da falta, o resultado da estimativa da localização da falha seria totalmente incorreto. Com referência à Fig. 7, a primeira TW que chega ao Terminal R reflete do barramento, retorna ao Terminal S, refrata através do ponto de falha e chega ao Terminal S no tempo  $t_{s2}$ . Se o método SETWFL usar  $t_{s2}$  como o tempo de chegada da primeira TW que retorna da falta, o resultado da localização será incorreto. A referência [10] discute maneiras inovadoras de implementar o método SETWFL e como identificar corretamente as reflexões do ponto de falha.

O método SETWFL usa apenas estampas de tempo locais e, portanto, é imune a erros e tolerâncias no alinhamento de tempo entre os relés locais e remotos. Consequentemente, este método pode ser ainda mais preciso do que o método DETWFL, se a primeira reflexão da falta puder ser encontrada corretamente. O método não é afetado por falhas no sistema de sincronização de tempo global, tornando-se um esquema de *backup* natural para métodos que requerem tal sincronização de tempo.

### III. FUNÇÃO DE MONITORAMENTO DA LINHA

A maioria das faltas em sistemas elétricos ocorre em linhas de transmissão aéreas. Ao usar o ar como isolante e se estender por dezenas ou centenas de quilômetros, as linhas aéreas são expostas a condições que acabam por causar faltas. Algumas causas de faltas em linhas desenvolvem-se ao longo de dias, semanas ou até meses, incluindo vegetação invasora, contaminação de isoladores por produtos químicos ou dejetos de pássaros e envelhecimento. Com a degradação gradual do isolamento, uma linha de transmissão pode apresentar precursores de faltas - eventos que não são permanentes, mas eventos de baixa energia que duram menos de um milissegundo, causando apenas transientes na rede. Os relés convencionais de proteção de linha não incluem nenhuma função dedicada para detectar, registrar ou responder a esses precursores de falta [11]. Os relés UHS que dispõem do DETWFL e da gravação de faltas de alta precisão agora tornaram possível criar funções para rastrear esses precursores e tomar as medidas adequadas.

A Fig. 8 mostra um precursor de falta capturado em um registro oscilográfico de alta resolução (taxa de amostragem de 1 MHz) cinco ciclos antes da ruptura do isolamento que causou uma falta na linha de transmissão. Normalmente, os precursores

da falta não acontecem imediatamente antes do defeito real; eles podem aparecer dias, semanas ou meses antes, como já declarado. O gráfico TWIA\_ALPHA mostra o sinal de saída do filtro que extrai o componente alfa TW das correntes de fase [6].

Uma vez que uma corrente precursora de falta atinge um nível de algumas dezenas de amperes primários, ela pode ser detectada nos terminais da linha pela função DETWFL. No entanto, o precursor de falta não é classificado como uma falta, mas é classificado como um evento de baixa energia, uma vez que não há atuação do elemento de proteção. A função DETWFL pode reportar a localização do precursor de falta com precisão; o DETWFL só precisa detectar e registrar o horário das primeiras ondas causadas pelo evento em ambas as extremidades da linha.

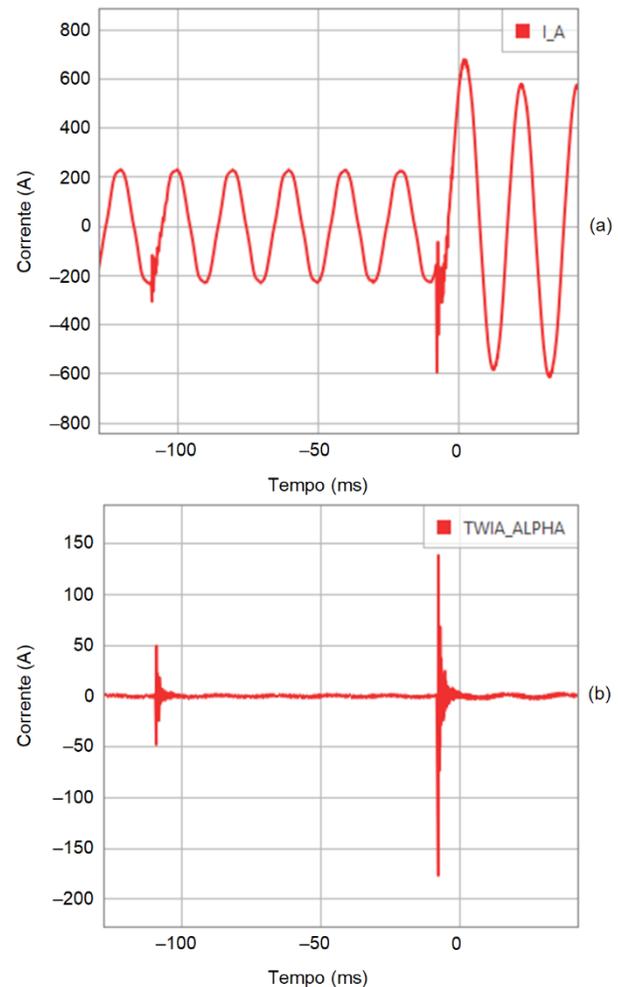


Fig. 8. Oscilografia de alta resolução mostrando (a) o precursor de falta no sinal de corrente bruto e (b) a correspondente componente alfa TW extraído do sinal de corrente bruto.

Algumas das causas dos precursores de falta são as seguintes [11]:

- Contaminação de isoladores com dejetos de pássaros.
- Contaminação química/poluição de isoladores.
- Vegetação crescendo sob a linha de transmissão.
- Fogo na faixa de servidão.
- Envelhecimento e falhas ocultas no isolador

O monitoramento dos precursores de faltas permite que os usuários prevejam um certo número de faltas nas linhas de transmissão. As equipes de manutenção de linha podem tomar medidas antes que ocorra uma falta que faça com que a linha de transmissão seja desligada inesperadamente, com possíveis consequências graves para o sistema elétrico. Esta função de monitoramento é especialmente importante em mercados de energia onde os ATs são penalizados por interrupções inesperadas de linhas de transmissão com duração superior a um certo tempo.

A função de monitoramento de linha (LIMO - *line-monitoring function*) divide a linha de transmissão em  $n$  seções, com cada seção representando um lote (ver Fig. 9). Cada lote possui um contador que acumula o número de eventos localizados dentro desse lote. Quando um evento é detectado, a função DETWFL determina o local do evento e a função LIMO incrementa o contador associado ao lote onde o evento está localizado. A função LIMO emite um alarme quando o contador atinge um limite configurável.



Fig. 9. A função LIMO divide a linha em lotes e conta o número de eventos de falta e de baixa energia localizados em cada lote.

A referência [11] descreve uma função LIMO disponível em relés comerciais de proteção de linha. O LIMO usa a função DETWFL e tem os seguintes recursos principais:

- O LIMO é acionado pelas TWs geradas por precursores de falta (com ou sem operação de proteção).
- A função DETWFL localiza eventos com alta precisão usando dados de dois terminais.
- O LIMO classifica eventos para os locais ao longo da linha e incrementa o contador associado ao lote correspondente à seção específica da linha.
- O LIMO emite um alarme se para um determinado lote a soma do contador do lote em questão com os contadores dos lotes adjacentes exceder o limite definido pelo usuário e o lote em questão for o que apresentar o maior valor entre os três lotes.

Quando o LIMO emite um alarme indicando que uma localização da linha de transmissão está passando por um grande número de precursores de falta, o AT pode tomar as seguintes ações antes que ocorra uma falta na linha de transmissão:

- Despachar a equipe de manutenção de linha para o local indicado pelo LIMO
- Encontrar e corrigir o problema limpando isoladores sujos, aparando vegetação, instalando amortecedores ou espaçadores na linha etc.
- Reinicializar o contador de eventos do lote que acionou o alarme após a manutenção adequada

#### IV. REGULAMENTAÇÃO DE QUALIDADE DO SERVIÇO DE TRANSMISSÃO NO BRASIL

Em alguns países, os ganhos dos ATs são baseados na energia transportada por linhas de transmissão e outros ativos. Nesse cenário, a energia que flui pelas instalações de transmissão é determinada periodicamente para calcular o valor total em dinheiro a ser recebido pelo AT como receita.

Essa forma de receita pelos serviços de transmissão induz os ATs a operar o sistema de transmissão em capacidade máxima e a reduzir ao máximo a indisponibilidade dos equipamentos. Se os ATs não conseguem atingir esses objetivos, suas receitas diminuem.

No Brasil, a receita recebida pelos ATs quanto aos serviços de transmissão não se baseia na energia transportada por meio de ativos de transmissão. A receita é definida quando o AT obtém um contrato de concessão para fornecer um determinado serviço e instalar o ativo de transmissão correspondente. Essa receita está associada à disponibilização de equipamentos para uso no Sistema Interligado Nacional (SIN) pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). O contrato de concessão define uma receita anual (RA) recebida pelo AT pelos ativos incluídos no contrato. A RA é recebida pelo AT em um ano, se os ativos tiverem sido disponibilizados para o ONS; porém, no caso de indisponibilidade do ativo superior a um minuto, é aplicada uma penalidade monetária, com a consequente redução do lucro, conforme explicado posteriormente nesta seção.

Os ATs brasileiros recebem uma receita mensal (RM) por cada linha de transmissão de sua propriedade, correspondente a um duodécimo (1/12) da RA acordada conforme definido no contrato de concessão. Um valor denominado parcela variável (PV), calculado com base na indisponibilidade de cada linha de transmissão, pode ser deduzido dessa receita mensal. Assim, o contrato que os ATs firmam com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define as condições de apuração da receita mensal, bem como os cálculos dos descontos por indisponibilidade dos ativos.

A penalidade de PV é composta de três partes, (1) penalidade devido a atrasos na energização, (2) penalidade devido a restrições operacionais, incluindo redução da capacidade de transmissão do ativo e (3) penalidade devido a interrupções do funcionamento do ativo. Existem interrupções programadas por motivos como atividades de manutenção ou substituição de equipamentos e há interrupções inesperadas, como aquelas causadas por faltas permanentes na linha de transmissão. Há um valor de tempo permitido para a manutenção programada e a penalidade é aplicada apenas se a interrupção exceder esse tempo.

A PV foi criada com o objetivo de melhorar a qualidade do serviço de transmissão prestado pelos ATs brasileiros que possuem ativos conectados à Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN). O objetivo das penalidades é incentivar os ATs a melhorar o desempenho e a eficácia de seus procedimentos de manutenção, reduzindo assim as interrupções nos ativos de transmissão.

Este artigo enfoca as penalidades devido às interrupções inesperadas, uma vez que geralmente são causadas por faltas. Saber a localização da falta com precisão pode reduzir a duração da indisponibilidade da linha. A parcela PV devido às interrupções inesperadas é calculada de acordo com (11) [12].

$$PV = \frac{RM}{1440 \cdot D} (K_0 \cdot \sum_{i=1}^{NO} UO_i) \quad (11)$$

onde:

PV é a parcela variável a ser subtraída da receita mensal do ativo de transmissão específico devido à indisponibilidade causada por interrupções inesperadas naquele mês.

RM é a receita mensal para o ativo de transmissão específico. É igual a RA/12.

D é o número de dias do mês em consideração.  $K_0$  é a constante de multiplicação das interrupções inesperadas do ativo. Para uma linha de transmissão aérea,  $K_0 = 150$  para os primeiros 300 minutos de interrupção, daí em diante a constante é reduzida para 10.

NO é o número de interrupções inesperadas da linha de transmissão para o mês em consideração.

$UO_i$  é a duração em minutos da interrupção inesperada da linha de transmissão  $i$ .

Determinadas situações de indisponibilidade de linhas de transmissão não são consideradas para o cálculo do valor de PV, tais como:

- Interrupções da linha de transmissão por menos de um minuto.
- Interrupções da linha de transmissão solicitadas pelo ONS por razões operativas.
- Interrupções da linha de transmissão solicitadas pelo AT por questões de segurança pessoal.
- Interrupção da linha de transmissão devido a uma contingência em outro ativo do sistema de transmissão, como desligamento da linha por proteção backup remota, exceto nos casos de desligamento incorreto do sistema de proteção ou erro do AT na observância de procedimentos predefinidos.
- Interrupções da linha de transmissão devido à operação correta de esquemas de ação corretiva.
- Interrupções da linha de transmissão durante os primeiros seis meses de operação.
- Interrupção da linha de transmissão devido a condições de força maior, atos de sabotagem ou terrorismo, estado de emergência declarado pelas autoridades locais ou questões de segurança de terceiros, entre outros.

A referência [13] fornece um exemplo de penalidade aplicada no Brasil para uma única interrupção de dois minutos em uma linha de transmissão de 345 kV, onde o valor de RM é US \$658.681,45 em dólares dos Estados Unidos (USD). Todos os valores monetários estão em dólares americanos e representam a taxa de câmbio de reais (BRL) para dólares americanos no momento e mês da interrupção. O valor PV calculado por (11) para a interrupção mencionada é US \$4.574,17, equivalente a US \$ 2.287,08/minuto.

Cada minuto economizado em uma interrupção de linha de transmissão representa um valor considerável em dinheiro, tornando um sistema de localização de faltas confiável e preciso um requisito importante para qualquer AT. Além disso, se o sistema incluir a funcionalidade LIMO, é possível atuar na causa raiz das falhas incipientes antes que elas causem uma falta permanente e uma interrupção da linha, conforme explicado na Seção III.

O sistema de transmissão brasileiro é composto por muitas linhas longas, várias delas com trechos de difícil acesso. Enviando equipes para encontrar a falta sem informações precisas sobre sua localização aumenta a duração da interrupção e a perda monetária.

Como já mencionado, a vegetação crescendo abaixo da linha é uma causa potencial de faltas permanentes. As primeiras faltas causadas pela vegetação frequentemente não são permanentes. Se a localização do trecho problemático pode ser identificada pelo sistema preciso de localização de faltas e LIMO, então pode ser realizada a poda da vegetação antes que crie uma falta permanente.

A referência [14] é o aviso de uma multa de US \$225.000,00 imposta a um AT nos Estados Unidos por faltas sustentadas causadas por vegetação crescendo sob uma linha de transmissão. De acordo com o aviso de penalidade, a equipe foi despachada após uma segunda paralisação momentânea na tentativa de encontrar a causa raiz dos dois desligamentos automáticos da linha de transmissão. No entanto, a equipe não encontrou o local com vegetação rasteira porque não tinha informações precisas sobre a localização e a área era de difícil acesso. Depois de uma terceira viagem à região afetada, uma equipe aérea foi enviada e finalmente localizou a causa. Se um sistema preciso de localização de faltas tivesse sido implementado, a equipe terrestre poderia ter sido enviada para o local problemático imediatamente e o custo adicional da equipe aérea e o aumento da penalidade poderiam ter sido evitados.

A regulamentação brasileira também exige que os ATs informem às autoridades competentes as causas das interrupções inesperadas das linhas de transmissão. Sem saber a localização exata da falta, essa tarefa pode ser quase impossível. É difícil inspecionar cada seção da linha de transmissão na tentativa de localizar isoladores com defeito ou invasão de vegetação que poderia ter causado uma falta. Um sistema de localização de faltas acurado forneceria um auxílio inestimável para a criação de relatórios de falhas obrigatórios exigidos por agências regulatórias e operadores independentes.

## V. ESTATÍSTICAS DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SIN

A Tabela II mostra as principais causas (embora não todas as causas) de interrupções inesperadas nas linhas de transmissão no sistema elétrico brasileiro, considerando um número total de aproximadamente 12.000 eventos de 2016 a 2020 [15].

TABELA II  
PRINCIPAIS CAUSAS DE DESLIGAMENTOS FORÇADOS  
DE LTs DO SIN ENTRE 2016 E 2020

| Causa  | 2016  | 2017  | 2018  | 2019  | 2020  |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Raio   | 24,8% | 26,9% | 27,2% | 27,7% | 22,8% |
| Indeterminada                                | 22,2% | 13,2% | 15,9% | 13,8% | 12,5% |
| Queimada                                     | 19,2% | 25,1% | 14,9% | 22,9% | 32,2% |
| Vegetação                                    | 8,5%  | 8,1%  | 9,2%  | 7,8%  | 7,0%  |
| Tempestade                                   | 4,7%  | 3,0%  | 3,3%  | 2,1%  | 2,7%  |
| Vento  | 3,2%  | 4,2%  | 2,9%  | 5,4%  | 6,0%  |
| Ruptura de condutor                          | 1,0%  | 1,1%  | 0,8%  | 1,7%  | 0,9%  |
| Dejetos de aves                              | 3,4%  | 3,6%  | 9,3%  | 4,1%  | 5,5%  |
| Queda de torre                               | 1,5%  | 0,4%  | 0,8%  | 0,6%  | 0,4%  |
| Contaminação de isoladores                   | 2,1%  | 3,3%  | 2,2%  | 1,0%  | 0,5%  |
| Defeito em transformadores para instrumentos | 0,7%  | 0,4%  | 1,0%  | 1,4%  | 1,0%  |

O SIN tinha 1.249 linhas de transmissão no final de 2020, totalizando 147.928 km (91.918 milhas), o que dá um comprimento médio de cerca de 119 km/linha (74 milhas/linha [15].

Apesar da solicitação da agência reguladora ANEEL aos ATs de informar a causa dos desligamentos das linhas de transmissão, muitas são as ocorrências em que a causa é indeterminada. A falta de informações precisas sobre a localização de faltas para linhas de transmissão longas que cruzam terrenos de difícil acesso é um fator que contribui para esse alto número de causas indeterminadas de desligamento automático de linhas. A Tabela II mostra uma redução significativa na classificação de causa indeterminada para desligamento automático de linhas de 2016 a 2020. Essa redução se deve principalmente à campanha da ANEEL, que trabalhou individualmente com os ATs desde 2016 para solicitar planos de melhoria para análise de interrupções de linhas de transmissão [15].

A localização precisa da falta e as informações de registro de eventos de alta resolução podem ser extremamente úteis para determinar a causa das faltas na linha e para realizar a manutenção necessária ou as ações de reparo. Essa abordagem reduz o número de interrupções futuras causadas por motivos semelhantes, aumenta a disponibilidade da linha de transmissão e melhora a confiabilidade do sistema elétrico.

Conforme mencionado na Seção III, a função LIMO tem o potencial de detectar e localizar eventos precursores associados às seguintes causas:

- Contaminação de isoladores por dejetos de aves.
- Contaminação de isoladores por rejeitos químicos ou poluição.
- Crescimento da vegetação sob a linha de transmissão.

- Fogo ao longo da faixa de servidão.
- Deterioração de isoladores por envelhecimento ou falhas ocultas.

Estas possíveis causas de falta representam cerca de 33 por cento das causas de falhas nas linhas relatadas na Tabela II.

## VI. TERNA PLUS - ESTUDO DE CASO

Além de ser responsável por outros ativos, a Terna Plus é responsável pela operação de duas linhas de transmissão pertencentes ao SIN. Esta seção apresenta as características técnicas dessas linhas de transmissão e os detalhes contratuais das concessões. Também analisamos as interrupções nas linhas e explicamos as motivações que levaram a Terna Plus a adotar um sistema de localização de faltas e monitoramento preditivo para essas linhas de transmissão.

### A. LT 500 kV Cuiabá - Jauru C2 (TL1)

A LT 500 kV Cuiabá - Jauru C2 (TL1) foi energizada pela primeira vez em abril de 2019. Essa linha de 500 kV em circuito único tem 355 km (221 milhas) e interliga as subestações Jauru e Cuiabá. A linha é conectada a arranjos de barramento duplo com disjuntor e meio em ambos os terminais.

De acordo com [16], a AR para a TL1 é de US \$16.805.555,00 considerando a taxa de câmbio de R\$ para US \$ na data da assinatura do contrato de concessão (11 de março de 2016), resultando em uma RM de US \$1.400.462,00 Usando (11), podemos calcular a penalidade por minuto para interrupções inesperadas de linha que se enquadram nas condições descritas na Seção IV, considerando um mês de 30 dias:

$$PV = \frac{1.400.462}{1440 \cdot 30} (150 \cdot 1) = \text{US } \$4.862/\text{minute} \quad (12)$$

Evitar apenas três minutos de interrupções inesperadas para esta linha de transmissão específica economiza o suficiente em taxas de penalidade para justificar a instalação de um moderno relé digital de proteção que inclui um sistema multimétodo sofisticado e acurado de localização de faltas.

A Tabela III mostra o número de interrupções inesperadas para a TL1 e as causas em 2019 e 2020.

TABELA III  
DESLIGAMENTOS FORÇADOS POR CAUSAS INTERNAS—TL1

| Causa         | 2019 | 2020 |
|---------------|------|------|
| Raio          | 1    | 1    |
| Fogo          | 1    | 0    |
| Indeterminada | 6    | 8    |
| Total         | 8    | 9    |

### B. LT 230 kV Santa Maria 3 - Santo Ângelo 2 C1 (TL2)

A LT 230 kV Santa Maria 3 - Santo Ângelo 2 C1 (TL2) foi energizada pela primeira vez em outubro de 2018. Essa linha de circuito único de 230 kV tem uma extensão de 159,83 km (99 milhas) e interliga as subestações Santo Ângelo 2 e Santa Maria 3. A linha é conectada a arranjos de barramento duplo com disjuntor e meio em ambos os terminais.

De acordo com [17], a RA para a TL2 é de US\$ 4.435.850,00 considerando a taxa de câmbio de R\$ para US\$ na data de assinatura do contrato de concessão (18 de janeiro de 2016), resultando em um RM de US\$ 369.655,00 Usando (11), podemos calcular a penalidade por minuto para interrupções de linha inesperadas que se enquadram nas condições descritas na Seção IV, considerando um mês de 30 dias:

$$PV = \frac{369.655}{1.440 \cdot 30} (150 \cdot 1) = \text{US\$ } 1.284/\text{minute} \quad (13)$$

No caso desta linha de transmissão, evitar apenas dez minutos de interrupções inesperadas justifica a instalação de um moderno relé digital de proteção que inclui um sistema multimétodo sofisticado e preciso de localização de faltas.

A Tabela IV mostra o número de interrupções inesperadas para TL2 e as causas em 2019 e 2020.

TABELA IV  
DESLIGAMENTOS FORÇADOS POR CAUSAS INTERNAS—TL2

| Causa         | 2019 | 2020 |
|---------------|------|------|
| Raio          | 4    | 7    |
| Fogo          | 0    | 0    |
| Indeterminada | 3    | 2    |
| Total         | 7    | 9    |

### C. Solução de Localização de Faltas e Monitoramento de Linha

Quando as linhas TL1 e TL2 foram energizadas, apenas o método SEZFL, disponível nos relés de proteção de linha, foi usado para localização de falta. A dificuldade em localizar e identificar a causa de interrupções inesperadas de linha é evidente a partir das causas indeterminadas para interrupções de linha mostradas nas Tabelas III e IV. Mesmo nos casos em que a linha é religada automaticamente com sucesso, uma falha na identificação do local da falta e da causa da interrupção é crítica porque a falta pode ocorrer novamente no mesmo local e pelo mesmo motivo. Identificar locais de falhas repetitivas é a chave para evitar futuras faltas permanentes que causem interrupções inesperadas da linha, o que reduzirá penalidades de custo elevado, conforme discutido nas seções anteriores.

Motivada pelo elevado número de interrupções inesperadas das linhas nos primeiros dois anos de operação e pela dificuldade em determinar as causas, a Terna Plus implementou um sistema avançado de localização de faltas e de LIMO para

reduzir a duração e o número de interrupções. Para este fim, a Terna Plus aplicou relés de proteção de linha UHS que fornecem um sistema de localização de faltas multimétodo, incluindo métodos DETWFL, DEZFL, SETWFL e SEZFL. Há canais de comunicação entre as subestações disponíveis para o método DETWFL, o que garante a exatidão e a rapidez das informações de localização de faltas. Disponibilizar essas informações para as equipes de manutenção permite um reparo rápido da linha e reduz a duração da paralisação da linha. Outro fator decisivo para a escolha feita pela Terna Plus foi a inclusão do método SETWFL no sistema de localização de faltas, portanto, em caso de falha no sistema global de sincronização de tempo, este método funciona como *backup*. Com base nos canais de comunicação disponíveis, o sistema é capaz de reportar em tempo real a localização da falta fornecida pelos métodos DETWFL, SETWFL e SEZFL e também é capaz de aplicar todos os quatro métodos para cálculos *off-line*.

A função LIMO é usada para registrar as faltas e os precursores de falta para ajudar as equipes de manutenção a inspecionar seções específicas das linhas TL1 e TL2, tomar ações preventivas e evitar possíveis desligamentos no futuro.

Todas as subestações possuem multiplexadores de comunicação com canais IEEE C37.94. Como o canal de comunicação entre os relés de proteção de linha UHS não é por meio de fibra óptica direta, é necessário realizar a sincronização de tempo externa para a função DETWFL.

A Fig. 10 mostra o diagrama simplificado do sistema de proteção e monitoramento da TL1. A linha possui reatores *shunt* em ambas as extremidades, mas estes não são conectados à linha através de disjuntores, portanto não há necessidade de monitorar sua corrente, uma vez que são chaveados apenas quando a linha não está energizada. No projeto original dos sistemas de proteção, as correntes dos dois conjuntos de TCs em cada terminal são somadas externamente ao relé por meio do paralelismo dos TCs. Essa configuração foi mantida para reduzir o trabalho de fiação do painel, embora os novos relés UHS sejam capazes de medir os dois conjuntos de correntes de forma independente.

A Fig. 11 mostra o diagrama simplificado do sistema de proteção e monitoramento da TL2. O reator *shunt* da TL2 é conectado através de um disjuntor, de forma que pode ser ligado e desligado enquanto a linha está em operação. Para evitar a falsa detecção de eventos pela função LIMO quando o reator é chaveado, os TCs do reator são conectados ao relé UHS para compensar as TWs geradas durante manobras.

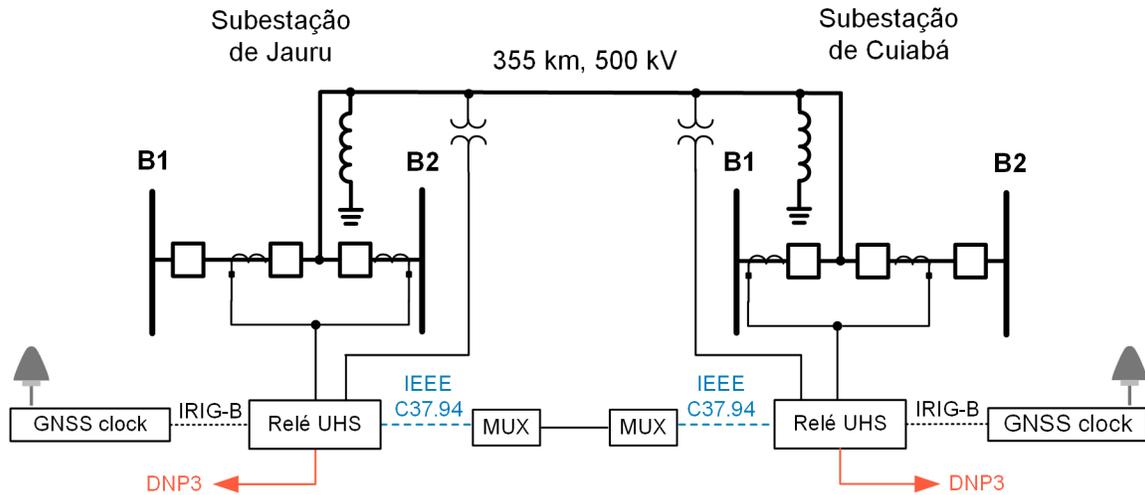


Fig. 10. Sistema de proteção e monitoramento SLD da TL1.

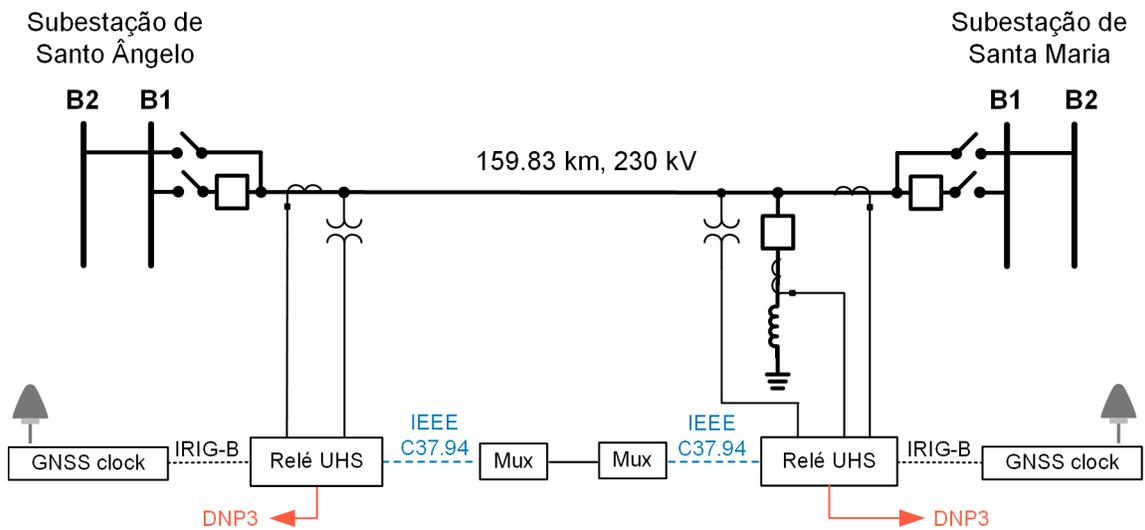


Fig. 11. Sistema de proteção e monitoramento SLD da TL2.

Conforme mencionado anteriormente, para os métodos DETWFL, SETWFL e SEZFL, os relés UHS executam o algoritmo de localização de faltas em tempo real e enviam o resultado instantaneamente para a central de controle via protocolo DNP3; nenhum processamento de dados adicional é necessário no centro de controle. Os relés determinam automaticamente o melhor resultado entre os três métodos e enviam esse único resultado ao usuário. A localização da falta fornecida pelos outros métodos também está disponível para envio automático via comunicação e no arquivo de relatório de evento.

A prioridade mais alta é sempre para o resultado do método DETWFL. No entanto, se este método não estiver disponível, seja devido a uma falha de comunicação ou à ausência de um sinal externo de sincronização de tempo de alta exatidão, o relé reporta o melhor resultado entre os dois métodos de terminal único, uma vez que o método DEZFL não está sendo usado.

Em aplicações com comunicação via IEEE C37.94, o método DEZFL não está disponível para cálculo automático.

O cálculo *off-line* é possível e fácil de executar usando um *software* de análise de relatório de evento [2] [18].

A combinação de métodos de um e dois terminais com base na impedância e nas TWs é importante para garantir a disponibilidade de localização de falta em condições adversas, tais como:

- Falha na sincronização de horário externa - DETWFL não está disponível e os métodos SETWFL, SEZFL e DEZFL (*off-line*) estão disponíveis.
- Perda de comunicação entre subestações - DETWFL não está disponível e os métodos SETWFL, SEZFL e DEZFL (*off-line*) estão disponíveis.
- Falhas que ocorrem quando a tensão está perto do cruzamento por zero - DETWFL e SETWFL estão indisponíveis e os métodos SEZFL e DEZFL (*off-line*) estão disponíveis.

No caso de falha de comunicação entre uma das subestações e a central de controle, a informação de localização da falta ainda é enviada pelo relé localizado na subestação com comunicação íntegra para a central de controle. Caso as duas

subestações percam a comunicação com a central de controle, as informações de localização da falta de todos os métodos ainda estarão disponíveis localmente em cada relé.

### 1) Ajustes de Localização de Falhas

A Tabela V lista as configurações necessárias para habilitar a função de localização de faltas nos relés e os valores de configuração determinados para cada uma das linhas de transmissão da Terna Plus.

TABELA V  
AJUSTES DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA TL1 E TL2

| Ajuste                   | TL1                    | TL2                   |
|--------------------------|------------------------|-----------------------|
| $Z_{L1}$ ( $\Omega$ sec) | 103,77 $\angle$ 86,06° | 11,06 $\angle$ 83,26° |
| $Z_{L0}$ ( $\Omega$ sec) | 391,71 $\angle$ 71,36° | 42,29 $\angle$ 70,71° |
| LL (km)                  | 355                    | 159,83                |
| TWLPT ( $\mu$ s)         | 1207,50                | 543,64                |
| FL <sub>TRIGGER</sub>    | TRIP OR IN103          | TRIP OR IN103         |

Os valores de configuração da impedância de sequência positiva da linha ( $Z_{L1}$ ) e da impedância de sequência zero ( $Z_{L0}$ ) foram determinados diretamente a partir dos dados das características da linha. A referência [19] fornece orientação e discute os desafios de determinar com precisão o valor do comprimento real da linha (LL).

TWLPT é o tempo total de propagação de TW na linha de transmissão. Como configuração inicial, presume-se que seja igual a 98 por cento da velocidade da luz. Durante o comissionamento do sistema, o valor real é medido por meio de um teste de energização da linha.

FL<sub>TRIGGER</sub> é uma equação lógica que dispara a função de localização de faltas. O dispositivo aplicado neste projeto é um relé de proteção de linha UHS, que implementa as funções de proteção baseadas em grandezas incrementais e nas TWs. Todos os elementos de proteção são habilitados, de forma que o relé seja capaz de detectar faltas internas e acionar a função de localização de faltas com o sinal de disparo (TRIP) emitido pelos elementos de proteção. Além disso, o relé recebe os sinais de disparo de outros relés por meio de entradas digitais para realizar funções de proteção de linha e usa esses sinais de disparo para acionar a função de localização de faltas. As seguintes funções de proteção são habilitadas nos relés:

- Elementos de proteção de distância de subalcançe de fase (TD21P) e de terra (TD21G) por grandeza incremental.
- Lógica de transferência de disparo permissivo por sobrealcançe pelo canal de comunicação IEEE C37.94 com elementos direcionais de onda viajante (TW32) e grandeza incremental (TD32).

Inicialmente, as funções de proteção do UHS não serão aplicadas para desarmar os disjuntores, a fim de avaliar previamente seu desempenho. A Terna Plus pretende que esses elementos passem a desligar os disjuntores após um período de avaliação bem-sucedida.

### 2) Ajustes de LIMO

A função LIMO opera com base na função DETWFL para localizar precursores de falta. É empregada uma função de detecção de distúrbios baseada em TWs para acionar o algoritmo de localização de eventos. As únicas configurações a serem definidas para ativar a função LIMO são as seguintes:

- Habilitar monitoramento de linha (ELM - *Enable Line Monitoring*):
  - N - desativa a função de monitoramento de linha;
  - Y - habilita a função de monitoramento de linha para tabular falhas e eventos;
  - YE - habilita a função de monitoramento de linha para registrar apenas eventos;
  - YF - habilita a função de monitoramento de linha para registrar apenas as faltas.
- Limite de alarme de monitoramento de linha (LMALARM), que é o número de eventos detectados em um lote específico ao longo da linha.

Também é possível definir regiões de bloqueio para a função LIMO onde os eventos gerados nesses locais não serão contados. Um exemplo é um ramal de derivação (*tap*) de carga na linha, que poderia causar reflexões de TWs não relacionados a uma falta. A aplicação da Terna Plus não requer regiões de bloqueio porque as linhas não possuem *taps*.

### 3) Instalação, Testes e Comissionamento

Em todas as subestações os relés UHS serão instalados nos painéis de proteção e controle existentes para aproveitar os sinais analógicos e digitais já disponíveis nesses painéis, como correntes, tensões e sinais digitais de *status*.

Os TAF - Testes de Aceitação em Fábrica (FATs - *Factory Acceptance Tests*) e os TAC - Testes de Aceitação em Campo (SATs - *Site Acceptance Tests*) são necessários para testar totalmente as funções de proteção, localização de faltas e LIMO.

Uma vez que os dispositivos serão instalados em painéis existentes, os TAFs irão validar principalmente os ajustes das configurações e a comunicação com o sistema supervisor através do protocolo DNP3 para relatar a localização da falta e outros dados em tempo real. Além disso, os TAFs são uma oportunidade para os engenheiros da Terna Plus aprenderem sobre as funcionalidades do relé.

A Fig. 12 mostra a configuração de TAFs que é usada para testar o sistema de localização de faltas e monitoramento preditivo. Os amplificadores de caixas de teste para relés convencionais não têm a largura de banda de frequência necessária para testar funções baseadas em TWs. Um módulo de teste adicional é usado como fonte de teste de TWs, mostrado na Fig. 12, para testar as funções de TWs. Este módulo sobrepõe um pulso de alta frequência ao sinal fornecido pela caixa de testes de relé convencionais. Um relógio GNSS sincroniza a caixa de teste convencional e a fonte de teste de TW para que a injeção ocorra no instante desejado. A configuração mostrada na Fig. 12 permite o teste de todas as funções do relé.

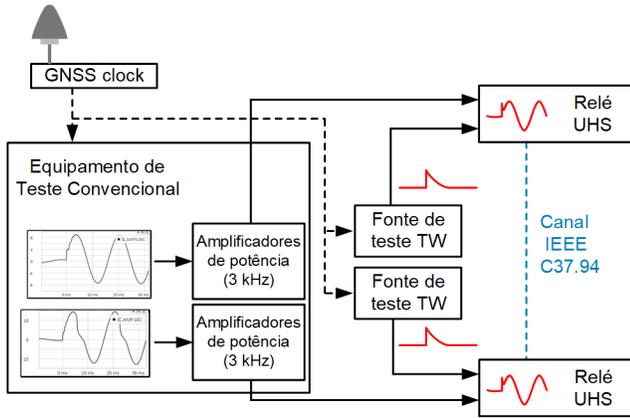


Fig. 12. Configuração de TAF.

O TAF ajuda os usuários a determinar se o dispositivo ou sistema está em conformidade com os requisitos da aplicação e confirma o desempenho correto da lógica e da configuração. Este tipo de teste também pode usar um *software* de simulação de transitórios em sistemas elétricos de potência, com uma modelagem realista do sistema elétrico específico. Esta opção permite aos usuários simular um grande número de cenários e gerar arquivos de formas de onda para cada um deles. Os relés UHS possuem um recurso de *playback* de oscilografias integrado. Os arquivos de forma de onda são usados em conjunto com este recurso para testar as funções de proteção e de localização de faltas sem a necessidade de uma caixa de teste física [20].

Para um TAC, cada dispositivo é instalado em uma subestação e a mesma estratégia de teste pode ser usada. No entanto, é necessário sincronizar o tempo do equipamento do conjunto de teste com os relógios GNSS em ambas as subestações, conforme mostrado na Fig. 13.

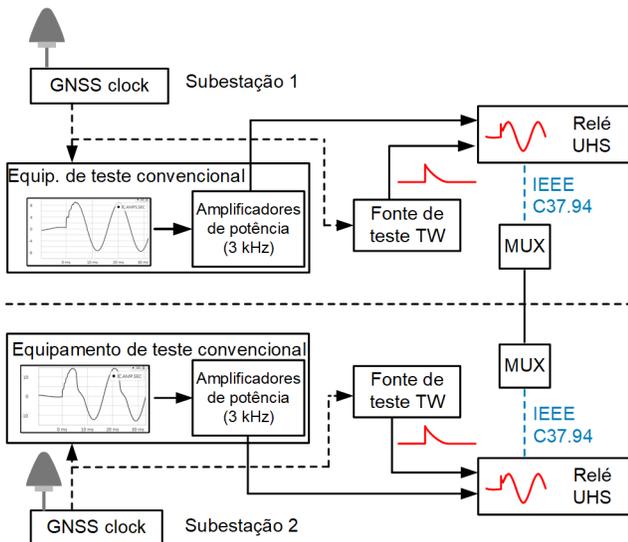


Fig. 13. Configuração de TAC.

## VII. BENEFÍCIOS ADICIONAIS

Um relé UHS faz a amostragem de correntes e tensões a cada microssegundo (uma taxa de amostragem de 1 MHz) para extrair TWs de sinais brutos de corrente e tensão. O relé usa essas informações para fornecer proteção baseada em

TWs e funções de localização de faltas. Ele também armazena registros oscilográficos capturados de acordo com os ajustes definidos pelo usuário.

O relé marca o horário em seus registros oscilográficos de alta resolução com uma exatidão de 100 nanossegundos ou melhor em relação à referência de tempo absoluta quando conectado a uma fonte de tempo de alta precisão. Os registros oscilográficos recuperados de diferentes relés podem ser alinhados no tempo e vários registros podem ser analisados juntos. Esses registros podem ser usados para analisar componentes de alta frequência de tensões e correntes, como aqueles causados por eventos de tensão de restabelecimento transitória (TRV - *Transient Recovery Voltage*) em disjuntores. Esses eventos podem ocorrer na subestação onde o relé está localizado ou em uma subestação adjacente. TRV é a tensão que aparece através dos terminais dos polos do disjuntor após uma ação de chaveamento para interromper a corrente, conforme mostrado na Fig. 14 [21].

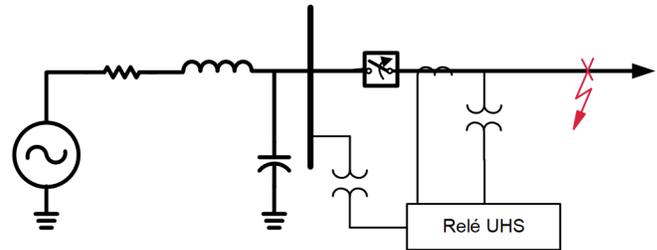


Fig. 14. Chaveamento do disjuntor para eliminar uma falta na linha.

TRV é um transiente de curta duração com alta amplitude e alta frequência. A rápida mudança na tensão pode danificar componentes do sistema elétrico e resultar em falhas de isolamento, reacendimento do arco interno no disjuntor, causando danos e *flashover* externo.

A capacidade de suportar TRV é um item de especificação para disjuntores e é fornecida na *data sheet* do disjuntor. É especificada em termos de valor de pico de tensão e o tempo em microssegundos que a tensão leva para atingir o pico. Aplicando relés UHS, conforme ilustrado na Fig. 14, torna possível capturar tensões e correntes para operações do disjuntor com uma taxa de amostragem de 1 MHz para verificar se o TRV real está dentro da suportabilidade do disjuntor ou para detectar problemas potenciais com o disjuntor durante o processo de interrupção.

Durante o processo de interrupção de uma corrente de falta, um arco é estabelecido entre os contatos do disjuntor. O arco perde a condutividade rapidamente conforme a corrente se aproxima de zero e, alguns microssegundos após o cruzamento da corrente pelo zero, a corrente para de fluir e o arco cessa. Durante este processo, o meio dielétrico deve recuperar sua propriedade de isolamento mais rápido que a taxa de variação da tensão de restabelecimento transitória nos contatos e continuar impedindo o fluxo de corrente. A interrupção é bem-sucedida se o meio de interrupção puder suportar a rápida taxa de variação do TRV. No entanto, se o meio dielétrico se deteriorar por causa do TRV, ocorre um rompimento do dielétrico, fazendo com que o meio dielétrico se torne condutor e a corrente comece a fluir novamente. Este fenômeno é

chamado de reignição. A Figura 15 mostra um exemplo de reignição de corrente capturada por um relé UHS, onde o fluxo de corrente foi restabelecido logo após o cruzamento por zero.

Este tipo de fenômeno não pode ser detectado por dispositivos de proteção tradicionais que possuem baixas taxas de amostragem. O evento de reignição do arco no disjuntor não é visível na oscilografia do relé e o disjuntor é considerado como operando normalmente. Conforme mostrado na Fig. 15, a alta taxa de amostragem dos relés UHS permite a detecção de reignições do arco nos disjuntores e outros eventos do sistema elétrico com alta frequência e baixa duração.

A reignição da corrente no disjuntor tem efeitos prejudiciais para o sistema elétrico por causa do tempo mais longo para eliminar a falta. Além disso, o disjuntor falha em interromper a corrente e pode explodir, causando extensos danos materiais e comprometendo a confiabilidade do sistema elétrico.

Registros oscilográficos de alta resolução revelam eventos de alta frequência no sistema de potência que não podem ser observados por outros métodos. Sem essa visibilidade, os eventos passam despercebidos, a manutenção ou os reparos permanecem não programados e o sistema elétrico continua a operar em um estado inseguro. Com essa visibilidade, no entanto, a concessionária pode realizar manutenção baseada no desempenho para aumentar a confiabilidade e o desempenho do sistema elétrico.

## VIII. CONCLUSÃO

Um sistema de localização de faltas multimétodo, em tempo real e altamente preciso é uma ferramenta essencial para os ATs. Este sistema oferece muitas vantagens, incluindo detecção e reparo mais rápidos de faltas nas linhas de transmissão, redução de dispendiosas inspeções de linha, melhoria na produtividade da equipe de manutenção de linha e melhor visibilidade das causas das interrupções na linha. Além disso, este sistema reduz a duração geral do desligamento da linha, resultando em menos penalidades e uma melhoria na qualidade do serviço para os consumidores.

A função LIMO tem um alto potencial de redução do número de faltas e desligamentos inesperados das linhas, indicando o local onde ocorrem os precursores de falta recorrentes. Essas informações permitem que a equipe de manutenção da linha corrija o problema na linha de transmissão antes que ocorra uma falta permanente. A oscilografia de alta resolução oferecida pelos relés UHS permite a análise de fenômenos de alta frequência no sistema elétrico.

As penalidades monetárias devido os desligamentos das linhas de transmissão são muito altas em alguns países. Reduzir essas penalidades justifica facilmente o investimento para instalar sistemas de localização de faltas de alta precisão.

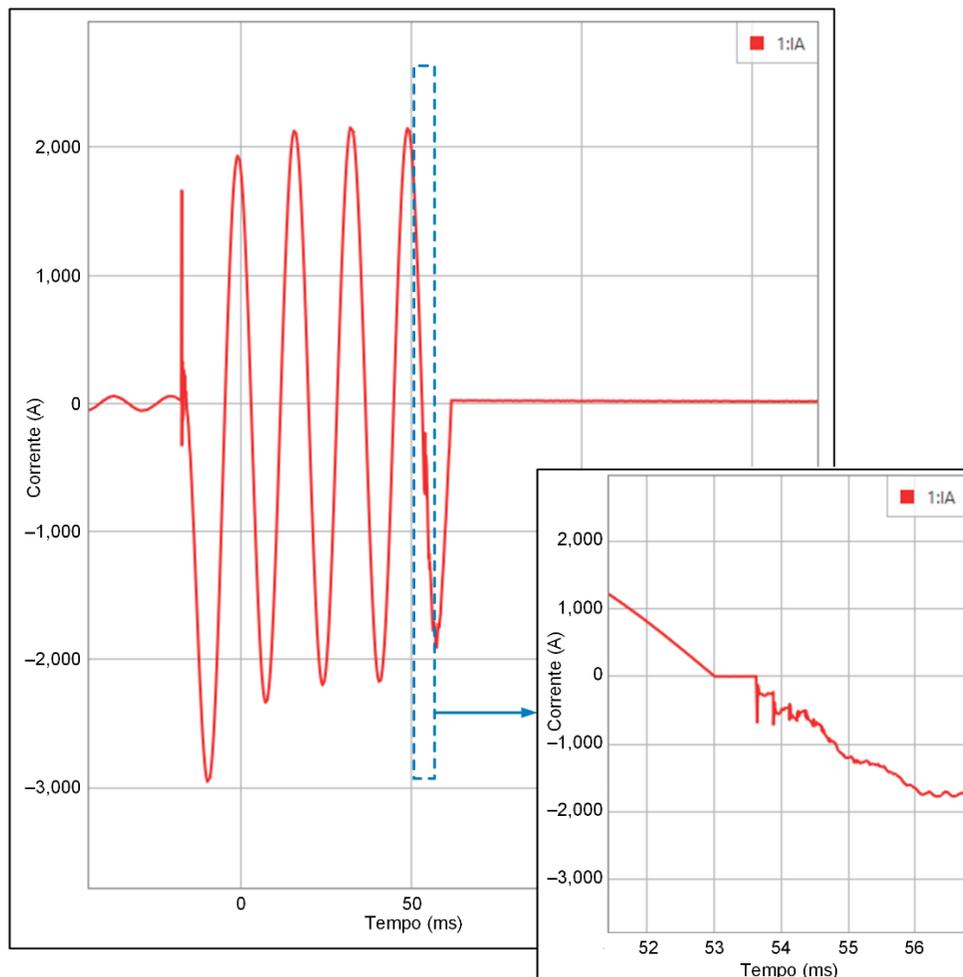


Fig. 15. Evento de reignição de corrente do disjuntor capturado por um relé UHS.

## IX. REFERÊNCIAS

- [1] E. O. Schweitzer, III, "A Review of Impedance-Based Fault Locating Experience," proceedings of the 15th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 24–27, 1988.
- [2] K. Zimmerman and D. Costello, "Impedance-Based Fault Location Experience," proceedings of the 31st Annual Western Protective Relay Conference, October 2004.
- [3] O. Avendano, B. Kasztenny, H. J. Altuve, B. Le, and N. Fischer, "Tutorial on Fault Locating Embedded in Line Current Differential Relays—Methods, Implementation, and Application Considerations," proceedings of the 41st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 14–16, 2014.
- [4] B. Shulim, Y. Gong, M. Mynam, A. Guzmán, and G. Benmouyal, "Automated Fault Location System for Nonhomogeneous Transmission Networks," proceedings of the 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, April 2–5, 2012.
- [5] S. Marx, A. Guzmán, V. Skendzic, and M. V. Mynam, "Traveling Wave Fault Location in Protective Relays: Design, Testing, and Results," proceedings of the 16th Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference, Atlanta, GA, May 6–7, 2013.
- [6] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, and S. Marx, "Locating Faults by the Traveling Waves They Launch," proceedings of the 40th Annual Western Protective Relay Conference, October 2013.
- [7] B. Kasztenny and V. Mynam, "Line Length and Fault Distance Considerations in Traveling-Wave Protection and Fault-Locating Applications." Available: [selinc.com/api/download/134423](http://selinc.com/api/download/134423).
- [8] D. L. Corton, J. V. Melado, J. Cruz, R. Kirby, Y. Z. Korkmaz, G. Patti, and G. Smelich, "Double-Ended Traveling-Wave Fault Locating Without Relay-to-Relay Communications," proceedings of the 74th Annual Conference for Protective Relay Engineers, March 22–25, 2021.
- [9] SEL-T400L Time-Domain Line Protection Instruction Manual. Available: [selinc.com/products/T400L/docs/](http://selinc.com/products/T400L/docs/).
- [10] A. Guzmán, B. Kasztenny, Y. Tong, and M. V. Mynam, "Accurate Single-End Fault Locating Using Traveling-Wave Reflection Information," 14th International Conference on Developments in Power System Protection, Belfast, United Kingdom, March 12–15, 2018.
- [11] B. Kasztenny, M. V. Mynam, T. Joshi, and D. Holmbo, "Preventing Line Faults with Continuous Monitoring Based on Current Traveling Waves," 15th International Conference on Developments in Power System Protection, Liverpool, United Kingdom, March 9–12, 2020.
- [12] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), "Resolução Normativa no. 729, de 28 de Junho de 2016." Available: [aneel.gov.br/cedoc/ren2016729.pdf](http://aneel.gov.br/cedoc/ren2016729.pdf).
- [13] R. M. Aquino and M. H. M. Vale, "Impacto da Parcela Variável na Expansão, Operação e Manutenção do Sistema Interligado Nacional—Propostas para Atualização de Procedimentos," XX SNPTEE, Recife, Brazil, November 22–25, 2009.
- [14] North American Electric Reliability Corporation (NERC), "Notice of Penalty NERC Violation ID RFC200800071." Available: [nerc.com/pa/comp/CE/Pages/Actions\\_2009/2009\\_TABLE.htm](http://nerc.com/pa/comp/CE/Pages/Actions_2009/2009_TABLE.htm).
- [15] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), "Dados Estatísticos da Transmissão." Available: [aneel.gov.br/fiscalizacao-da-transmissao](http://aneel.gov.br/fiscalizacao-da-transmissao).
- [16] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), "CONTRATO DE CONCESSÃO NO. 07/2016-ANEEL." Available: [aneel.gov.br/contratos1](http://aneel.gov.br/contratos1).
- [17] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), "CONTRATO DE CONCESSÃO NO. 03/2016-ANEEL." Available: [aneel.gov.br/contratos1](http://aneel.gov.br/contratos1).
- [18] Swagata Das, "Impedance-Based Fault Location Using Custom Calculations in SYNCHROWAVE Event." Available: [selinc.com](http://selinc.com).
- [19] B. Kasztenny, "Improving Line Crew Dispatch Accuracy When Using Traveling-Wave Fault Locators," proceedings of the 46th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 22–24, 2019.
- [20] A. Guzmán, G. Smelich, Z. Sheffield, and D. Taylor, "Testing Traveling-Wave Line Protection and Fault Locators," proceedings of the 14th International Conference on Developments in Power System Protection, March 2018.
- [21] IEEE C37.011-2011, *IEEE Guide for the Application of Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers*.

## X. BIOGRAFIAS

**Artur Hoff** recebeu seu diploma em engenharia elétrica pelo Centro de Ciências Tecnológicas de Joinville, Brasil, em 1997. Em 1998, ingressou na Cia. de Cimento Itambé como engenheiro de projetos. Em 2000, ele ingressou na Siemens como engenheiro de comissionamento e coordenador de obras, e mais tarde tornou-se engenheiro contratado. Em 2008, ingressou na Novatrans Energia (Terna Participações), na função de engenheiro de controle, tornando-se coordenador de manutenção e, em seguida, gerente administrativo. Em 2018, ingressou na SPE Santa Lucia e na SPE Santa Maria como engenheiro de projetos, tornando-se posteriormente gerente de engenharia. Atualmente trabalha como diretor técnico das empresas Terna no Brasil.

**Ricardo Abboud** recebeu seu diploma em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, em 1992. Em 1993, ingressou na CPFL Energia como engenheiro de proteção. Em 2000, ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) como engenheiro de aplicação de campo no Brasil, auxiliando clientes em sistemas de proteção, automação e controle de subestações. Em 2005, ele se tornou o gerente de engenharia de campo, liderando e orientando o grupo de engenharia de aplicação e, em 2014, ele se tornou o gerente de serviços de engenharia. Em 2016, ele foi transferido para a sede da SEL em Pullman, Washington, como gerente técnico internacional, fornecendo suporte técnico avançado e consultoria sobre novas tecnologias para escritórios de campo internacionais. Em 2019, ele ingressou na SEL University como professor. Atualmente, atua como Principal Engineer da SEL Engineering Services, Inc. (SEL ES).

**Renan Bernardes** recebeu seu diploma em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Itajubá, Brasil, em 2007. Em 2008, ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) como engenheiro de aplicação no Brasil para sistemas de proteção, automação e controle de subestações. Em 2013, ele se tornou supervisor do grupo de suporte técnico. Em 2015, ingressou na Neoenergia atuando como engenheiro de proteção e automação de ativos de transmissão. Em 2019, ele retornou à SEL, onde atualmente trabalha como gerente de vendas e atendimento ao cliente.

**Paulo Lima** recebeu seu diploma em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Itajubá, Brasil, em 2012. Em 2013, ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) como engenheiro de aplicação de proteção no Brasil. Em 2018, ele se tornou coordenador do grupo de engenharia de aplicação e é o gerente técnico regional para o Brasil desde 2020. Ele tem experiência em aplicação, treinamento, integração e teste de relés de proteção digital. Ele também é autor de artigos e de documentação técnica associados aos produtos SEL e cursos da Universidade SEL.