

Experiência em Campo Com um Relé de Linhas de Transmissão de Ultra-Alta-Velocidade e Localizador de Falhas por Ondas Viajantes

Sthitaprajnyan Sharma e Mangapathirao V. Mynam
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Apresentado na
45th Annual Western Protective Relay Conference
Spokane, Washington, EUA
16-18 de outubro de 2018

Traduzido para o português em junho de 2019

Experiência em Campo Com um Relé de Linhas de Transmissão de Ultra-Alta-Velocidade e Localizador de Faltas por Ondas Viajantes

Sthitaprajnyan Sharma e Mangapathirao V. Mynam, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Sumário— Este artigo técnico compartilha uma experiência em campo em uma concessionária de energia elétrica indiana utilizando proteção em ultra-alta-velocidade (doravante chamaremos pela sigla em inglês UHS) e localização de faltas por ondas viajantes (que chamaremos pela sigla em inglês TWFL). Uma das maiores concessionárias de energia elétrica da Índia estava visando reduzir o tempo e esforço para localizar faltas em uma de suas linhas de transmissão de 110 kV com 57,4 km de comprimento. Esta linha inclui um ramal em derivação (tap de linha) e cruza um terreno de difícil acesso (incluindo florestas, rio e estrada de ferro), que contribui para aumentar o desafio em localizar faltas. A concessionária instalou relés de proteção de linhas de transmissão UHS com capacidade para TWFL para localizar faltas de modo bastante preciso. Este artigo técnico discute a aplicação destes relés e apresenta o desempenho tanto da função de proteção como da função de localização de faltas para os casos de faltas internas na linha de transmissão. Nós também analisamos uma das oscilografias capturadas com frequência de amostragem de 1 MHz, que registrou uma reigitação de arco em disjuntor. As oscilografias também mostram faltas eminentes que evoluíram para faltas que são detectáveis pelos demais relés convencionais para proteção de linhas de transmissão.

I. INTRODUÇÃO

Localização de falta de forma precisa é crítica para operação de sistemas de potência para uma concessionária de energia elétrica. As concessionárias indianas estão procurando aplicar localizadores de faltas por ondas viajantes de forma a localizar com precisão, as faltas em seus circuitos de transmissão. Uma destas concessionárias instalou relés de proteção de linhas de transmissão com elementos de proteção de ultra-alta-velocidade (UHS) e funcionalidade de localização de faltas por ondas viajantes (TWFL) numa linha de transmissão de 110 kV e 57,4 km de comprimento. Esta linha de transmissão atravessa montanhas, florestas, tem uma travessia de rio e um circuito em derivação (tap de linha). Esta linha de transmissão desafiou os métodos existentes de localização de faltas baseados na medição da impedância e causou dificuldades para a equipe de busca em localizar faltas.

Adicionalmente, as principais concessionárias e agentes reguladores estão atentos aos indicadores de desempenho, como o índice de frequência média de interrupções do sistema (sigla em inglês SAIFI) e índice de duração média de interrupções do sistema (sigla em inglês SAIDI). Uma precisa localização e uma rápida eliminação de faltas impactam positivamente estes índices. Localizar faltas temporárias e direcionar ações perante suas causas (por exemplo, substituir

um isolador danificado) evitam faltas recorrentes, fato que melhora substancialmente estes indicadores de desempenho.

Métodos TWFL fornecem localização de faltas precisas [1]. Esta tecnologia tem estado disponível em localizadores de faltas avulsos por décadas [2]; porém, as concessionárias aplicavam estes localizadores de faltas dedicados quase que exclusivamente em linhas de transmissão de extra-alta-tensão. Atualmente, estão disponíveis relés de proteção de linhas de transmissão com capacidade de TWFL, o que permite que as concessionárias apliquem esta comprovada tecnologia também nas linhas de transmissão em níveis de tensão menores (níveis de subtransmissão).

Este artigo técnico discute a instalação de um projeto piloto de relés de proteção de linhas de transmissão com TWFL e funções de proteção UHS numa linha de transmissão de 110 kV. Em primeiro lugar iremos resumir os princípios de TWFL e proteção UHS [3] [4] [5]. Posteriormente, iremos discutir o desempenho destas funções para três ocorrências de faltas internas na linha de transmissão. Particularmente, analisamos uma das oscilografias, onde os relés de proteção da linha registraram uma situação de reigitação de arco do disjuntor. Nós também mostraremos oscilografias que registraram faltas eminentes, que evoluíram para faltas detectáveis pelos relés de proteção convencionais. Acreditamos que estas faltas eminentes são devido a degradação da isolamento, causando arcos temporários. É bastante animador ter dispositivos que registram estes tipos de eventos, pois esta capacidade fornece dados que podem ser utilizados para desenvolver e melhorar os algoritmos para detectar e localizar faltas eminentes.

II. VISÃO GLOBAL DOS PRINCÍPIOS DE TWFL E PROTEÇÃO UHS

Nesta seção, nós iremos resumidamente discutir os métodos de localização de faltas e princípios de proteção UHS disponíveis no relé de proteção deste projeto piloto.

A. Localização de Faltas

Faltas em linhas de transmissão geram ondas viajantes que se propagam desde o ponto de falta até os terminais remotos da linha de transmissão. A localização da falta pode ser calculada baseada no tempo de chegada da onda, comprimento da linha e o tempo de propagação total da onda viajante ao longo da linha de transmissão. TWFL fornece melhor precisão do que os métodos de localização de faltas baseados em impedância. Por

exemplo, numa linha de transmissão de 100 km, TWFL fornece precisão de aproximadamente 300 metros comparado a aproximadamente 1 km de precisão pelo método baseado na impedância considerando os dois terminais da linha, ou uma precisão de 1 a 5 km (ou pior) pelo método baseado em impedância, porém considerando apenas um dos terminais da linha de transmissão. O relé de proteção de linhas utilizado nesta aplicação inclui funções de localização de faltas considerando um e dois terminais e usando métodos baseados tanto em ondas viajantes como por impedância.

Para calcular localização de faltas, o método TWFL considerando os dois terminais de linhas, utiliza o tempo de chegada da primeira onda em ambos terminais, comprimento da linha e o tempo de propagação da onda viajante na linha. A troca de informações dos tempos de chegada de ondas nos terminais podem ser feitas de várias formas. Uma opção seria a troca de informações utilizando uma conexão direta por fibra ótica entre os dois relés (um em cada terminal). Outra forma seria cada relé enviar o tempo de chegada da onda para um sistema central. Este sistema usa os tempos de recebimento de onda e os parâmetros da linha de transmissão para computar a localização da falta. A equação (1) mostra o cálculo de localização de faltas considerando os dois terminais da linha.

$$TWFL_{DE} = \frac{LL}{2} \cdot \left(1 + \frac{t_A - t_B}{TWLPT} \right) \quad (1)$$

onde:

$TWFL_{DE}$ é a localização da falta usando o método baseado em onda viajante considerando dois terminais.

LL é o comprimento da linha de transmissão.

t_A é o tempo da primeira onda que chega no terminal A.

t_B é o tempo da primeira onda que chega no terminal B.

$TWLPT$ é o tempo de propagação total da onda viajante na linha de transmissão.

O cálculo da localização de faltas pelo método TWFL considerando apenas um dos terminais de linha, utiliza o tempo de chegada da primeira onda que atingir este terminal, tempo da primeira onda refletida do ponto de falta, o tempo de propagação total na linha e o comprimento da linha de transmissão. A equação (2) mostra o cálculo da localização da falta pelo método de um terminal.

$$TWFL_{SE} = \frac{LL}{2} \cdot \left(\frac{t_{A_REFLECTION} - t_A}{TWLPT} \right) \quad (2)$$

onde:

$TWFL_{SE}$ é a localização da falta usando o método baseado em onda viajante considerando um terminal.

LL é o comprimento da linha de transmissão.

t_A é o tempo da primeira onda que chega no terminal A.

$t_{A_REFLECTION}$ é o tempo da primeira onda refletida desde o ponto de falta a chegar no terminal A.

B. Elemento de Proteção UHS

O relé de proteção de linha utilizado nesta aplicação inclui um elemento de distância de grandezas incrementais ajustado em subalcance na zona 1 (TD21), um esquema de transferência

de disparo permissivo por sobrealcance (sigla em inglês POTT) com um elemento direcional por ondas viajantes (TW32), um elemento direcional de grandezas incrementais (TD32) e um esquema diferencial de corrente por ondas viajantes (TW87) sobre um canal direto em fibra-ótica.

1) Elemento de Distância de Grandezas Incrementais, TD21

O princípio do elemento de distância é baseado no fato de que no ponto de falta, o incremento de tensão não pode ser maior que a tensão pré-falta. O elemento TD21 opera se a variação da tensão calculada no ponto de alcance (tensão de operação, V21OP), excede a tensão pré falta no mesmo ponto (tensão de restrição, V21RST). Referência [5] explica a teoria do elemento TD21.

2) Elemento Direcional por Ondas Viajantes, TW32

O elemento direcional utiliza ondas viajantes das correntes e tensões de fases [5]. Este elemento calcula o torque como um produto da onda viajante de corrente e o sinal invertido da onda viajante de tensão. TW32 enxerga como falta a frente se o torque integrado é positivo e na direção reversa, caso o torque integrado seja negativo. Este elemento é usado como parte integrante do esquema POTT.

3) Elemento Direcional por Grandeza Incremental, TD32

O elemento TD32 utiliza grandezas incrementais instantâneas. A referência [5] fornece a teoria das grandezas incrementais. Similar ao elemento TW32, o elemento TD32 calcula o torque de operação (TOP) como o produto da tensão incremental instantânea com sinal invertido e a réplica da corrente incremental. TD32 calcula o torque de restrição a frente (TFWD) e o torque de restrição reverso (TREV) como o produto do quadrado da réplica de corrente e os respectivos limites de impedância a frente e reverso. O elemento TD32 integra os torques (TOP, TFWD e TREV) e compara o torque integrado de operação com os torques integrados de restrição. O elemento TD32 enxerga na direção a frente se o torque integrado de operação TOP excede o torque integrado de restrição TFWD e enxerga na direção reversa, caso o torque integrado de operação seja menor que o torque integrado de restrição TREV. O elemento TD32 é usado como parte componente do esquema POTT.

4) Esquema Diferencial de Corrente por Ondas Viajantes, TW87

O esquema TW87 compara retardo de tempo, polaridades e magnitudes de ondas viajantes de corrente em ambos terminais da linha de transmissão [5]. Os relés de linha de cada terminal trocam amostras de 1 MHz utilizando uma conexão direta em fibra-ótica. Para eventos externos, a onda viajante de corrente entra em um dos terminais da linha, e após o tempo de propagação na linha, a onda sai pelo outro terminal com polaridade oposta. Para faltas internas, as polaridades das ondas viajantes de corrente tanto do terminal local como do terminal remoto são idênticas, e as primeiras ondas dos dois terminais estão espaçadas, por um tempo menor do que o tempo de propagação total da linha.

A referência [6] mostra que os tempos de operação para os elementos UHS são da ordem de 2 ms para o elemento TD32, menos de 1 ms para o elemento TW32, 4 ms para o elemento TD21 e menos de 1 ms mais o tempo de canal para o esquema TW87.

III. COMISSONAMENTO E MEDIÇÃO DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO DA LINHA

A linha de transmissão de 110 kV atravessa um terreno inacessível e possui um ramal em derivação a 22,8 km do terminal R e 34,6 km do terminal L. A figura 1 ilustra o diagrama unifilar do sistema.

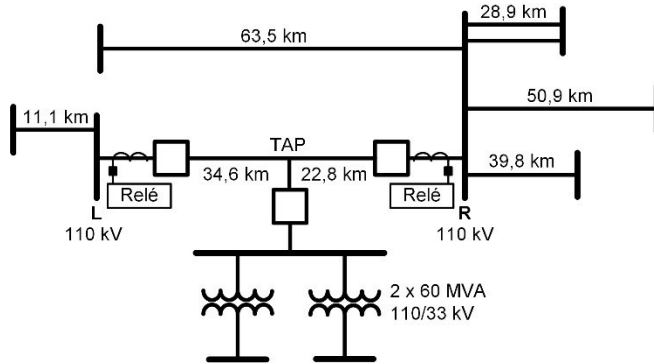


Figura 1. Sistema de 110 kV mostrando o projeto piloto com a linha de transmissão entre os terminais L e R

A concessionária instalou os relés com funcionalidade TWFL em cada terminal da linha de 110 kV. Decidiram instalar os novos relés em paralelo com os relés de proteção existentes em operação. Neste sistema, o terminal L possui TCs de corrente nominal de 1A e o terminal R possui TCs de corrente nominal de 5A.

Tabela 1 apresenta os parâmetros da linha e do relé.

TABELA I
PARÂMETROS DA LINHA DO PROJETO PILOTO

Comprimento da Linha	57,4 km
Impedância de Sequência Positiva	$15,0 \angle 74,76^\circ \Omega$ primários
Impedância de Sequência Zero	$60,525 \angle 80,02^\circ \Omega$ primários
RTC (Terminal L)	1200/1
RTP (Terminal L)	110000/110
RCT (Terminal R)	600/5
RTP (Terminal R)	110000/110

Os elementos de distância TD21 de fase e terra foram ajustados para alcançar 70% e 65% da linha nos terminais L e R, respectivamente. As subestações possuem canais de comunicação direto por fibra ótica ponto a ponto. As perdas nos canais foram altas, impedindo o uso do canal ponto a ponto para os esquemas POTT e TW87. Os relés foram sincronizados via relógio sincronizado por satélite (Global Positioning System - GPS) para permitir uma conveniente análise de oscilografias e localização de faltas por ondas viajantes, caso haja uma eventual situação de perda de comunicação entre os terminais.

Para se obter exatidão na localização de falta, é necessário ter um valor preciso do tempo de propagação da linha. Conforme recomendado em [7], foi planejado uma energização da linha de transmissão de 110 kV de forma a se determinar o tempo de propagação da linha. Durante o fechamento do polo, um degrau de tensão é aplicado na linha proveniente do terminal que foi manobrado. Este degrau se propaga até o terminal remoto, reflete no terminal aberto e chega de volta no terminal fechado. O teste de energização da linha foi realizado do terminal L com a linha aberta no terminal R, e vice-versa, de forma a determinar o tempo de propagação total na linha. Os relés registraram oscilografias durante a energização da linha. A figura 2 mostra tensões e correntes registradas durante a energização pelo terminal R.

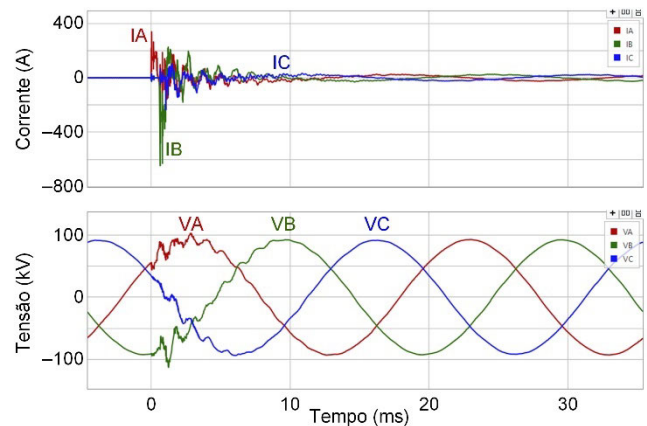


Figura 2. Tensões e correntes de fase registradas durante o teste de energização da linha pelo terminal R.

A figura 3 mostra as ondas viajantes de corrente obtidas através filtragem (usando um filtro tipo “differentiator smoother” [5]) de sinais amostrados em 1 MHz, conforme ilustrado na figura 2. Note que a reflexão de onda proveniente do ramal em derivação (TAP) foi recebida antes da reflexão do terminal L que estava aberto. O tempo de propagação da linha foi calculado como metade da diferença de tempo entre o fechamento do polo e a chegada da onda refletida vinda do terminal aberto. O valor do tempo de propagação da linha foi 199,075 μ s.

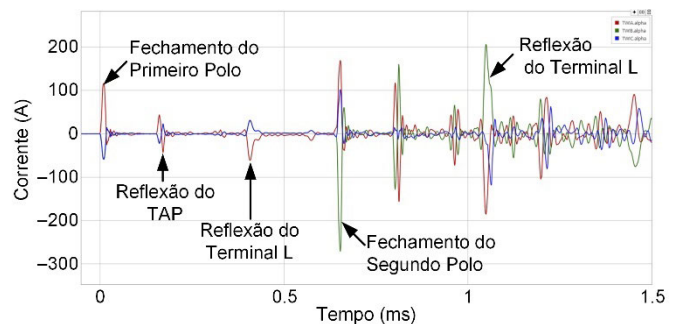


Figura 3. Ondas viajantes de correntes registradas durante o teste de energização da linha no terminal R

IV. DESEMPENHO DO LOCALIZADOR DE FALTAS E ELEMENTOS DE PROTEÇÃO

Durante o período de uma semana, os relés de linha registraram três faltas internas. Nesta seção, analisaremos estes eventos e avaliaremos o desempenho das funções de localização de faltas e de proteção. Devido a ausência de comunicação relé-relé durante estes eventos, mostraremos o desempenho dos elementos direcionais ao invés do esquema POTT. Nós usamos registros de oscilografias de ambos terminais da linha com relés sincronizados com GPS para calcular a localização de faltas usando o método TWFL considerando dois terminais.

A. Falta Fase A para Terra, em 17 de janeiro de 2018

1) Desempenho dos Elementos de Proteção UHS

A figura 4 mostra as correntes e tensões registradas no terminal L durante a primeira falta. As grandezas incrementais do elemento direcional (TD32) e do elemento de distância (TD21) operaram em 2 ms e 10 ms, respectivamente.

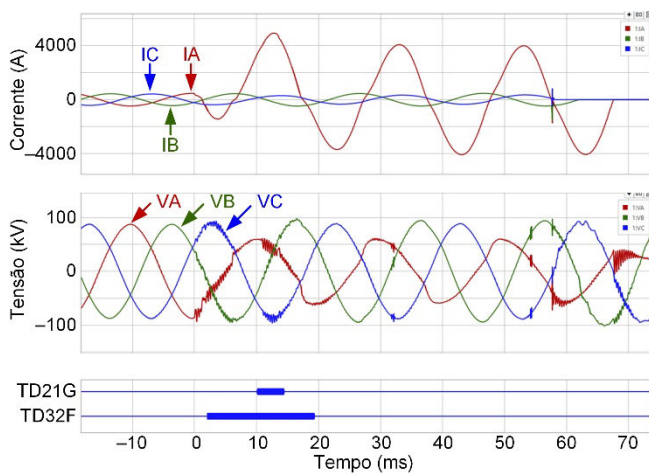


Figura 4. Tensões e correntes registradas no terminal L para a falta de 17 de janeiro de 2018

Esta falta deu-se a 42% do alcance da zona 1 do elemento de distância. Como esperado, o elemento de distância operou. A figura 5 ilustra a tensão de operação no loop de falta (VFAG) excedendo a tensão de restrição (VRAG).

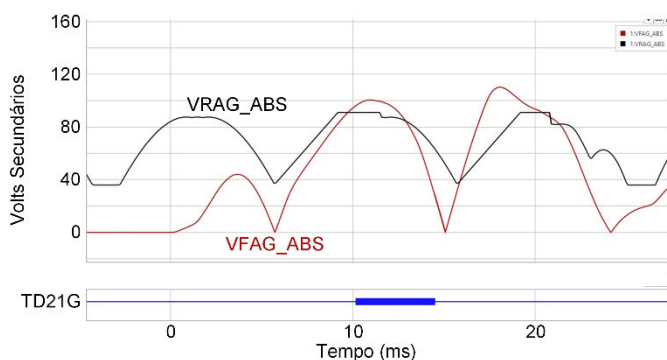


Figura 5. Operação do elemento de distância de terra para a falta do dia 17 de janeiro de 2018, a 42% do ajuste de alcance da zona 1

A figura 6 mostra as grandezas incrementais de réplica de corrente e a tensão do loop para esta falta. Para um evento a

frente, estes sinais estão opostos e a relação de suas magnitudes é igual a magnitude da impedância da fonte. A impedância da fonte foi calculada baseada nas tensões incrementais e réplica de corrente incrementais e igual a $4,3 \Omega$ secundários. Conforme esperado, o elemento TD32 operou para este evento a frente. A figura 7 ilustra o torque de operação, os torques de restrição a frente e reverso e a operação do elemento TD32. O elemento enxerga um evento a frente quando o torque integrado de operação, excede o torque integrado de restrição a frente.

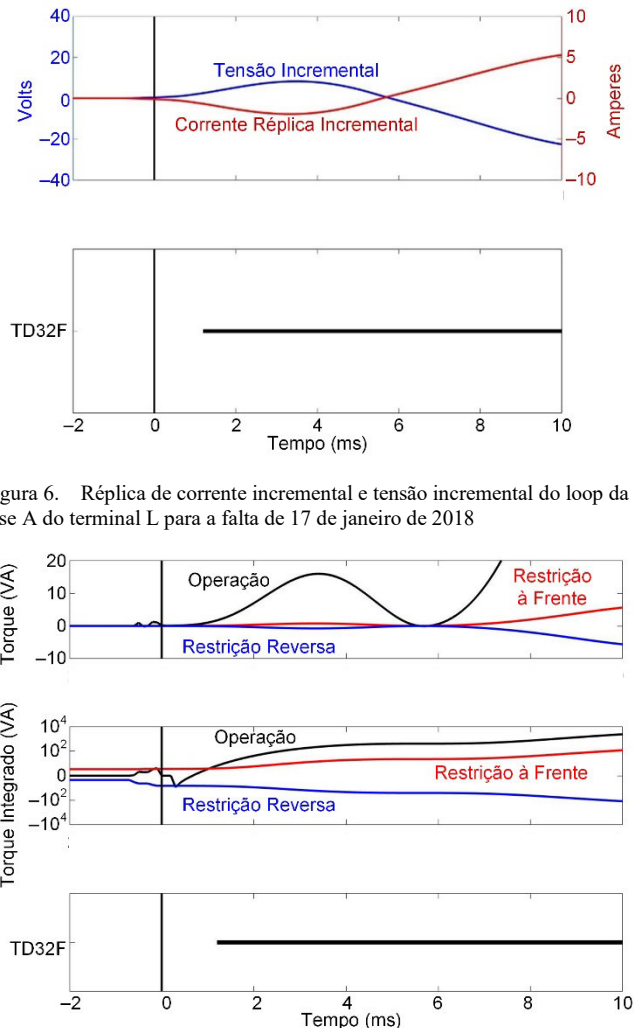


Figura 6. Réplica de corrente incremental e tensão incremental do loop da fase A do terminal L para a falta de 17 de janeiro de 2018

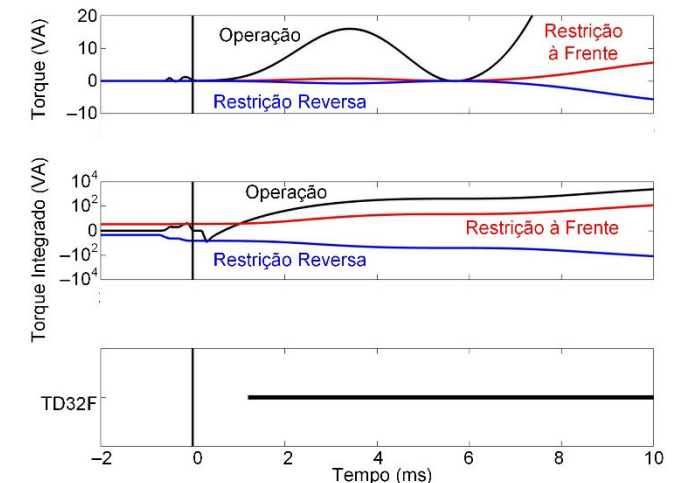


Figura 7. Torques integrados e do elemento TD32 da fase A do terminal L para a falta de 17 de janeiro de 2018.

No terminal R, as grandezas incrementais e elementos direcionais por ondas viajantes operaram em menos de 3 ms. Neste terminal, a falta ocorreu a 100% do ajuste de alcance da zona 1 do elemento de distância, ou seja, no ponto limiar de ajuste. A figura 8 mostra as correntes e tensões registradas no terminal R.

A figura 9 mostra as tensões de restrição e operação para esta falta a 100% do ajuste de alcance do terminal R. Uma vez que a tensão de operação ficou menor que a tensão de restrição, o elemento TD21 não operou. A tensão de operação foi consideravelmente menor que a tensão de restrição mesmo com a falta muito próxima ao limiar de ajuste. Isto foi devido ao fato da falta ter sido resistiva.

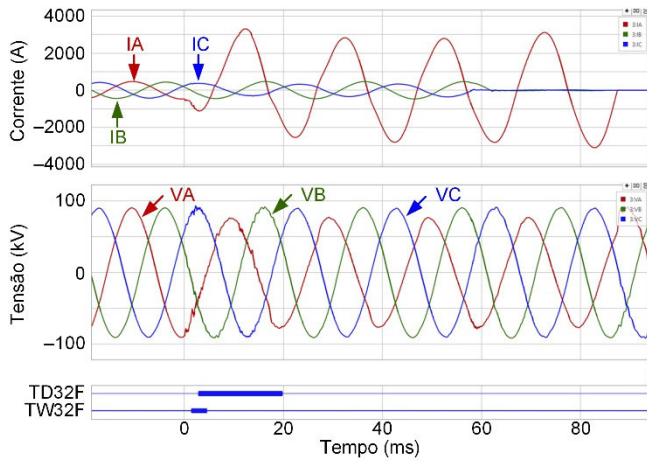


Figura 8. Correntes e tensões registradas no terminal R para a falta de 17 de janeiro de 2018

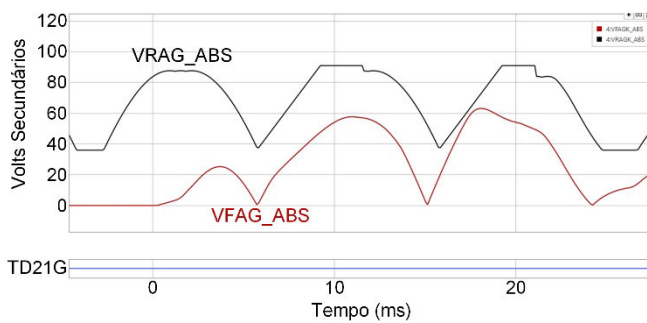


Figura 9. TD21 não operou para a falta de 17 de janeiro de 2018 ocorrida a 100% do ajuste de alcance da zona 1.

2) Localização da Falta e Operação do Disjuntor

A figura 10 mostra as ondas viajantes das correntes (modo alfa) dos terminais L e R associados a fase A. Análise das ondas viajantes de corrente mostraram que, no mesmo ponto, houve um precursor 1 ms antes da falta da fase A para a terra. Baseado no tempo da primeira onda a chegar, a localização de falta calculada para os dois eventos (precursor e falta propriamente dita) desde o terminal L são mostradas em (3) e (4), respectivamente.

$$FL1_L = \frac{57,4 \text{ km}}{2} \cdot \left(1 + \frac{-83,06 \mu\text{s}}{199,075 \mu\text{s}} \right) = 16,73 \text{ km} \quad (3)$$

$$FL2_L = \frac{57,4 \text{ km}}{2} \cdot \left(1 + \frac{-82,22 \mu\text{s}}{199,075 \mu\text{s}} \right) = 16,85 \text{ km} \quad (4)$$

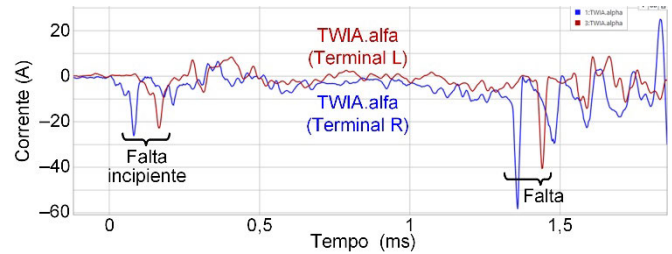


Figura 10. Ondas viajantes de corrente da fase A dos terminais L e R para a falta de 17 de janeiro de 2018

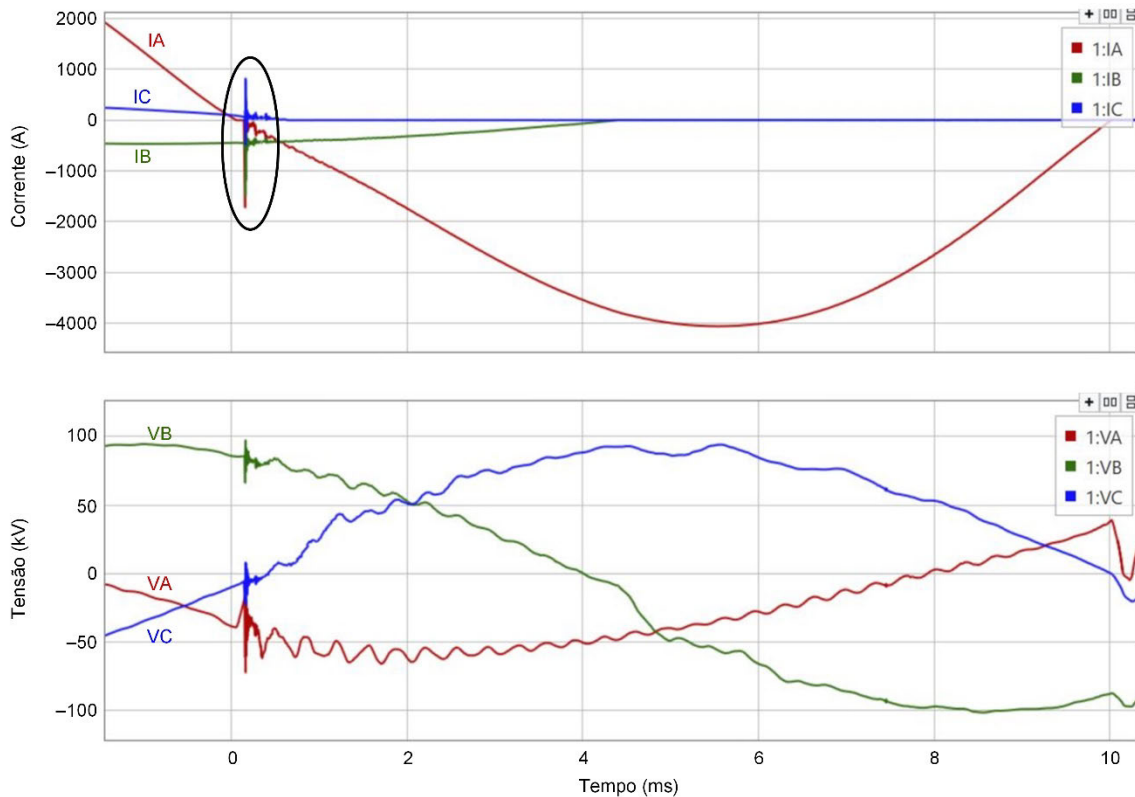


Figura 11. Tensões e correntes registradas durante uma condição de reignição de arco no disjuntor do terminal L, para a falta de 17 de janeiro de 2018

O relé habilitado para TWFL também registrou uma reignição de arco no disjuntor quando o disjuntor abriu no terminal L. A figura 11 mostra uma significativa alteração no valor da corrente (indicada por um círculo) após a passagem da corrente pelo ponto zero, quando o disjuntor deveria eliminar a falta. A falta durou meio ciclo a mais devido a reignição de arco no disjuntor.

Amostragens de dados em mega-hertz provaram serem benéficas para identificação de potenciais problemas nos equipamentos primários. Neste caso, os dados registrados forneceram elementos sobre a operação do disjuntor.

B. Falta da Fase A para a Terra, em 18 de janeiro de 2018

A figura 12 mostra as tensões e correntes registradas no terminal L para a segunda falta. O elemento direcional por ondas viajantes (TW32) operou em $110 \mu\text{s}$, e o elemento direcional por grandeza incremental (TD32) operou em $1,31 \text{ ms}$.

A figura 13 mostra as correntes e tensões registradas no terminal R. Os elementos direcionais operaram em menos de $1,24 \text{ ms}$ e o elemento de distância (TD21) operou em $2,54 \text{ ms}$. Esta falta ocorreu a 40% do ajuste de alcance da zona 1 vista pelo terminal R.

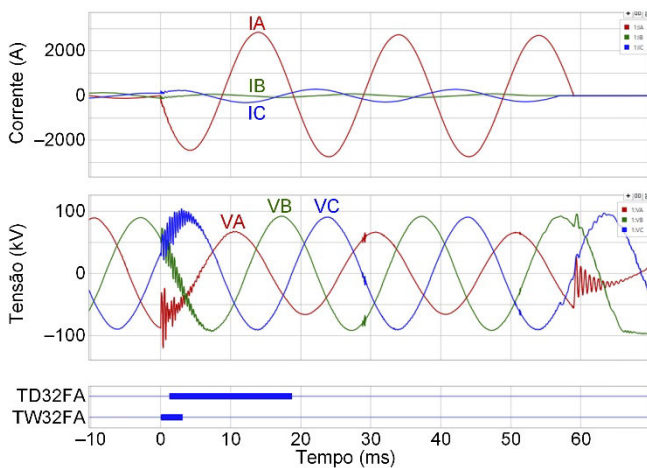


Figura 12. Tensões e correntes registradas no terminal L para a falta de 18 de janeiro de 2018

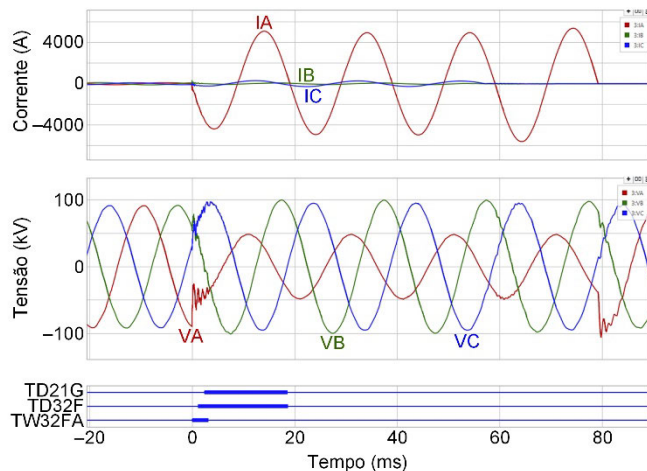


Figura 13. Tensões e correntes registradas no terminal R para a falta de 18 de janeiro de 2018

A figura 14 mostra as ondas viajantes de tensão e corrente associadas a falta em questão. É ilustrado como o TC e TP capacitivo (CCVT) responderam para a primeira onda. Os TCs fornecem uma fiel reprodução das formas de ondas viajantes reais. Já os CCVTs dependem de capacitâncias de dispersão para fornecerem sinais de alta frequência para as entradas do relé. Esta medida de onda viajante de tensão não é precisa em termos de magnitude, porém garante boa exatidão em termos de polaridade por algumas dezenas de microsegundos [8]. Para poder contar com este comportamento do CCVT, o elemento TW32 utiliza somente a informação da primeira onda das ondas viajantes de corrente e tensão. Conforme explicado na seção II, o elemento TW32 enxerga um evento a frente se o torque integrado durante a primeira dezena de microsegundos excede um limite. Neste evento, o elemento TW32 operou em menos de $50 \mu\text{s}$ no terminal R.

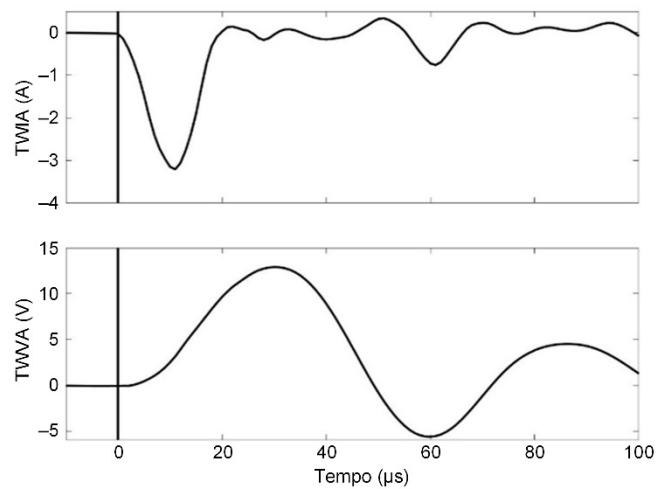


Figura 14. Ondas viajantes de tensão e corrente de fase estão com polaridades opostas para um evento a frente.

A figura 15 mostra o torque (onda viajante de corrente multiplicada pelo negativo da onda viajante de tensão) e o torque integrado. O relé libera a saída TW32F quando o torque integrado, após as primeiras dezenas de microsegundos, excede uma margem de segurança.

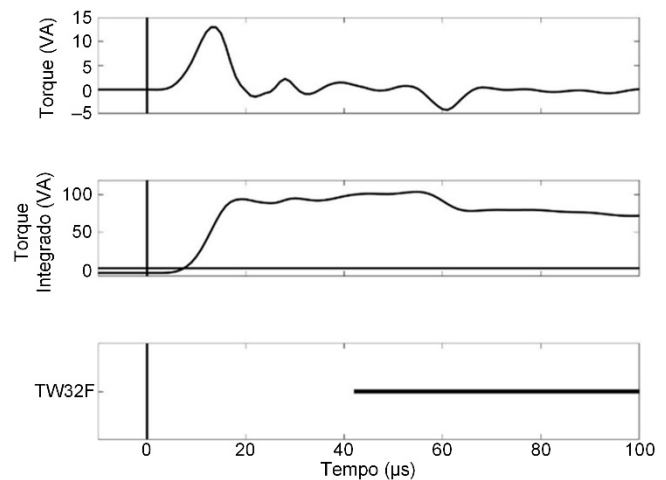


Figura 15. Torque integrado é positivo e excede o limite mínimo exigido para liberar o elemento TW32F

A figura 16 mostra as ondas viajantes de corrente dos terminais L e R, associados a fase A sob falta.

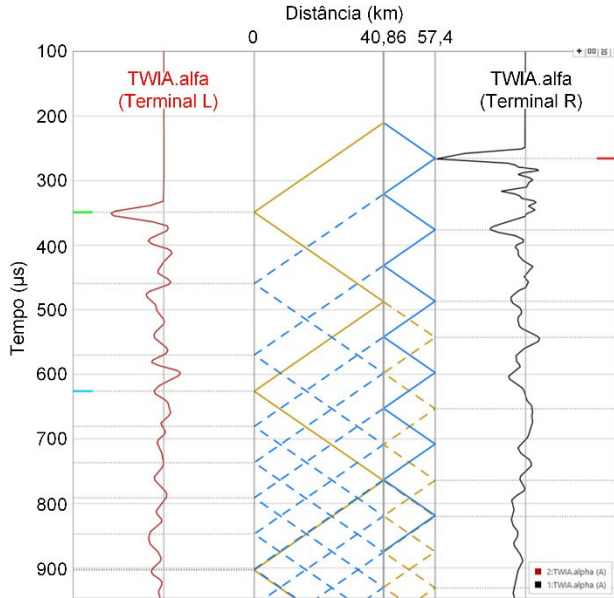


Figura 16. Ondas viajantes da corrente da fase A e diagrama de Bewley Lattice dos terminais L e R para a falta de 18 de janeiro de 2018.

Baseado no tempo de chegada da primeira onda, o local da falta visto pelo terminal L é mostrado em (5).

$$FL_L = \frac{57,4 \text{ km}}{2} \cdot \left(1 + \frac{84,313 \mu\text{s}}{199,075 \mu\text{s}}\right) = 40,86 \text{ km} \quad (5)$$

C. Falta Fase A à Terra em 20 de janeiro de 2018

As figuras 17 e 18, mostram registros de correntes e tensões dos terminais L e R, respectivamente, para esta terceira falta a ser analisada. O elemento direcional por ondas viajantes (TW32) operou em 120 μs , e os elementos por grandezas incrementais, direcional (TD32) e distância (TD21) operaram em 1,22 ms e 2,4 ms, respectivamente, no terminal L. Neste evento, a falta aconteceu a 40% do alcance ajustado. A figura 17 também mostra, para efeito comparativo, o tempo de operação do elemento de distância baseado em fasores e que estava em serviço. A zona 1 do elemento de distância baseado em fasores (Z1) operou em 18 ms.

Os relés registraram dois eventos de faltas eminentes antes desta falta da fase A para terra. O primeiro precursor ocorreu no pico negativo da tensão ($t = 0$), o segundo aconteceu no pico positivo da tensão ($t = 10,29$ ms) e a falta da fase A para terra aconteceu em $t = 10,74$ ms. Baseado na cronologia de tempo associada com as ondas viajantes de corrente provenientes de ambos terminais, os dois precursores de falta e a falta ocorreram a 14,06 km do terminal L. A figura 19 mostra as ondas viajantes

de corrente de fase e as tensões de ambos terminais para o período de tempo, incluindo as duas faltas eminentes e a falta propriamente dita.

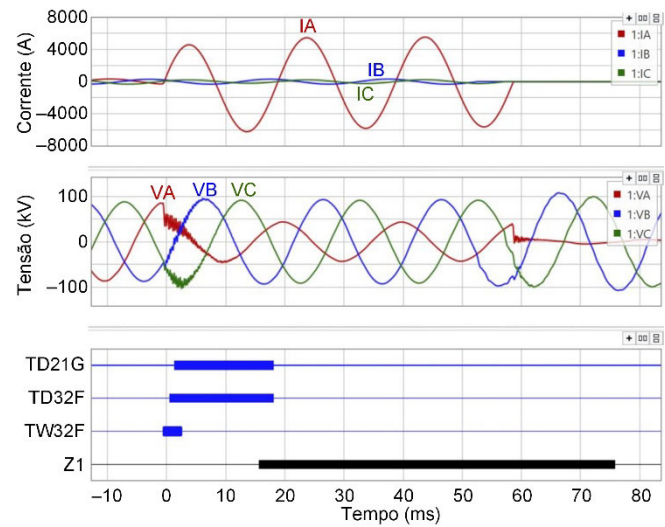


Figura 17. Tensões e correntes registradas no terminal L para a falta de 20 de janeiro de 2018

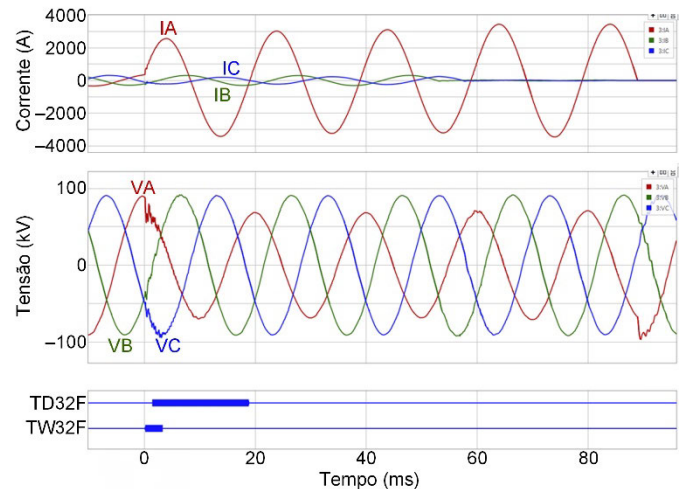


Figura 18. Tensões e correntes registradas no terminal R para a falta de 20 de janeiro de 2018

Quando a falta eminente ou evento transitório é disparado no pico negativo de tensão, é injetado na linha um degrau positivo, resultando numa onda viajante de corrente negativa nos terminais (polaridade de corrente). Com esta capacidade de registrar precursores de faltas, no futuro, os relés poderão detectar e localizar este tipo de faltas e fornecerem alarmes ao usuário, caso a quantidade de eventos exceder um limite dentro de uma janela de tempo específica.

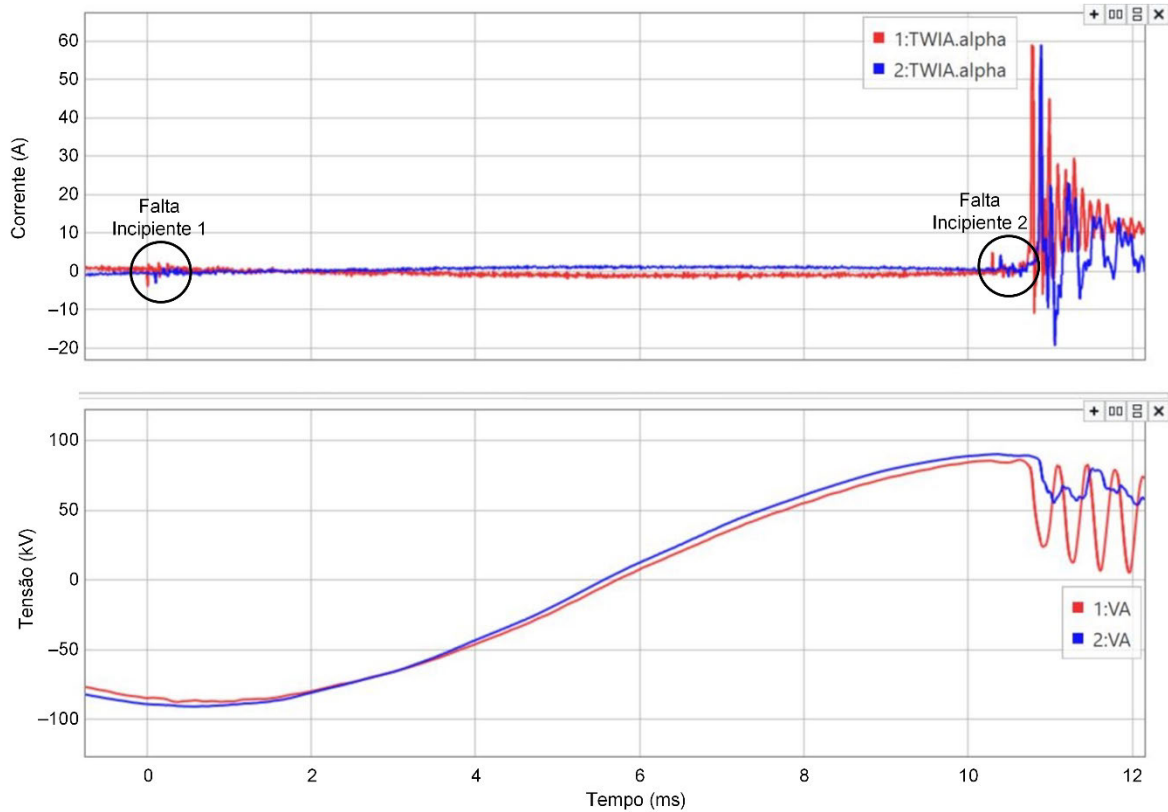


Figura 19. Ondas viajantes de corrente da fase sob falta registradas durante o evento

A figura 20 mostra as ondas viajantes de corrente registradas nos terminais L e R, para a fase A sob falta.

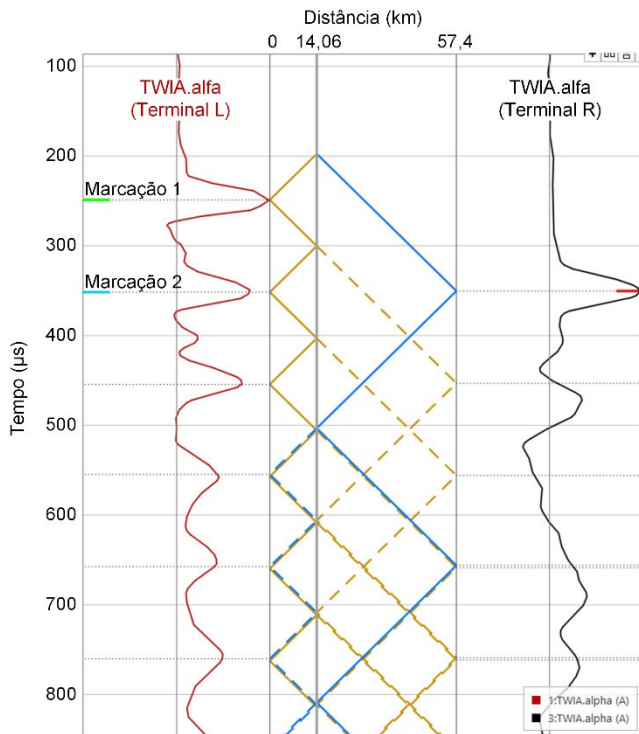


Figura 20. Onda viajante da corrente da fase A e diagrama de Bewley e Lattice registrados nos terminais L e R, para a falta de 20 de janeiro de 2018

Baseado no tempo de chegada da primeira onda associada a falta, o local da falta visto pelo terminal L é mostrado em (6).

$$FL_L = \frac{57,4 \text{ km}}{2} \cdot \left(1 - \frac{101,52 \mu\text{s}}{199,075 \mu\text{s}}\right) = 14,06 \text{ km} \quad (6)$$

Usando somente sinais do terminal L, o método TWFL considerando apenas um terminal pode ser aplicado para calcular o local da falta [9]. (Note que o método TWFL considerando um terminal também pode ser aplicado para os eventos discutidos previamente). Usando a diferença de tempo associada com as marcações 1 e 2 na figura 20, o local da falta é determinado como mostrado em (7).

$$FL_{SE_L} = \frac{57,4 \text{ km}}{2} \cdot \left(1 + \frac{101,72 \mu\text{s}}{199,075 \mu\text{s}}\right) = 14,66 \text{ km} \quad (7)$$

V. CONCLUSÃO

A Concessionária de energia na qual o projeto piloto foi instalado, experimentou muitos desafios em na localização de faltas em suas linhas de transmissão. Eles acreditam fortemente que usando tecnologia para localizar faltas de forma precisa e eliminar as faltas em velocidade ultra-rápida, UHS, irão melhorar os indicadores SAIDI e SAIFI. Este artigo analisou três faltas internas na linha de transmissão, de forma a demonstrar o desempenho do relé com TWFL e funções de proteção UHS.

As tabelas II e III mostram os tempos de operação das funções de proteção UHS nos dois terminais. O elemento direcional operou em menos de 3 ms e o máximo tempo de operação do elemento de distância foi de 10 ms.

TABELA II
TEMPOS DE OPERAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO NO TERMINAL L

Terminal L	TD32 (ms)	TW32 (ms)	TD21 (ms)
Evento 1 (AG), 16,85 km	2	–	10
Evento 2 (AG), 40,86 km	1,31	0,11	–
Evento 3 (AG), 14,06 km	1,22	0,12	2,4

TABELA III
TEMPOS DE OPERAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO NO TERMINAL R

Terminal R	TD32 (ms)	TW32 (ms)	TD21 (ms)
Evento 1 (AG), 40,55 km	1,6	0,15	–
Evento 2 (AG), 16,54 km	1,24	0,042	2,54
Evento 3 (AG), 43,34 km	1,42	0,12	–

Usando amostragens e armazenagem de dados da ordem de mega-hertz, o relé também registrou precursores de faltas e reignição de arco em disjuntor. Detectar e localizar faltas eminentes é uma área de investigação bastante ativa, que a avançada capacidade de registro em relés UHS permite. Isso também abre a possibilidade de investigação de potenciais problemas em equipamentos primários.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] T. W. Stringfield, D. J. Marhart, and R. F. Stevens, "Fault Location Methods for Overhead Lines," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers – Part III: Power Apparatus and Systems*, Vol. 76, Issue 3, April 1957, pp. 518–529.
- [2] P. F. Gale, "Overhead Line Fault Location Based on Travelling Waves and GPS," proceedings of the Precise Measurements in Power Systems Conference, Arlington, VA, October 1993.
- [3] S. Marx, B. K. Johnson, A. Guzmán, V. Skendzic, and M. V. Mynam, "Traveling Wave Fault Location in Protection Relays: Design, Testing, and Results," proceedings of the 16th Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference, Atlanta, GA, May 2013.
- [4] 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 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2014.
- [5] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, A. Guzmán, V. Skendzic, and M. V. Mynam, "Speed of Line Protection – Can We Break Free of Phasor Limitations?" proceedings of the 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2015.
- [6] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, and M. V. Mynam, "Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults," proceedings of the 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, April 2016.
- [7] B. Kasztenny, A. Guzmán, N. Fischer, M. V. Mynam, and D. Taylor, "Practical Setting Considerations for Protective Relays That Use Incremental Quantities and Traveling Waves," proceedings of the 43rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2016.

- [8] A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, J. L. Eternod, and R. M. Morales, "Directional Elements – How Fast Can They Be?" proceedings of the 44th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2017.
- [9] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, C. Gallacher, and S. Marx, "Accurate Single-End Fault Location and Line-Length Estimation Using Traveling Waves," proceedings of the 13th International Conference on Developments in Power System Protection, Edinburgh, United Kingdom, March 2016.

VII. BIOGRAFIAS

Shitaprajnyan Sharma recebeu seu diploma de pós-graduação em negócios internacionais com louvor, do Indian Institute of Foreign Trade em 2016 e bacharelado em engenharia elétrica, com louvor, da Utkal University em 2006. Iniciou sua carreira profissional como engenheiro projetista de sistemas de potência. Trabalhou na ABB como engenheiro de proteção. Iniciou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. em 2011 como engenheiro de aplicação e atualmente está trabalhando como gerente de Engenharia de Aplicação na Índia. Tem estado envolvido com soluções de proteção de subestações e geradores, transferências rápidas de barramentos de motores, engenharia de aplicação, testes e comissionamento de soluções de proteção e controle.

Mangapathirao V. Mynam recebeu seu título de Mestre em Ciências de Engenharia Elétrica pela Universidade de Idaho em 2003 e seu bacharelado em engenharia elétrica e eletrônica pela Andhra University College of Engineering, India, em 2000. Iniciou atividades profissionais na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) em 2003 como engenheiro de proteção associado na divisão de engenharia e serviços. Atualmente trabalha como engenheiro pesquisador na área de pesquisa e desenvolvimento da SEL. Foi selecionado a participar do U. S. National Academy of Engineering (NAE) 15th Annual U. S. Frontiers of Engineering Symposium. É membro senior do IEEE e possui patentes nas áreas de proteção, controle e localização de faltas de sistemas de potência.