

# Relé de Proteção com Localização de Falhas por Ondas Viajantes – Experiência na Linha de Transmissão Londrina-Assis 500 kV

Waldemar Pereira, Ricardo da Veiga, e Falvio Vosgerau, *Copel GET*  
Paulo Lima, Andrei Coelho, e Rafael Cernev, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

**Resumo**—O objetivo do trabalho é avaliar a performance da localização de falhas por ondas viajantes em um relé de proteção diferencial na linha de transmissão Londrina-Assis C2. O trabalho inicia com uma revisão das vantagens e limitações dos principais métodos de localização de falhas disponíveis. São avaliados diversos casos de localização reportados pelo relé para falhas na linha em questão. O trabalho avalia os critérios para ajuste, possibilidade de localização no caso de religamento sob falhas e o uso do diagrama de Bewley-Lattice para avaliar a qualidade do resultado.

## I. INTRODUÇÃO

A informação sobre localização de falta (LF) é crítica na operação e manutenção (O&M) de sistemas elétricos de transmissão. A LF precisa reduzir os custos de O&M das linhas, evitando longos períodos de desligamento e trabalhos de alta custo de inspeção in loco para identificação do defeito. Uma LF precisa possibilita que os reparos e o restabelecimento sejam realizados de forma rápida, reduzindo as perdas de receita devido à indisponibilidade da linha de transmissão.

Por décadas, várias versões do método de Takagi baseados em medições de um ou dois terminais da linha foram utilizadas nos relés digitais para LF, trazendo grandes benefícios para a manutenção e operação de linhas de transmissão (LTs). Entretanto, diversos fatores como resistência de falta, linhas paralelas, linhas com compensação série, Infeed e sistemas não homogêneos e a própria precisão dos parâmetros da linha limitam a aplicação deste método. A redução no tempo total de eliminação das falhas, decorrente de funções de proteção mais velozes, também é um fator limitante para os métodos baseados em impedância. Essas limitações impõem um desafio frente aos requisitos de disponibilidade e confiabilidade exigidos para a operação das linhas de transmissão. Por outro lado, a localização de falhas por ondas viajantes possibilita uma precisão da ordem de um vão de torre, independentemente das características da LT.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a experiência da COPEL-GT na utilização de um relé de proteção diferencial de linhas que possui incorporada a função de localização de falhas por ondas viajantes (TW – Traveling Wave) de dois terminais. Este equipamento também possui métodos de localização de falhas baseados em impedância de um e dois terminais, possibilitando uma comparação entre os métodos. O IED (Intelligent Electronic Device) está em operação na linha de transmissão aérea em 500 kV Londrina (LON)-Assis (ASS) C2.

Uma ferramenta de software é utilizada para avaliar as oscilografias obtidas durante o comissionamento e em falhas reais ocorridas na LT. Tais registros possuem alta taxa de amostragem com as informações das ondas viajantes, permitindo: análise de falta real na linha de transmissão através do diagrama de Bewley-Lattice; comparação entre as LFs pelos diversos métodos disponíveis; medição da velocidade de propagação da onda viajante na LT, parâmetro necessário para a função de localização por TW.

## II. PRINCIPAIS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DISPONÍVEIS

Existem vários métodos de LF em linhas de transmissão e estes podem ser divididos em dois grandes grupos – baseados em impedâncias e baseados em ondas viajantes. Estes apresentam vantagens e limitações.

### A. Métodos Baseados em Impedância [1]

#### 1) Método de Takagi Modificado – SEZFL (Single-Ended Impedance-Based Fault-Location)

Utiliza dados de um terminal, apresenta bons resultados para sistemas radiais. Está presente na grande maioria dos IEDs de proteção de linhas

- Vantagens: independente de comunicação e sincronização temporal;
- Limitações: é afetada pela resistência de falta juntamente com carregamento da linha, efeito Infeed, acoplamento mútuo de sequência zero e não-homogeneidade do sistema. Depende da precisão da impedância de sequência positiva ( $Z_1$ ) e zero ( $Z_0$ ).

#### 2) Método da Corrente Diferencial – MEZFL-1 (Multi-Ended Impedance-Based Fault-Location-1)

É o método de Takagi modificado, porém utiliza corrente diferencial para polarização

- Vantagens: melhora muito a performance do Takagi Modificado com polarização local, é fácil ser implementado em relés diferenciais de linha e não depende de sincronismo de tempo de alta precisão, uma vez que o próprio canal diferencial provê sincronismo com qualidade suficiente, desde que sejam simétricos;

- Limitações: sua precisão depende da precisão dos parâmetros  $Z_1$  e  $Z_0$  e é afetado pelo acoplamento mútuo de sequência zero.
- 3) *Método da Sequência Negativa Multiterminal – MEZFL\_2 (Multi-Ended Impedance-Based Fault Location-2)*

Utiliza correntes e tensões de sequência negativa de todos os terminais da LT

- Vantagens: não depende de  $Z_0$  e não é influenciado pelo acoplamento mútuo de sequência zero;
- Limitações: a precisão depende do parâmetro  $Z_1$  e depende de sincronismo de tempo de alta precisão em todos terminais da linha.

Todos os métodos anteriores apresentam limitações para aplicações em LTs com compensação capacitiva série. Adicionalmente, a redução do tempo de eliminação de faltas tem dificultado as localizações baseadas por impedância. É preciso aguardar a acomodação do transitório do início da falta e do transitório criado pela abertura do disjuntor para que se tenha um cálculo confiável, com estabilização da impedância aparente medida pelo relé. Com a curta duração da falta (~2 ciclos), praticamente não há tempo para a estabilização.

### B. Métodos Baseados em Ondas Viajantes

#### 1) Método de Dois Terminais – DETWFL (Dual-Ended Traveling-Wave Fault Location)

Utiliza as primeiras frentes de onda provenientes da falta que chegam em cada terminal da LT [2]. O cálculo pode ser feito manualmente ou automaticamente pelo IED

- Vantagens: Precisão não depende das impedâncias  $Z_1$  e  $Z_0$ . É aplicável em linhas com compensação série e TAPs. Não é influenciado por carga, resistência de falta, acoplamento mútuo de sequência zero, infeed e nem homogeneidade do sistema. Resultados de campo têm mostrado precisão da ordem de um vão de torre;
- Limitações: Requer o sincronismo de tempo de alta precisão em todos terminais da LT. Depende de comunicação entre os terminais para uma localização em tempo real.

#### 2) Método de Um Terminal – SETWFL (Single-Ended Traveling-Wave Fault Location)

Utiliza a primeira frente de onda proveniente da falta e suas reflexões. O cálculo pode ser feito manualmente [3] ou automaticamente pelo IED [4]

- Vantagens: apresenta todas as vantagens do método DETWFL e independe de comunicação e sincronismo horário de alta precisão;
- Limitações: difícil aplicação em linhas com TAPs ou com mais que dois terminais.

### III. RELÉ DE PROTEÇÃO COM LOCALIZAÇÃO DE FALTAS POR ONDAS VIAJANTES

O primeiro passo para implementação do método DETWFL em um IED é a identificação precisa dos tempos de chegada ( $t_{TW}$ ) das frentes de onda lançadas pela falta em cada terminal da LT. Uma vez identificada a frente de onda, os tempos de

chegada devem então ser transmitidos para um dispositivo que irá realizar o cálculo através de um canal de comunicação ou o cálculo deve ser feito de maneira manual. Os IEDs que fazem a identificação do tempo de chegada da frente de onda devem ter seus relógios internos sincronizados com alta precisão. A referência [2] aborda os requisitos e descreve um método para identificação do tempo de chegada.

No momento que ocorre a falta na LT são geradas TWs de tensão e de corrente – a relação entre a onda de corrente e tensão é dada pela impedância característica (ou impedância de surto) da LT em questão. Ambas podem ser utilizadas para localização de faltas. A questão é: qual produz o melhor sinal para LF?

Estas ondas são entregues para o IED através dos transformadores de potencial (TP) e corrente (TC). Os transformadores de potencial capacitivos (TPCs) provocam uma grande atenuação nos sinais da ordem de dezenas a centenas de kHz, enquanto os TCs não apresentam atenuação significativa para esta faixa de frequência [5]. Desta forma, o sinal de corrente é preferencialmente utilizado para o DETWFL.

Relés diferenciais de linha (87L) fazem a medição dos sinais de corrente em cada terminal da linha e transmitem esta informação para o relé do terminal remoto via canal de comunicação, conforme mostrado na Fig. 1. Isso os tornam ótimos candidatos para implementação do DETWFL, bastando que, além da corrente, o equipamento envie também a estampa de tempo da chegada da frente de onda para o terminal remoto. Assim podem realizar o cálculo da LF conforme em (1), de maneira automática (online). O tempo que a TW percorre no secundário do TC pode ser compensando para otimizar a localização.

$$DETWFL = \frac{LL + (t_{TW-A} - t_{TW-B}) \times C \times LPVEL}{2} \quad (1)$$

onde:

$LL$  é o comprimento da linha.

$t_{TW-A}$  e  $t_{TW-B}$  são os tempos de chegada do TW registrados pelos IEDs A e B, respectivamente.

$C$  e  $LPVEL$  são, respectivamente, a velocidade da luz e velocidade de propagação em pu da velocidade da luz.

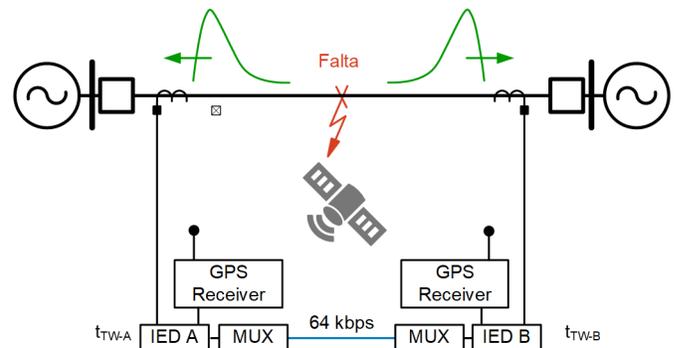


Fig. 1. Implementação do DETWFL em IED de proteção diferencial de linhas.

Existem diversos benefícios para as concessionárias de energia neste tipo de implementação:

- Evitar os custos de aquisição, instalação e comissionamento de equipamentos adicionais.
- Estes IEDs já recebem as informações de tensão e corrente da linha e possuem métodos de LF por impedância, que complementam a localização por TW.
- Informar a LF em tempo real para o sistema de supervisão e controle via protocolo de comunicação.
- Ativar a LF somente quando há uma falta interna da linha em questão – supervisionado pelo 87L, zona 1 de distância ou disparo por esquema de teleproteção por comparação direcional. Assim, a LF não é influenciada por faltas consecutivas (externa e posteriormente interna).

O IED aplicado na LT em questão possui os métodos SEZFL, MEZFL-1 e DETWFL. Os resultados destes métodos são disponibilizados em tempo real às equipes de operação da COPEL.

#### IV. A LINHA DE TRANSMISSÃO ASSIS-LONDRINA CIRCUITO 2

O empreendimento referente à LT Assis-Londrina Circuito 2, fez parte do lote M do Leilão de Transmissão 001/2014-ANEEL, arrematado pela COPEL em 09/01/2015. O empreendimento consiste em uma linha de transmissão em circuito simples, em nível de tensão de 525 kV e capacidade mínima 3120 A, comprimento de 122.03 km, além de duas entradas de linha em configuração disjuntor e meio (em ambos extremos). Esta LT reforçou a integração sul-sudeste ao centro dos estados de São Paulo e Paraná, em classe de 525 kV, antes realizada apenas pela LT ASS-LON Circuito 1, além dos circuitos da LT Bateias-Ibiúna, mais ao leste. Na Fig. 2 [6] é apresentado uma visão geral do diagrama do empreendimento e instalações existentes vizinhas.

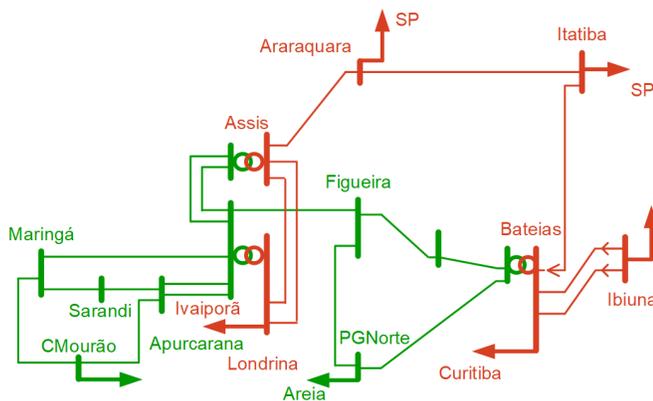


Fig. 2. Diagrama unifilar simplificado do empreendimento.

Devido a importância da interligação, a potência ativa é monitorada no terminal da SE e este dado é enviado ao ONS para integrar o sistema de controle automático de geração (CAG).

A LT foi construída com base em 210 estruturas estaiadas, 27 autoportantes e cabos guarda contendo fibra óptica (OPGW). O uso de OPGW possibilitou o uso de sistemas de proteção baseados em comunicação em tempo real, tal como os relés diferenciais de linha (87L). Proposta pelo construtor e aprovado pela COPEL, dois conjuntos de relés diferenciais de linha SEL-411L [7] foram instalados em cada terminal da linha.

O uso de uma nova tecnologia de localização de falta integrada aos relés de proteção SEL-411L, baseada em ondas viajantes de corrente, e não tensão como já utilizado em outros empreendimentos pela COPEL, foi ofertado pelo consórcio. O fato da localização por TW estar incorporado ao relé de proteção não implicou em custos adicionais ao projeto, a proposta foi aceita e adicionada ao projeto. A LT entrou em operação em 09/08/2017.

#### V. COMISSONAMENTO, ANÁLISE DE CASOS E RESULTADOS

##### A. Determinando a Velocidade de Propagação das TWs

Conforme descrito anteriormente, o DETWFL requer apenas os ajustes LPVEL e LL para cálculo da localização. Normalmente as concessionárias têm uma estimativa do comprimento da linha baseando-se no comprimento linear ou geográfico. Algumas consideram a flecha da linha em suas estimativas de comprimento. Na linha sob estudo, o comprimento foi determinado a partir das coordenadas geográficas, método da distância entre pontos. A LPVEL pode ser medida indiretamente, a partir do comprimento da linha e o tempo de propagação da onda viajante (TWLPT), conforme em (2). O TWLPT pode ser obtido utilizando os registros de ondas viajantes feito pelo IED durante um teste de energização da linha, que é descrito em seguida.

$$LPVEL = \frac{LL}{TWLPT \times C} \quad (2)$$

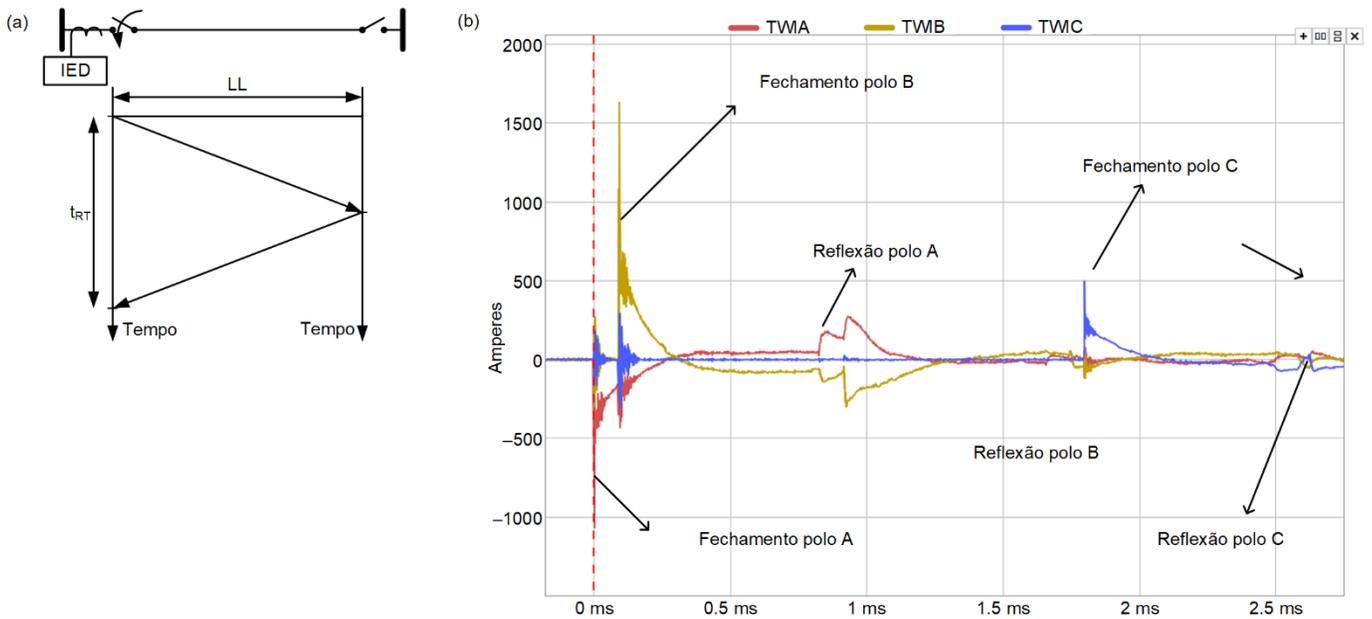


Fig. 3. Representação do teste de energização (a) Registro de 1.5 MHz do teste de energização (b).

O teste consiste em energizar a linha fechando-se o disjuntor (DJ) em um dos terminais e mantendo o DJ do terminal remoto aberto. No momento em que o DJ é fechado e a linha energizada é criada uma TW de tensão e outra de corrente. A TW de corrente percorre toda LT, atinge o terminal remoto e reflete-se totalmente, com polaridade oposta [3]. Percorre toda LT novamente e retorna ao terminal onde o DJ foi fechado, com uma diferença de tempo  $t_{RT}$  (tempo de round-trip), conforme na Fig. 3(a). O IED gera uma oscilografia de extra alta resolução (1.5 MHz) e registra as TWs lançadas e refletidas. O fechamento de cada polo produzirá uma TW na respectiva fase e o fenômeno pode ser observado nas três fases, conforme Fig. 3(b). O teste de energização foi realizado durante o comissionamento do novo sistema de proteção e controle da linha. Ao longo do comissionamento foram executados fechamentos de um dos DJs da SE ASS mantendo-se os DJs da SE LON abertos.

Na Fig. 3(b) a fase C é a última a fechar e deve ser preferencialmente utilizada para medição de  $t_{TR}$ , por dois motivos: como os três polos já estão energizados a linha estará mais próxima da sua condição real de operação; a energização de um polo induz TWs nas outras fases, o que pode dificultar a identificação da TW refletida. Pode-se utilizar a média entre as fases ou de diferentes energizações. Outra maneira de medir  $t_{RT}$  é na ocorrência de uma falta externa à LT, que irá provocar

TWs que percorrerão toda LT. Normalmente estes tempos apresentam um pequeno desvio e não resultam em uma diferença significativa na LF.

Na Fig. 4 é dado um destaque para a fase C, pode-se observar o momento que o polo desta fase fecha (polaridade positiva) e o momento que a TW refletida do terminal remoto retorna ao terminal da SE ASS (polaridade negativa). O round-trip (tempo de ida e volta da TW) observado é de 830.068  $\mu$ s. O software de análise (SEL SYNCHROWAVE) possui uma função de interpolação para identificação do tempo de chegada, de maneira que o mesmo método seja utilizado para ambos os picos, sendo também o mesmo método utilizado no IED. O  $TWLPT$  é a metade do tempo  $t_{RT}$ ,  $TWLPT = t_{RT}/2 = 415.034 \mu$ s. Determina-se então a velocidade de propagação em pu da velocidade da luz utilizando (3).

$$\begin{aligned}
 LPVEL &= \frac{LL}{TWLPT \times C} & (3) \\
 &= \frac{122.03 \text{ km}}{415.034 \mu\text{s} \times 299792.458 \text{ km/s}} \\
 &= 0.980759 [\text{pu}]
 \end{aligned}$$

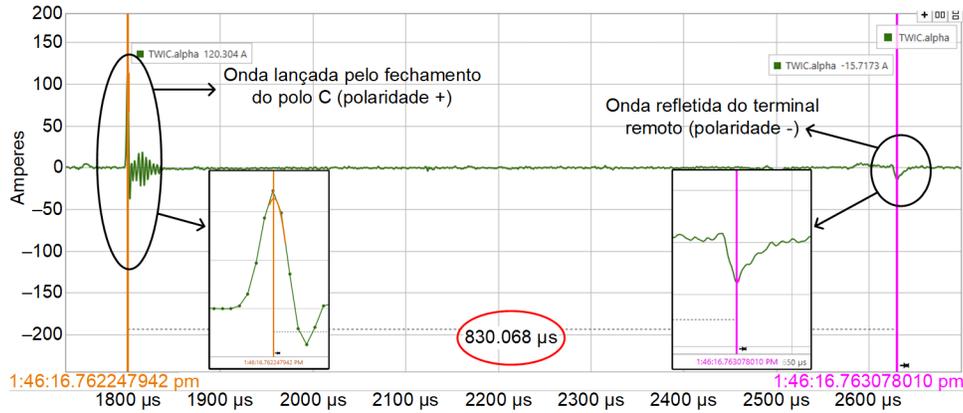


Fig. 4. Medição da diferença de tempo das ondas lançada e refletida do terminal remoto para a fase C.

### B. Utilizando o Diagrama de Bewley-Lattice para Qualificar uma Localização

O software utilizado para análise constrói um diagrama de Bewley conforme os parâmetros informados: LL, LPVEL, LF. A partir do ponto da falta, instante zero, o software traça então o perfil de reflexões nos terminais e no ponto da falta, assim como a refração no ponto da falta. Esta é uma ferramenta extremamente poderosa, pois permite ao usuário avaliar se as TWs registradas pelos IEDs em cada terminal coincidem ou não com a trajetória teórica traçada pelo software. A coincidência dos traçados teóricos com as ondas registradas é uma confirmação de todos os parâmetros estão corretos, incluindo a localização de faltas e o sincronismo de tempo entre os IEDs.

Para um melhor entendimento desde conceito, é possível comparar o diagramas de Bewley elaborados a partir de parâmetros corretos e incorretos (alterados manualmente). Utilizou-se uma falta CG que ocorreu em 16/01/2019 na LT, onde o IED reportou a falta em 79.33 km a partir da SE ASS.

Na as linhas azuis e amarelas representam a trajetória das TWs calculadas pelo software e permitem estimar onde deveriam haver registros de TW. Na

(a) são utilizados os parâmetros originais e na

(b) o LL foi reduzido em 5%. Para melhor visualização, foram introduzidos círculos azuis quando há coincidência entre a estimativa do software e o registro do IED e círculos vermelhos quando não há.

É possível observar que há coincidência total quando são utilizados os parâmetros originais e que há divergências quando o LL é alterado em 5%. Além disso, se este LL reduzido estivesse sendo utilizado como ajuste do IED, a LF reportada por este seria de 75.34 km.

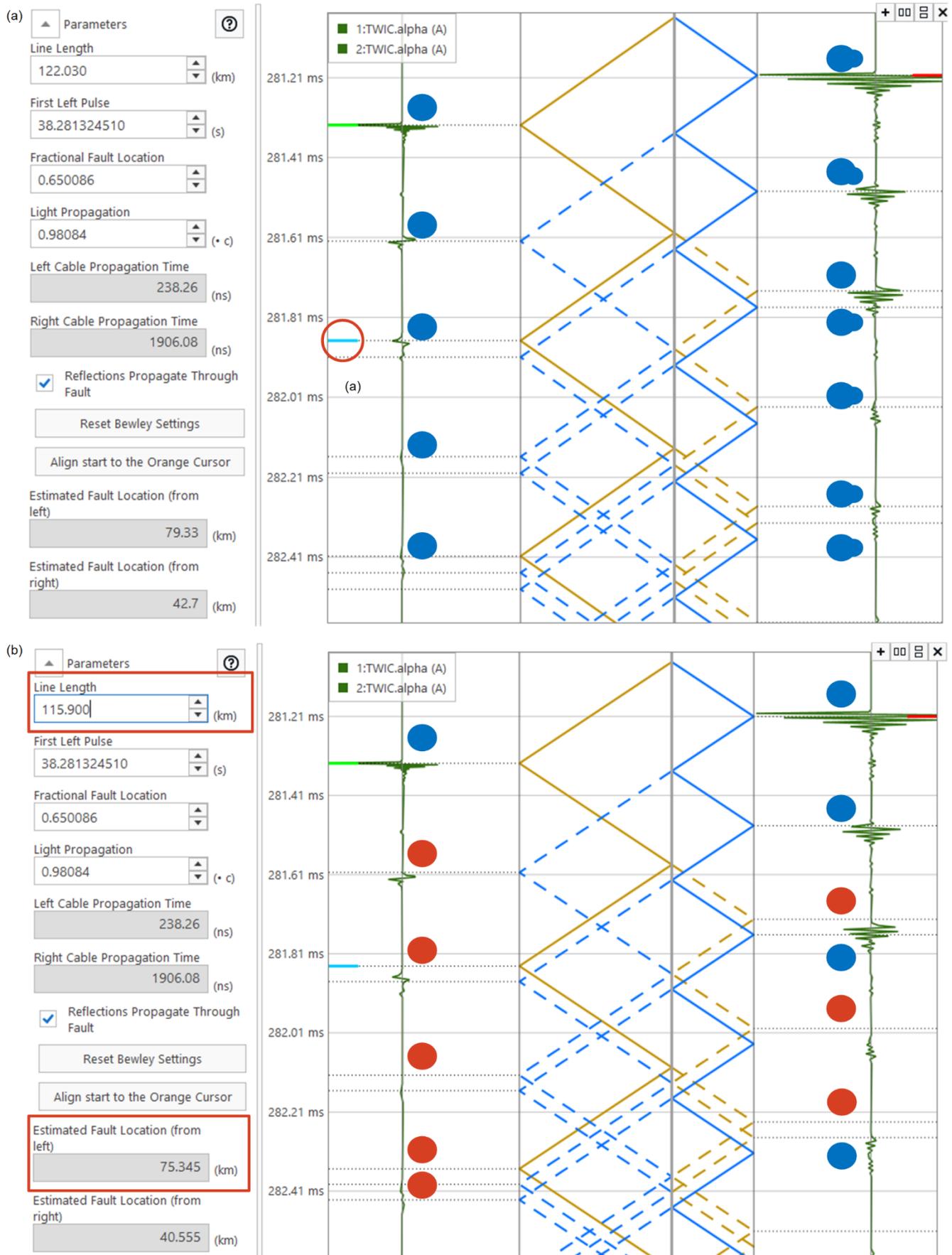


Fig. 5. Diagrama de Bewley com parâmetros corretos (a) e com LL modificado em 5% (b).

### C. Localização por TW no Religamento Sob Falta

No religamento sob falta tem-se uma nova oportunidade para cálculo da LF por TW, que pode ser utilizado para confirmar a primeira LF. Caso a primeira falta tenha ocorrido com a tensão próxima ao cruzamento por zero não haverá degrau de tensão (não há TW), podendo ser a única oportunidade para o cálculo da LF via TW.

O fechamento do disjuntor no terminal líder ocorre com o terminal seguidor encontra-se aberto e, portanto, não é possível capturar os registros de TW de corrente deste último. O método SETWFL pode então ser utilizado. Dispositivos que trabalham com localização por TW de um terminal [8] teoricamente poderiam calcular esta localização automaticamente, porém, o grande número ondas lançadas pelo fechamento dos polos do disjuntor e suas respectivas reflexões toram esta implementação muito complexa. Por outro lado, através da análise manual dos registros de alta frequência, utilizando um software com ferramentas adequadas, pode-se determinar facilmente a localização com o registro de TWs de apenas um terminal. O software de análise aqui utilizado possui uma função para cálculo do SETWFL e o diagrama de Bewley é utilizado para orientar a identificação dos picos.

#### 1) Caso 1 – Religamento Tripolar e Reincidência da Falta em Sequência

A Fig. 6 mostra os registros de 8 kHz (a) e 1.5 MHz (b) do religamento automático do disjuntor na SE ASS que ocorreu 5 segundos após e eliminação da falta BG em 31/10/2018 as 14:00:06, com localização reportada pelo IED de 96.66 km a partir da SE ASS pelo método DETWFL. Pode-se observar que ocorre primeiro o fechamento do polo C do disjuntor, seguido dos polos A e B.

Para as três fases há o registro apenas da onda lançada no momento que ocorre o fechamento do polo e, após duas vezes o TWLPT, o registro da onda refletida no terminal seguidor, com polaridade invertida, assim como no teste de energização.

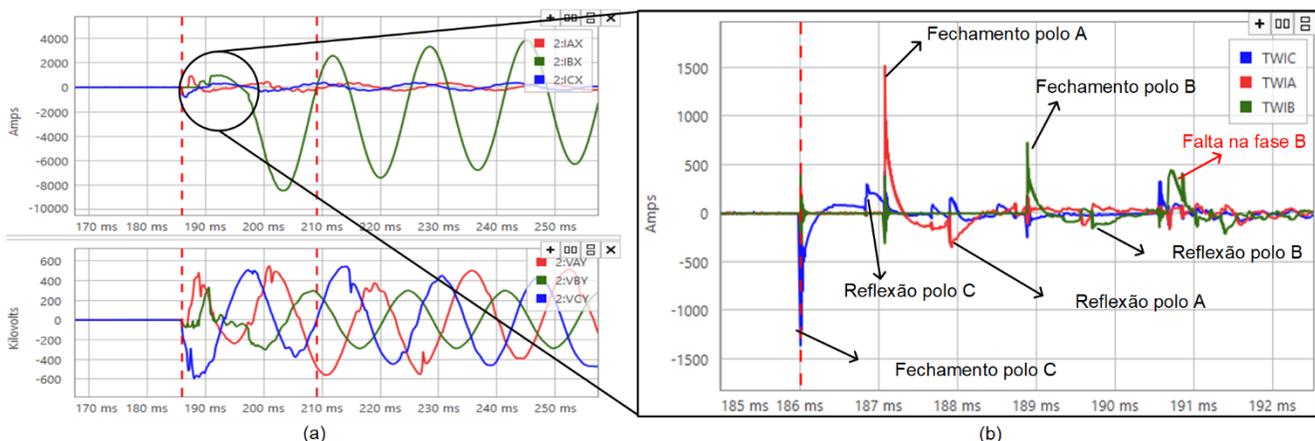


Fig. 6. Registros de 8 kHz (a) e 1.5 MHz do religamento automático (b).

O fato de não haver registro de nenhuma onda refletida na fase B antes da reflexão do terminal seguidor evidencia que a falta não está presente na linha quando ocorre o religamento. Porém, 1 ms após o registro da reflexão do terminal seguidor para fase B ocorre o registro de uma nova frente de onda de alta energia que coincide exatamente com elevação da corrente e afundamento da tensão desta fase. O reestabelecimento da falta na fase B ocorre aproximadamente 1.8 ms após o fechamento do polo B no terminal líder.

A reincidência da falta na fase B lança novamente TWs em direção aos dois terminais da linha. A Fig. 7 mostra o diagrama de Bewley com os registros de ondas viajantes somente do IED da SE ASS (terminal líder), com destaque para o momento que ocorre a reincidência da falta na fase B. É registrada a onda proveniente da falta (cursor verde), as reflexões do terminal seguidor (cursor azul e linhas azuis tracejadas) e a reflexão da falta (cursor vermelho). Apenas com os registros do terminal líder pode-se calcular uma nova localização utilizando a primeira onda proveniente da falta e a primeira reflexão do terminal remoto utilizando (4) [4].

$$\text{SETWFL} = LL - \frac{(t_2 - t_1) \times \text{LPVEL} \times C}{2}$$

$$= 122.03 \text{ km} - \frac{(170.769 \mu\text{s}) \times 0.98084 \times 299792.458 \frac{\text{km}}{\text{s}}}{2} \quad (4)$$

$$= 96.92 \text{ km}$$

onde:

$t_1$  e  $t_2$  são os tempos correspondentes aos cursores verde e azul, respectivamente.

Como esperado, a LF pelo SETWFL calculada durante o religamento é muito próxima da LF pelo DETWFL. Observa-se que os traçados do diagrama de Bewley indicam as reflexões do terminal seguidor e da falta, que coincidem com as TWs registradas pelo IED, isso valida a localização. A LF real para este evento é 96.7 km.

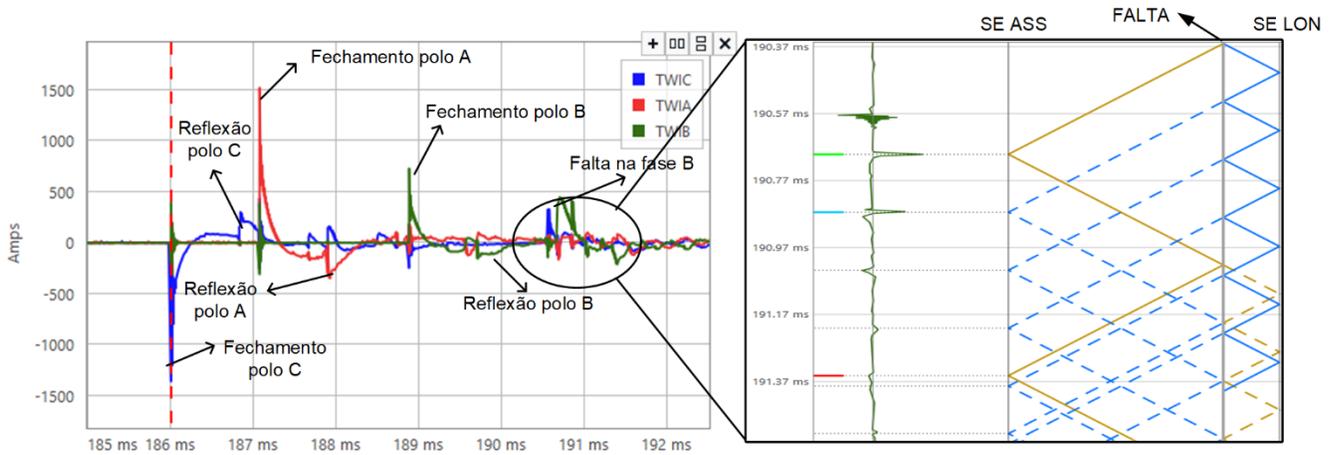


Fig. 7. Diagrama de Bewley com destaque no momento da reincidência da falta na fase B.

## 2) Caso 2 – Religamento sob Falta BG e Evolução para BCG

No dia 18/10/2018 às 16:15:20 ocorreu uma falta BG, com localização reportada em 96.66 km pelo método DETWFL. Aproximadamente 27 segundos após a eliminação da falta ocorreu religamento manual da linha. A Fig. 8 mostra os registros de 15 kHz (a) e 1.5 MHz (b) do religamento do disjuntor na SE ASS. O primeiro polo a fechar é o da fase B, seguido das fases A e C.

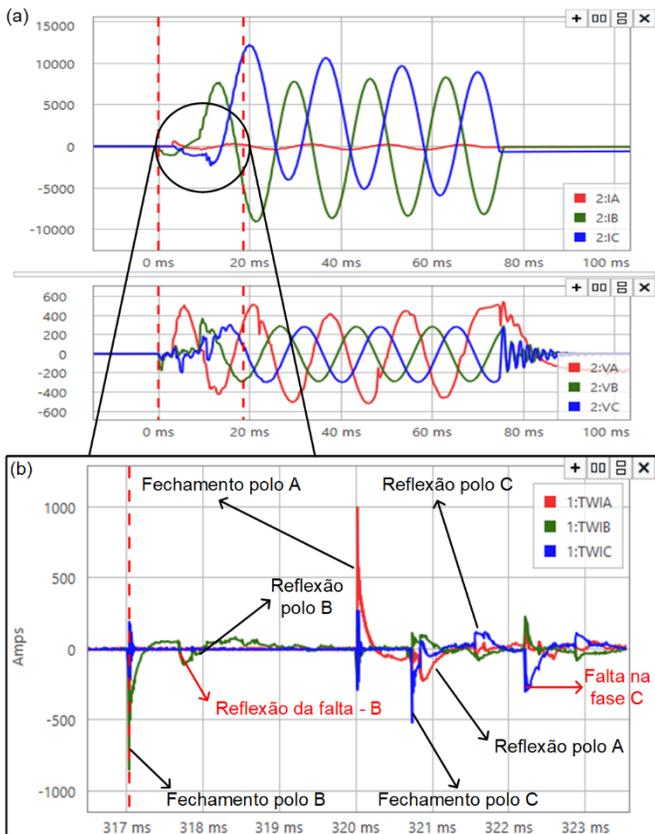


Fig. 8. Registros de 15 kHz (a) e 1.5 MHz (b) do religamento manual.

Diferentemente do religamento anterior, neste caso observamos que após o fechamento da fase B há registro de uma TW antes do registro da reflexão do terminal seguidor, o que indica que a falta na fase B não foi eliminada.

A Fig. 8(a) mostra o diagrama de Bewley com a onda lançada pelo fechamento do DJ e as reflexões da falta e do terminal seguidor. A reflexão da falta permite fazer um novo cálculo da FL pelo método SETWFL. Ao posicionar o cursor verde na onda lançada pelo fechamento do polo e o vermelho na onda refletida da falta o software faz o cálculo da LF automaticamente, indicando uma falta há 96.92 km da SE ASS. O traçado do diagrama de Bewley indicando o momento de chegada da reflexão da SE LON, que coincide exatamente com o registro de uma frente de onda. Isso valida a localização.

Para as fases A e C há registro apenas da onda lançada pelo fechamento dos polos do DJ e suas respectivas reflexões da SE LON. Porém, após registro da reflexão da fase C tem-se o registro de uma nova frente de onda de alta energia nesta fase, conforme destacado na

Fig. 8(b), indicando que houve o envolvimento desta fase na falta. A Fig. 9(b) mostra o diagrama de Bewley para esta fase. Ao posicionar o cursor verde na primeira onda oriunda da falta e o vermelho na reflexão da falta, o software faz o cálculo da LF, indicando uma falta há 96.17 km da SE ASS. O traçado do diagrama de Bewley indicando o momento de chegada da reflexão da SE LON coincide exatamente com o registro de uma TW. Isso valida a localização novamente.

Pode-se também de calcular o TWLPT no mesmo instante que a falta ocorre e calcular a LF utilizando este dado, sem necessidade de medição no comissionamento. Por exemplo, para a fase B, podemos calcular a localização utilizando a reflexão da falta e do terminal seguidor, conforme (5).

$$\begin{aligned} \text{SETWFL} &= LL \times \frac{(t_2 - t_1)}{(t_3 - t_1)} \\ &= 122.03 \text{ km} \times \frac{(659.002\mu\text{s})}{(827.332\mu\text{s})} \\ &= 97.20 \text{ km} \end{aligned} \quad (5)$$

onde:

$t_1$  é o momento de fechamento do polo B do DJ.

$t_2$  a reflexão da falta e.

$t_3$  e do terminal seguidor.

A LF real para este evento é 96.7 km.

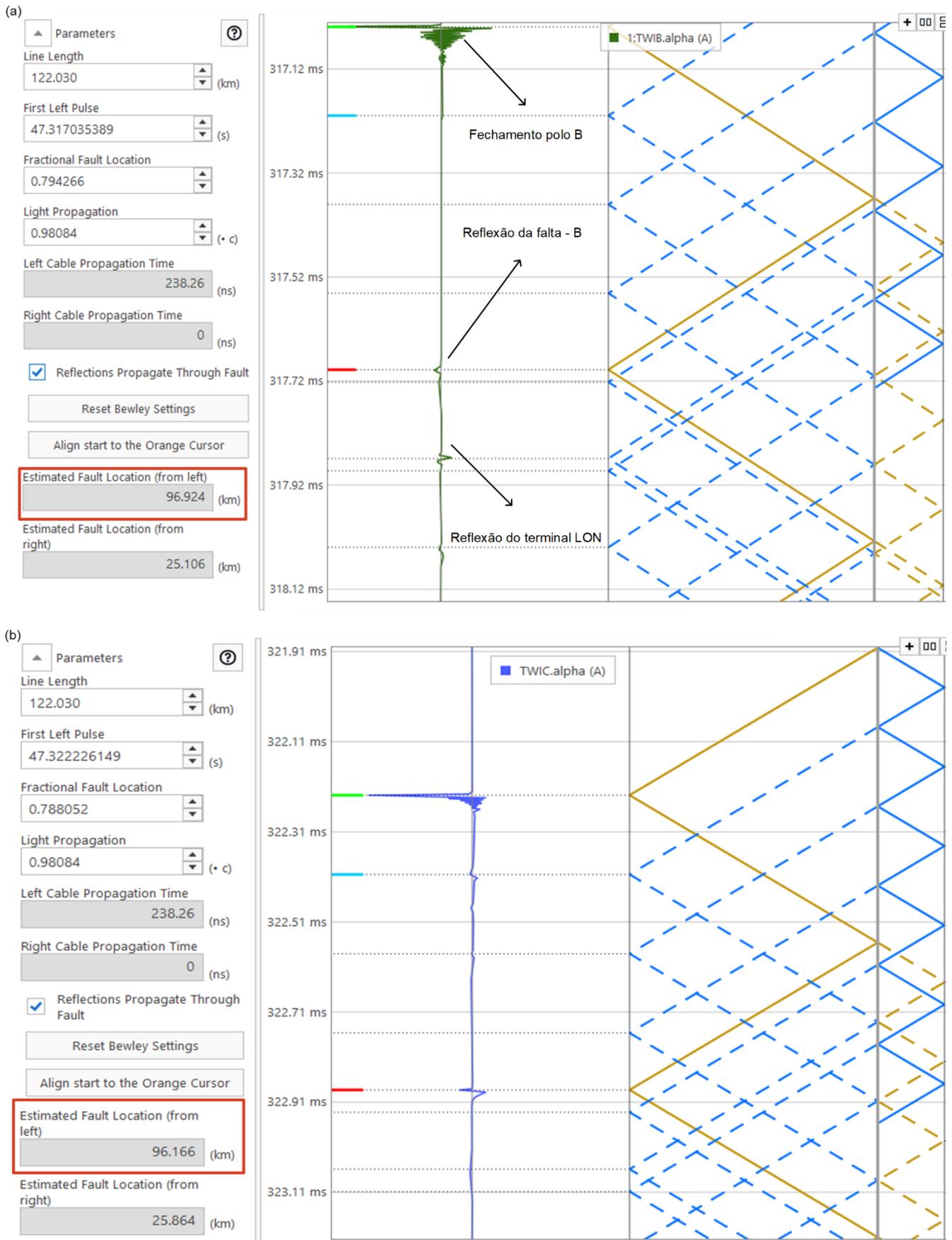


Fig. 9. Diagrama de Bewley religamento sob falta BG (a) e envolvimento da fase C na falta (b).

TABELA I  
RESUMO DAS LOCALIZAÇÕES REAIS E ERROS A PARTIR DA SE ASSIS

ID	Início	Evento	FL Real [km]	DETWFL <sup>(1)</sup> Erro [km]	SETWFL <sup>(2)</sup> Erro [km]	MEZFL-1 <sup>(1)</sup> Erro [km]	SEZFL <sup>(3)</sup> Erro [km]
1	18/01/2018 16:09:46	CG – 79 com sucesso	22.07 <sup>(4)(5)</sup>	0.32	0.3	-2.27	18.93
2	18/10/2018 16:14:27	BG – PR LT 138 kV – 79 com sucesso	96.70 <sup>(4)(6)</sup>	-0.04	0.21	-0.76	26.78
	18/10/2018 16:15:20	BG – PR LT 138 kV	96.70 <sup>(4)(6)</sup>	-0.04	0.22	-0.84	27.18
	18/10/2018 16:15:47	BCG – Religamento manual sob falta	96.70 <sup>(4)(6)</sup>	#	0.22	3.18	2.62
	18/10/2018 16:15:57	BCG – Religamento manual sob falta	96.70 <sup>(4)(6)</sup>	#	-0.03	3.05	3.18
	18/10/2018 16:16:18	BG – Religamento manual sob falta	96.70 <sup>(4)(6)</sup>	#	0.18	-3.12	19.32
3	31/10/2018 13:58:05	BG – PR LT 138 kV – 73 com sucesso	96.70 <sup>(4)(6)</sup>	-0.02	0.22	-0.67	27.51
	31/10/2018 14:00:06	BG – PR LT 138 kV	96.70 <sup>(4)(6)</sup>	-0.04	0.21	-0.24	32.47
	31/10/2018 14:00:11	BG – 79 sob falta	96.70 <sup>(4)(6)</sup>	#	0.22	-2.6	23.7
4	16/01/2019 06:57:38	CG – Descarga atmosférica	78.78 <sup>(4)(5)</sup>	0.55	0.64	-3.3	20.8
	16/01/2019 06:57:43	CG – 79 sob falta	78.78 <sup>(4)(5)</sup>	#	#	-4.77	14.59

Online via IED SEL-411; (2) Offline via software SYNCHROWAVE Event; (3) Offline via playback de oscilografia no IED; (4) Confirmado apenas via sistema de descargas atmosféricas; (5) Diagrama de Bewley verificado de acordo com seção 5.2; (6) Local de cruzamento da LT 138 kV da COPEL-D, confirmando in loco; #No religamento não é possível calcular via este método, pois um terminal está aberto.

#### D. Resumo dos Eventos e Localização Real

A Tabela I mostra os eventos ocorridos desde o comissionamento até o momento que o trabalho foi finalizado. Houveram diversas faltas na linha no período avaliado e algumas reincidências no mesmo local, possibilitando uma análise detalhada da precisão e repetibilidade dos métodos de localização disponíveis. Os eventos com ID 1 e 4 foram falhas temporárias, provocadas por descarga atmosférica. Identificou-se, através do sistema de monitoramento de descargas atmosféricas do Paraná (SisRaios, desenvolvido pelo Simepar) e pelo aplicativo WebGeo da Copel, que houveram descargas atmosféricas no mesmo instante de atuação da proteção. A localização da falha não foi verificada in loco.

Os eventos com IDs 2 e 3 estão todos relacionados com defeitos da LT de 500 kV em análise para o cabo para-raios de uma linha de 138 kV que passa por baixo desta. O vento fez com que os cabos se aproximassem causando o curto-circuito. A localização deste ponto de cruzamento entre as linhas a partir da SE ASS é de 96.7 km. Esta localização e os indícios do curto-circuito foram verificados in loco pela equipe de inspeção da linha.

Pode-se observar que o método SEZFL apresenta erros bastante significativos e variação de acordo com o tipo da falta. Nos eventos com ID 2 é possível observar notadamente esta variação, pois ocorre no mesmo local faltas BG e BCG. O SEZFL apresenta erros expressivos para faltas à terra, todavia para as faltas entre fases a precisão é melhor, porém muito aquém da precisão dos métodos TW. O método MEZFL-1 apresentou resultados razoáveis, com erros inferiores a 5% do LL, independentemente do tipo ou local da falta, tornando-o um ótimo backup para os métodos baseados em TW.

#### VI. CONCLUSÃO

O número de ocorrências na LT no período avaliado evidencia a alta assertividade e disponibilidade do método DETWFL baseado em medições de corrente, calculando a LF para todas as faltas ocorridas na linha. As localizações reportadas por este método apresentaram erros muito baixos, sempre menores que 1%. Os resultados dos métodos DETWFL e SETWFL foram consideravelmente melhores do que os métodos baseados em impedância, para todos os casos.

O registro de alta resolução e um software com ferramentas apropriadas para análise de ondas viajantes, como diagrama de Bewley, permitem uma análise detalhada do evento e avaliação da localização reportada pelo IED. Através da confirmação das reflexões pelo diagrama de Bewley pode-se confirmar a localização, sincronismo de tempo dos IEDs e os ajustes como comprimento da linha e velocidade de propagação.

A implementação em um IED de proteção reduz os custos da solução, garante alta disponibilidade, possibilidade de reportar em tempo real para o centro de operação e localização de faltas backup pelos métodos de impedância de um e dois terminais. O método MEZFL-1 é de fácil implementação relés 87L e mostrou-se como um ótimo backup para o método DETWFL.

A localização precisa de faltas é um recurso essencial para a operação e manutenção das linhas de transmissão. Essa informação garante as equipes de engenharia e manutenção uma atuação mais rápida e efetiva na análise e resolução de ocorrências nas linhas, reduzindo o tempo de desligamentos. Ou seja, proporcionando à concessionária uma operação mais segura, confiável, econômica e com mais qualidade para seus consumidores.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] K. Zimmerman, D. Costello, “Impedance-Based Fault Location Experience”, Originally presented at the 31st Annual Western Protective Relay Conference, October 2004.
- [2] E. O. Schweitzer III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, S. Marx “Locating Faults by the Traveling Waves They Launch”, Originally presented at the 40th Annual Western Protective Relay Conference, October 2013.
- [3] E. O. Schweitzer III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, C. Gallacher, S. Marx, “Accurate Single-End Fault Location and Line-Length Estimation Using Traveling Waves”, Originally presented at the 13th International Conference on Developments in Power System Protection, March 2016.
- [4] Armando Guzmán, Bogdan Kasztenny, Yajian Tong, and Mangapathirao V. Mynam, “Accurate and Economical Traveling-Wave Fault Locating Without Communications”, Originally presented at the 44th Annual Western Protective Relay Conference, October 2017.
- [5] N. Fischer, V. Skendzic, R. Moxley, J. Needs, “Protective Relay Traveling-Wave Fault Location”, Presented at the 11th International Conference on Developments in Power System Protection Birmingham, United Kingdom April 23–26, 2012
- [6] Edital do leilão de transmissão 001/2014-ANEEL, Lote M.
- [7] SEL-411L Advanced Line Differential Protection, Automation, and Control System Instruction Manual.
- [8] SEL-T400L Ultra-High-Speed Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder.

## VIII. BIOGRÁFICOS

**Waldemar Pereira** atua como engenheiro de proteção, automação e controle na COPEL desde 2012. Possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP). Tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em transmissão e distribuição de energia, atuando como pesquisador nos seguintes temas: reconfiguração e restauração de sistemas de distribuição, proteção, automação e controle de sistemas de distribuição, otimização clássica e meta-heurísticas.

**Ricardo da Veiga** atua como técnico de manutenção de linhas de transmissão na COPEL GET desde 2006. Possui formação técnica em eletrotécnica, pelo Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET-PR) e graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Tem experiência na área de manutenção e automação de processos, bem como na área de manutenção de linhas de transmissão. Atua como gestão de ativos, manutenção e comissionamento de linhas de transmissão.

**Flávio Vosgerau** é formado em Engenharia Industrial Elétrica, ênfase Eletrotécnica pela UTFPR (2002) e possui Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFSC (2011). Desde 2002 integra o quadro da COPEL GeT atuando inicialmente no desenvolvimento de software de engenharia e após 2010 como engenheiro de proteção, controle e automação. Tem experiência na área de engenharia elétrica, estudos de proteção, análise de ocorrências e comissionamento de obras de geração e transmissão de energia.

**Paulo Lima** é formado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Itajubá em 2012 e especialista em Automação de Sistemas Elétricos pelo INATEL em 2015. Desde 2012 faz parte da equipe de engenharia da Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) e desde 2018 atua como coordenador da equipe de Engenharia de Aplicação e Suporte Técnico da SEL Brasil. É instrutor da Universidade SEL e autor de diversos artigos técnicos nas áreas de transmissão, distribuição e geração de energia elétrica.

**Andrei Coelho** é formado em engenharia elétrica com ênfase em sistemas elétricos de potência na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2014 e está concluindo sua especialização em automação de sistemas elétricos pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) em 2019. Trabalha na engenharia de aplicação e suporte técnico da SEL desde 2014, especialmente com aplicações em transmissão e distribuição de energia, além de diversos ramos industriais, nas áreas de proteção, controle e automação. Contribui com o desenvolvimento de artigos e apresentações técnicas em seminários do setor, além de ser instrutor de cursos da Universidade SEL.

**Rafael Cernev** recebeu o título de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal do Paraná em 2006. Ele também possui especialização em gestão de projetos pela FAE e especialização em automação de sistemas elétricos de potência pelo INATEL. Desde março 2009 é Engenheiro da Schweitzer Engineering Laboratories, LTDA atualmente atuando como coordenador de engenharia e serviços. Tem experiência na área de automação e proteção de sistemas elétricos de potência, tendo participado de diversos projetos realizados na geração, transmissão e distribuição de energia.