

Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Usando Dados Não-Sincronizados de Dois Terminais

F. V. Lopes, D. Barros, C. Costa, R. Reis, J. Nascimento, N. S. D. Brito, W. L. A. Neves e S. Moraes

Resumo—Apresenta-se neste trabalho uma revisão de algoritmos para localização de faltas em linhas de transmissão usando dados não-sincronizados de dois terminais. As técnicas avaliadas se baseiam na análise de componentes de frequência fundamental, sendo os erros de sincronismo entre medições local e remota corrigidos de diferentes maneiras. Para avaliar o desempenho dos referidos métodos, consideram-se diversos cenários de falta e de operação do sistema monitorado, assumindo diferentes erros de sincronismo em cada caso. Registros oscilográficos reais e simulados por meio do programa *Alternative Transients Program* (ATP) são avaliados, permitindo a identificação de vantagens e limitações de cada técnica. Dos resultados obtidos, destacam-se fontes de erro potenciais dos algoritmos e facilidades destes para aplicações em sistemas computacionais reais para diagnóstico de distúrbios.

Palavras-chaves—ATP, dados não-sincronizados, fasores fundamentais, linhas de transmissão, localização de faltas, sistemas elétricos de potência.

I. INTRODUÇÃO

NAS ÚLTIMAS décadas, o constante aumento da demanda por energia elétrica tem ocasionado uma expansão significativa dos sistemas de transmissão. No Sistema Interligado Nacional (SIN), por exemplo, as linhas de transmissão (LT) já somam mais de 100.000 km de extensão, o que seria suficiente para dar três voltas no planeta Terra. Neste cenário, as funções de localização de faltas têm sido cruciais para a manutenção de bons indicadores de serviço, visto que permitem a identificação rápida do local da LT a ser reparado após a ocorrência de curtos-circuitos, minimizando a duração de desligamentos não-programados [1].

Dentre os algoritmos de localização de faltas existentes, destacam-se os baseados: na análise de componentes de frequência fundamental, na teoria das ondas viajantes, na análise espectral de componentes de alta frequência, e em funções de inteligência artificial [2]. Embora as técnicas baseadas na teoria das ondas viajantes venham ganhando grande visibilidade junto aos fabricantes de localizadores de faltas, os métodos

baseados na análise de componentes fundamentais ainda são os mais utilizados pelas concessionárias, especialmente pelo baixo custo e simplicidade, visto que não exigem taxas de amostragem elevadas nem formulações matemáticas sofisticadas [3]. Neste grupo de métodos, as soluções baseadas em dados de um terminal ainda predominam, especialmente por serem independentes da sincronização de dados. Entretanto, estas técnicas podem ter seu desempenho comprometido em casos de faltas de alta impedância, especialmente quando o sistema monitorado não é homogêneo [1], o que tem motivado a busca por soluções mais robustas que não dependam da sincronização de dados.

Na literatura especializada, diversos algoritmos de dois terminais baseados na análise de componentes fundamentais têm sido reportados, os quais, em sua grande maioria, dependem da sincronização de dados. Segundo [4], erros na sincronização dos relógios dos dispositivos ou mesmo dos conversores Analógico-Digital (A/D) podem resultar em desvios de fase significativos entre os fasores estimados nos dois terminais da linha, o que compromete a confiabilidade das localizações estimadas quando em situações de falha ou perda do sinal do *Global Positioning System* (GPS). Uma alternativa seria o uso do relógio de um dos dispositivos de monitoramento da LT como a referência de tempo comum para os demais dispositivos, o que viabilizaria localização de faltas mesmo sem o sinal do GPS. Entretanto, nesses casos, torna-se necessário o uso de canais de comunicação para sincronização das medições nos terminais da LT, o que também limita a aplicação dessas técnicas.

Com o objetivo de viabilizar a localização de faltas em sistemas de transmissão por meio da análise de componentes fundamentais usando medições não-sincronizadas de tensão e corrente de dois terminais, diversas técnicas têm sido propostas [5]–[10]. Algumas dessas técnicas têm como objetivo apenas o cálculo do erro de sincronismo, o que permite a correção dos fasores estimados e, consequentemente, o uso da formulação de técnicas desenvolvidas originalmente para sistemas com dispositivos perfeitamente sincronizados. Em contrapartida, outras técnicas são imunes a erros de sincronismo, viabilizando a localização de faltas de forma direta, sem que haja a estimação do erro de sincronismo. Independentemente das características de cada solução, esses métodos têm despertado cada vez mais interesse das concessionárias, principalmente em aplicações de diagnóstico de distúrbio, nas quais, em várias situações, não existe garantia do sincronismo dos registros oscilográficos avaliados.

Este trabalho teve apoio financeiro da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF).

Felipe V. Lopes é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB), Brasília-DF (e-mail: felipevlopes@unb.br).

Daphne Barros, Cecília Costa, Raphael Reis e Jamile Nascimento são alunos de pós-graduação da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB (e-mails: {daphne.barros, cecilia.costa, raphael.reis, jamile.nascimento}@ee.ufcg.edu.br@ee.ufcg.edu.br).

Núbia Brito e Washington Neves são professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG (e-mails: {nubia,waneves}@dee.ufcg.edu.br).

Sérgio Moraes é engenheiro da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), Teresina-PI (e-mail: srdias@chesf.gov.br).

Neste trabalho, apresenta-se uma revisão e avaliação de algoritmos para localização de faltas em LTs baseados na análise de medições não-sincronizadas de dois terminais. Esses estudos se enquadram em uma das etapas finais de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) realizado em parceria com a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e pesquisadores de outras instituições brasileiras. O objetivo do referido projeto é desenvolver um aplicativo para diagnóstico de distúrbios e avaliação do desempenho da proteção, sendo o processo de localização de faltas usando dados não-sincronizados é crucial. No total, cinco algoritmos reportados na literatura são apresentados e avaliados, considerando diferentes cenários de falta e de operação do sistema elétrico de potência (SEP) monitorado. Em seguida, por meio da avaliação de registros oscilográficos reais não-sincronizados, destacam-se as limitações, potencialidades e facilidades de aplicação de cada técnica, identificando as que se adequam melhor ao aplicativo em desenvolvimento.

II. INFLUÊNCIA DE ERROS DE SINCRONISMO NA ESTIMAÇÃO DE COMPONENTES FUNDAMENTAIS

No processo de localização de faltas em LTs por meio da análise de componentes fundamentais, a estimação dos fasores é uma etapa crucial, visto que permite a estimação do módulo e fase dos sinais na frequência nominal do sistema. Esta representação fasorial permite a associação de tensões e correntes em diferentes pontos do SEP de forma simplificada, viabilizando a identificação do local da falta. Entretanto, é nesta etapa que erros de sincronismo interferem na precisão dos métodos de dois terminais, visto que podem ocasionar desvios significativos na fase estimada dos fasores de um dado terminal em relação ao outro, comprometendo, consequentemente, a confiabilidade das estimativas calculadas do local do defeito [2].

Da teoria básica de circuitos em corrente alternada, sabe-se que um dado sinal senoidal $s(t)$ pode ser representado por:

$$s(t) = S_m \sin(\omega \cdot t + \phi), \quad (1)$$

em que t representa o tempo e S_m , ω e ϕ representam o valor de pico, a frequência angular fundamental e o ângulo de fase inicial do sinal $s(t)$ avaliado, respectivamente.

Após o processo de estimação de fasores na frequência ω , o sinal $s(t)$ passa a ser representado por:

$$\hat{S} = \frac{S_m}{\sqrt{2}} \angle \phi, \quad (2)$$

sendo $\hat{S}$ chamado de fasor fundamental do sinal $s(t)$ [2].

Deve-se perceber que o ângulo ϕ depende diretamente da referência de tempo utilizada. Por exemplo, se $s(t)$ é analisado usando uma referência cuja origem do eixo tempo coincide com o cruzamento do sinal por zero quando este possui derivada positiva (valores instantâneos crescendo), tem-se que: $s(0) = S_m \sin(\omega \cdot 0 + \phi) = 0 \Rightarrow \phi = 0^\circ$. Por outro lado, se $s(t)$ é analisado usando uma referência cuja origem do eixo tempo coincide com o seu valor de pico positivo, tem-se que: $s(0) = S_m \sin(\omega \cdot 0 + \phi) = +S_m \Rightarrow \phi = 90^\circ$.

Do exposto, percebe-se que ao mudar a referência de tempo, embora o módulo dos fasores não seja afetado, um mesmo sinal pode ser visto com diferentes fases, o que compromete a localização de faltas usando dados de dois terminais quando os dispositivos nas extremidades da LT não usam a mesma referência de tempo ou quando os instantes de amostragem dos conversores A/D não estão sincronizados [5]–[8].

III. REVISÃO DOS ALGORITMOS AVALIADOS

Tradicionalmente, a influência de erros de sincronismo sobre métodos de localização de faltas de dois terminais é analisada tomando-se um dos terminais do SEP como referência e multiplicando os fasores do terminal oposto pelo fator $e^{j\theta}$ para representar um desvio de fase de θ graus. Na revisão dos algoritmos avaliados, considerar-se-ão os sistemas ilustrados na Fig. 1, sendo: $\hat{V}_S$ e $\hat{V}_R$ os fasores de tensão nos terminais local (Barra S) e remoto (Barra R), respectivamente; $\hat{I}_S$ e $\hat{I}_R$ os fasores de corrente nos terminais local e remoto, respectivamente; Z_L e Y_L a impedância série e a admitância shunt da LT, respectivamente; Z_S e Z_R as impedâncias dos circuitos equivalentes de Thévenin conectados às Barras S e R, respectivamente; e θ_S e θ_R os erros de sincronismo (dados em termos de ângulo, ou seja, em graus ou radianos) das medições no terminal S em relação ao terminal R e das medições do terminal R em relação ao terminal S, respectivamente; e L o comprimento da LT.

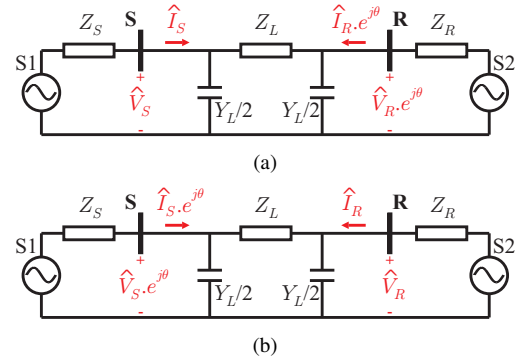


Fig. 1. Sistemas adotados na revisão dos algoritmos avaliados: (a) Terminal S como referência; (b) Terminal R como referência.

A. Método CR: Proposto em [5]

Este método foi desenvolvido por Cruz et al. em 2012 com o objetivo de calcular o erro de sincronismo entre dois terminais de uma linha, viabilizando a posterior aplicação de algoritmos originalmente desenvolvidos para localização de faltas usando dados sincronizados de dois terminais. Em [5], durante as análises apresentadas, utiliza-se o sistema ilustrado na Fig. 1(a) (terminal S como referência), considerando as partes real e imaginária dos fasores estimados e da impedância série da LT conforme demonstrado a seguir:

$$\hat{V}_S = V_{sr} + jV_{sm}, \quad (3a)$$

$$\hat{V}_R = V_{rr} + jV_{rm}, \quad (3b)$$

$$\hat{I}_S = I_{sr} + jI_{sm}, \quad (3c)$$

$$\hat{I}_R = I_{rr} + jI_{rm}, \quad (3d)$$

$$1/Z_L = g + jb. \quad (3e)$$

Por fim, por meio da análise do modelo π -equivalente da LT, os autores do trabalho demonstram que o ângulo de sincronismo θ pode ser calculado usando:

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{a_2 \cdot \left(\frac{p_1 - k_1 \cdot g}{2 \cdot g} \right) + a_1 \cdot \left(\frac{p_2 - k_2 \cdot g}{2 \cdot b} \right)}{a_1^2 + a_2^2} \right], \quad (4)$$

em que:

$$\begin{aligned} k_1 &= V_{sr}^2 + V_{sm}^2 + V_{rr}^2 + V_{rm}^2, \\ k_2 &= V_{sr}^2 + V_{sm}^2 - V_{rr}^2 - V_{rm}^2, \\ a_1 &= V_{sr} \cdot V_{rr} + V_{sm} \cdot V_{rm}, \\ a_2 &= V_{sr} \cdot V_{rm} - V_{sm} \cdot V_{rr}, \\ p_1 &= V_{sr} \cdot I_{sr} + V_{sm} \cdot I_{sm} + V_{rr} \cdot I_{rr} + V_{rm} \cdot I_{rm}, \\ p_2 &= V_{sr} \cdot I_{sr} + V_{sm} \cdot I_{sm} - V_{rr} \cdot I_{rr} - V_{rm} \cdot I_{rm}. \end{aligned}$$

Neste trabalho, após a estimação de θ , realiza-se a correção dos fasores do terminal remoto, estimando, em seguida, o local da falta por meio do algoritmo de dois terminais reportado em [11], conforme apresentado pelos autores de [5] em [12].

B. Método IZ1: Proposto em [6]

Em [6], Izykowski et al. propõem uma forma de calcular o ângulo de sincronismo θ com base em medições de relés de distância instalados nos terminais da LT monitorada. Para isso, utilizou-se o sistema ilustrado na Fig. 1(b) (terminal R como referência).

Em resumo, após associar medições fasoriais em ambos os terminais da LT já incluindo o desvio de fase nas grandezas do terminal S devido ao erro de sincronismo, propõe-se que a localização da falta seja estimada usando grandezas de sequência ou incrementais por meio da fórmula:

$$d = \left| \frac{\hat{V}_S \cdot e^{j\theta} - (\hat{V}_R - Z_L \cdot \hat{I}_R)}{Z_L \cdot (\hat{I}_S \cdot e^{j\theta} + \hat{I}_R)} \right|, \quad (5)$$

sendo o ângulo de sincronismo θ obtido previamente via:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{A_3}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} \right), \quad (6)$$

em que:

$$\begin{aligned} A_1 &= \text{Im} \left\{ Z_L^* \cdot \left[(\hat{V}_R - Z_L \cdot \hat{I}_R) \cdot \hat{I}_S^* - \hat{V}_S \cdot \hat{I}_R^* \right] \right\}, \\ A_2 &= \text{Re} \left\{ -Z_L^* \cdot \left[(\hat{V}_R - Z_L \cdot \hat{I}_R) \cdot \hat{I}_S^* + \hat{V}_S \cdot \hat{I}_R^* \right] \right\}, \\ A_3 &= \text{Im} \left\{ -Z_L^* \cdot \left[(\hat{V}_R - Z_L \cdot \hat{I}_R) \cdot \hat{I}_R^* - \hat{V}_S \cdot \hat{I}_S^* \right] \right\}. \end{aligned}$$

C. Método IZ2: Proposto em [7]

Apresenta-se em [7] uma técnica não-iterativa que permite o cálculo do ângulo de sincronismo e, conseqüentemente, da localização da falta. Para tanto, usa-se o modelo π -exato da LT, o qual contempla o efeito capacitivo da LT monitorada. Para o desenvolvimento do algoritmo, os autores de [7] utilizam o sistema apresentado na Fig. 1(b) (terminal R como referência), adotando a mesma formulação proposta em [13].

Basicamente, o cálculo do ângulo de sincronismo entre as medições local e remota é realizado por meio da seguinte expressão:

$$A \cdot (e^{j\theta})^2 + B \cdot (e^{j\theta}) + C = 0, \quad (7)$$

em que:

$$\begin{aligned} A &= G_1 \cdot S_2 - G_2 \cdot S_1, \\ B &= G_1 \cdot T_2 + H_1 \cdot S_2 - G_2 \cdot T_1 - H_2 \cdot S_1, \\ C &= H_1 \cdot T_2 - H_2 \cdot S_1, \end{aligned}$$

sendo:

$$\begin{aligned} G_i &= \hat{V}_{Si}, \\ H_i &= Z_{ci} \sinh(\gamma_{Li} \cdot L) \hat{I}_{Ri} - \cosh(\gamma_{Li} \cdot L) \hat{V}_{Ri}, \\ S_i &= -Z_{ci} \cdot \hat{I}_{Si}, \\ T_i &= \sinh(\gamma_{Li} \cdot L) \hat{V}_{Ri} - Z_{ci} \cosh(\gamma_{Li} \cdot L) \hat{I}_{Ri}, \end{aligned}$$

onde $i = 1, 2$ ou Δ para representação das componentes de sequência positiva, sequência negativa e componentes incrementais, respectivamente.

Conforme reportado em [7], em casos de faltas assimétricas, sugere-se o uso das componentes de sequência positiva e negativa ($i = 1$ e 2), enquanto que para curtos-circuitos simétricos, sugere-se o uso de componentes de sequência positiva e incrementais ($i = 1$ e Δ). Nota-se ainda que, usando (7), são obtidas duas estimativas do ângulo de sincronismo θ . Segundo [7], a estimativa correta de θ será aquela cujo módulo $|e^{j\theta}|$ possui valor no intervalo $[1 - \varepsilon; 1 + \varepsilon]$, sendo ε um limiar tipicamente adotado como 0,1. Em seguida, os fasores medidos no terminal local são corrigidos usando:

$$\hat{V}_{Si}^{synch} = \hat{V}_{Si} \cdot e^{j\theta}, \quad (8a)$$

$$\hat{I}_{Si}^{synch} = \hat{I}_{Si} \cdot e^{j\theta}. \quad (8b)$$

Por fim, estima-se a localização da falta por meio da expressão:

$$d = \frac{\tanh^{-1} \left[\frac{\hat{V}_{Ri} \cosh(\gamma_{Li} L) - Z_{ci} \hat{I}_{Ri} \sinh(\gamma_{Li} L) - \hat{V}_{Si}^{synch}}{\hat{V}_{Ri} \sinh(\gamma_{Li} L) - Z_{ci} \hat{I}_{Ri} \cosh(\gamma_{Li} L) - Z_{ci} \hat{I}_{Si}^{synch}} \right]}{\gamma_{Li} L}. \quad (9)$$

D. Método TZ: Proposto em [8]

Diferentemente das soluções apresentadas até o momento, propõe-se em [8] uma formulação baseada na análise do módulo de relações elétricas entre correntes e impedâncias de sequência negativa em cada terminal monitorado. Procedendo dessa forma, evitam-se problemas na localização de faltas decorrentes dos desvios de fase provenientes de erros de sincronismo entre as medições locais e remotas, visto que os módulos das componentes fundamentais não são afetados quando estimados usando diferentes referências de tempo.

Na formulação apresentada em [8], são necessárias medições de corrente, informações da impedância da LT e das impedâncias dos circuitos equivalentes de Thévenin conectados aos terminais local e remoto, as quais podem ser estimadas a partir da análise das tensões e correntes de sequência negativa ou incrementais do sistema [1].

Em resumo, a localização da falta é calculada por meio da solução da equação:

$$O \cdot (d)^2 + P \cdot (d) + V = 0, \quad (10)$$

em que:

$$\begin{aligned} O &= \left| \hat{I}_{R2} \right|^2 (g^2 + h^2) - (q^2 + w^2), \\ P &= -2 \left| \hat{I}_{R2} \right|^2 (e \cdot g + f \cdot h) - 2(a \cdot q + b \cdot w), \\ V &= \left| \hat{I}_{R2} \right|^2 (e^2 + f^2) - (a^2 + b^2), \end{aligned}$$

sendo:

$$\begin{aligned} Z_{S2} \cdot \hat{I}_{S2} &= a + jb, \\ Z_{L1} \cdot \hat{I}_{S2} &= q + jw, \\ Z_{R2} + Z_{L1} &= e + jf, \\ Z_{L1} &= g + jh. \end{aligned}$$

E. Método SA: Proposto em [2]

De forma similar ao método apresentado no item anterior, propõe-se em [2] uma formulação para localização de faltas usando dados não-sincronizados baseada na análise das relações de módulos entre impedâncias e componentes fundamentais do sistema monitorado, evitando, dessa forma, problemas com os desvios de fase introduzidos por possíveis erros de sincronismo entre os dispositivos de monitoração. Em termos de parâmetros do sistema, utiliza-se apenas a impedância série da linha, não requerendo, portanto, o conhecimento ou estimação das impedâncias dos circuitos equivalentes de Thévenin em torno da LT monitorada.

Basicamente, no método apresentado em [2], a localização da falta também é estimada por meio da solução da expressão (10), considerando os seguintes coeficientes:

$$\begin{aligned} O &= \left| Z_{Li} \hat{I}_{Si} \right|^2 - \left| Z_{Li} \hat{I}_{Ri} \right|^2, \\ P &= -2 \cdot \text{Re} \left[\hat{V}_{Si} (Z_{Li} \hat{I}_{Si})^* + (\hat{V}_{Ri} - Z_{Li} \hat{I}_{Ri}) (Z_{Li} \hat{I}_{Ri})^* \right], \\ V &= \left| \hat{V}_{Si} \right|^2 - \left| \hat{V}_{Ri} - Z_{Li} \cdot \hat{I}_{Ri} \right|^2, \end{aligned}$$

em que $i = 1, 2$ ou Δ para representação das componentes de sequência positiva, sequência negativa e componentes incrementais, respectivamente.

IV. ANÁLISES E RESULTADOS

A. Sistema Teste e Simulações

Para a avaliação de registros oscilográficos simulados, modelou-se no ATP o sistema teste simplificado ilustrado na Fig. 1(a), para o qual são assumidos erros de sincronismo de θ graus nas medições do terminal R da LT, tomando o terminal S como referência. O sistema consiste basicamente em uma LT de comprimento $L = 200$ km, 230 kV/60 Hz, que conecta dois equivalentes de Thévenin, os quais representam os SEPs em torno da referida linha. A LT foi modelada a parâmetros distribuídos constantes na frequência, assumindo a transposição perfeita dos condutores. Os parâmetros do referido sistema são apresentados nas Tabelas I e II.

Visando avaliar apenas a influência das características de falta e de operação do SEP sobre os métodos implementados, os transformadores para instrumento foram intencionalmente considerados como ideais. Nas simulações, usou-se um passo de integração de $5 \mu\text{s}$ e uma taxa de amostragem de 16 amostras/ciclo foi simulada. Por isso, modelou-se também um filtro anti-aliasing de terceira ordem do tipo Butterworth com frequência de corte em 180 Hz. A estimação dos fasores foi realizada por meio do filtro cosseno modificado [14], sendo o processo de localização de faltas iniciado após a detecção rápida do distúrbio por meio do algoritmo reportado em [15].

Para demonstrar o efeito da inserção de erros de sincronismo nos registros simulados do terminal R do SEP teste, considerou-se uma falta AT franca, a 100 km do terminal S. Neste caso, a falta é localizada considerando registros sincronizados, não-sincronizados com $\theta = 80^\circ$ e registros não-sincronizados corrigidos pelo Método CR. Os resultados obtidos são ilustrados na Fig. 2. Nota-se que, ao inserir o erro de sincronismo θ , a localização da falta estimada apresenta erros significativos, os quais são minimizados após a correção de θ nos fasores fundamentais estimados no terminal R.

Nas análises apresentadas a seguir, tomar-se-á como estimativa final da localização da falta o valor calculado no regime permanente do curto-circuito. Por isso, a abertura dos disjuntores do sistema teste não foi considerada nas simulações realizadas, de forma que a saída dos algoritmos implementados foi adotada como sendo a média do último ciclo fundamental da simulação conforme apresentado na Fig. 3.

TABELA I
DADOS DA LT DE 230 kV MODELADA NO ATP.

Sequência	$R \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right)$	$X \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right)$	$\omega C \left(\frac{\mu\text{S}}{\text{km}} \right)$
Positiva	0,0346	0,3005	5,5106
Zero	0,4177	1,5238	2,8648

TABELA II
DADOS DOS EQUIVALENTES DE THÉVENIN DO SEP TESTE.

Fonte	V_{th} (p.u.)	Z_{th} (Z_{S1} e Z_{S2})			
		R_0 (Ω)	X_0 (Ω)	R_1 (Ω)	X_1 (Ω)
S1	1,00 $\angle 0^\circ$	8,3540	30,476	0,6920	6,0100
S2	0,98 $\angle \delta^*$	41,770	152,38	3,4600	30,050

*Nas análises, varia-se o ângulo δ para variar o carregamento do SEP.

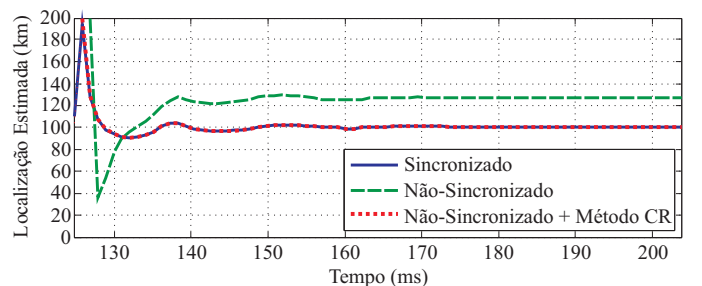


Fig. 2. Exemplo do efeito do erro de sincronismo na localização de faltas.

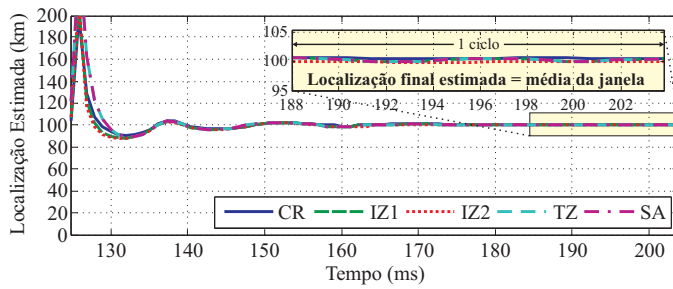


Fig. 3. Estimativa final considerada nas análises apresentadas.

B. Avaliação de Registros Simulados

Apresentam-se na Tabela III os resultados obtidos da análise de registros gerados via ATP. No estudo realizado foram variadas as características de falta, como o tipo, local d_f e resistência R_f , bem como o ângulo θ que representa o erro de sincronismo e o carregamento do SEP por meio da variação da abertura angular δ entre as fontes S1 e S2 (ver Tabela II). Para cada caso, foram calculadas as estimativas do local da falta $\tilde{d}$ e do ângulo de sincronismo $\tilde{\theta}$.

Dos resultados, percebe-se claramente que os valores de $\tilde{\theta}$ estimados pelo Método CR apresentam sinal contrário aos obtidos pelos métodos IZ1 e IZ2. Isso se deve ao fato desses métodos considerarem terminais de referência contrários, conforme explicado anteriormente na Seção III. Além disso, observa-se que os métodos TZ e SA não calculam $\tilde{\theta}$, uma vez que essas técnicas estimam diretamente $\tilde{d}$ sem que sejam realizadas correções de fase nos fasores do SEP. Para facilitar a avaliação dos resultados apresentados na Tabela III, serão analisados separadamente os casos nos quais $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ e $\theta > 90^\circ$.

Para $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, todos os algoritmos apresentaram desempenho satisfatório. No cálculo da estimativa $\tilde{\theta}$, o Método CR se destaca por não ser influenciado pelas características da falta, pois usa apenas dados de pré-falta. Por outro lado, no

cálculo de $\tilde{d}$, destaca-se o Método IZ2, o qual demonstrou ser um dos mais precisos dentre os avaliados, fato este esperado visto que inclui o efeito capacitivo da LT em sua formulação. Ainda assim, pode-se dizer que os métodos IZ1, TZ e SA também apresentaram bom desempenho, resultando em erros menores que 1 km nas simulações realizadas.

Analisando as simulações em que $\theta > 90^\circ$, observaram-se problemas nos métodos CR e IZ1 durante o cálculo de $\tilde{\theta}$. Essas técnicas dependem da função ‘arco seno’, a qual não é capaz de diferenciar ângulos no primeiro e segundo quadrantes, ou no terceiro e quarto quadrantes do círculo trigonométrico. Como consequência, as localizações ficaram comprometidas, revelando a necessidade do uso de rotinas adicionais para identificar corretamente o quadrante do ângulo de sincronismo θ . Adicionalmente, no caso 12, referente a uma falta trifásica, o Método TZ apresentou problemas, retornando uma localização negativa. Este comportamento já era esperado, visto que a técnica se baseia em medições de sequência negativa, as quais não existem em SEPs equilibrados durante faltas simétricas. Mesmo assim, pode-se concluir, de uma forma geral, que os métodos IZ2, TZ e SA apresentaram desempenho satisfatório para os demais curtos assimétricos, independentemente do valor de θ , sendo, portanto, analisados na etapa seguinte de avaliação de registros reais.

C. Avaliação de Registros Reais

Nesta etapa, são avaliados os seguintes registros de LTs 230 kV: 1) Falta CAT na LT Teresina-Piripiri (TSA-PRI), $L = 154,7$ km; 2) Falta AT na LT Angelim II-Recife II (AGD-RCD), $L = 169$ km; 3) Falta BT na LT Banabuiú-Fortaleza (BNB-FTZ), $L = 177,2$ km; e 4) Falta AT na LT Itabaiana-Paulo Afonso II (ITB-PAF), $L = 162,5$ km. Em cada caso, as localizações estimadas são comparadas com as disponíveis nos Relatórios de Análise de Desempenho da Proteção (RADP) dos referidos distúrbios, relatórios estes elaborados pela CHESF em cumprimento do Submódulo 11.2 dos procedimentos de rede [16].

TABELA III
RESULTADOS OBTIDOS DA AVALIAÇÃO DOS REGISTROS SIMULADOS.

Caso	θ	δ	Tipo	R_f (Ω)	d_f (km)	Método CR		Método IZ1		Método IZ2		Método TZ		Método SA	
						$\tilde{d}$ (km)	$\tilde{\theta}$	$\tilde{d}$ (km)	$\tilde{\theta}$	$\tilde{d}$ (km)	$\tilde{\theta}$	$\tilde{d}$ (km)	$\tilde{\theta}$	$\tilde{d}$ (km)	$\tilde{\theta}$
1	10°	-5°	AT	≈ 0	20	21,15	-10,03°	20,53	9,88°	19,98	9,99°	20,53	-	20,53	-
2	10°	-40°	AT	≈ 0	20	21,16	-10,27°	20,53	9,70°	19,89	9,97°	20,53	-	20,53	-
3	10°	-40°	AT	50	20	21,21	-10,27°	20,51	10,00°	19,59	9,97°	20,51	-	20,51	-
4	50°	-30°	BC	≈ 0	60	59,74	-50,27°	60,51	50,00°	60,02	50,02°	60,51	-	60,51	-
5	50°	-40°	BC	≈ 0	60	59,77	-50,39°	60,51	50,02°	60,02	50,03°	60,51	-	60,51	-
6	50°	-40°	BC	50	60	60,76	-50,39°	60,52	49,96°	60,13	50,03°	60,52	-	60,52	-
7	80°	-20°	CAT	≈ 0	120	121,01	-80,25°	119,90	79,98°	120,02	79,98°	119,90	-	119,90	-
8	80°	-20°	CAT	50	120	119,65	-80,25°	119,88	79,89°	119,86	79,97°	119,88	-	119,88	-
9	80°	-50°	CAT	50	120	121,25	-81,38°	119,88	79,69°	119,77	79,94°	119,88	-	119,88	-
10	120°	-20°	AT	≈ 0	180	202,29	-59,89°	1293,5	-120,22°	180,00	120,00°	179,21	-	197,18	-
11	180°	-20°	AT	≈ 0	180	644,03	0,14°	9182,4	-109,74°	180,00	-180,00°	179,21	-	197,18	-
12	120°	-20°	ABC	≈ 0	180	149,85	-59,89°	174,98	-77,89°	180,00	120,00°	-19,58	-	181,25	-

É importante destacar que o algoritmo IZ2 requer parâmetros série e shunt da LT, enquanto que os algoritmos TZ e SA requerem apenas os parâmetros série. Nesse contexto, sabe-se que os dados de impedância série das LTs são utilizados pelos relés de distância, o que torna esses dados mais acessíveis e mais confiáveis. Por outro lado, embora existam formas de estimar as admitâncias shunt das LTs, esses dados nem sempre se encontram prontamente disponíveis, apresentando, em muitos casos, erros que acabam não sendo identificados por se tratarem de dados sem utilidade para as funções clássicas de proteção de distância baseadas no modelo de LT curta.

Na Fig. 4, apresenta-se a localização estimada para o Registro 1, considerando os dados de admitância da linha que, nesse caso, eram de conhecimento da concessionária e considerados confiáveis. Segundo o RADP, a falta ocorreu a 24,9 km da subestação TSA e os algoritmos IZ2, TZ e SA convergiram para valores de aproximadamente 17,3 km, 22,2 km e 22,2 km, respectivamente. Embora o método IZ2 seja teoricamente mais preciso, este apresentou um erro maior na localização estimada, o que certamente é decorrente de imprecisões nos parâmetros de admitância da LT. Portanto, para evitar erros dessa natureza e facilitar o manuseio dos dados necessários para o aplicativo em desenvolvimento, descartou-se o uso do método IZ2, de forma que os próximos resultados se limitam apenas à análise dos métodos TZ e SA.

Na Tabela IV são apresentados os resultados obtidos para os registros 2, 3 e 4, considerando o uso dos métodos TZ e SA. Nota-se que os desempenhos de ambas as técnicas foram idênticos e satisfatórios, resultando, no pior caso (registro 3), em erros da ordem de 7,7 km. Portanto, uma vez que na análise de casos simulados o método TZ apresentou melhor desempenho para faltas assimétricas e o método SA para faltas simétricas, conclui-se ser uma boa escolha para aplicação no software em desenvolvimento pela CHESF o uso dos métodos TZ e SA para localização de faltas assimétricas e simétricas, respectivamente, sendo os algoritmos selecionados com base em um processo de classificação da faltas.

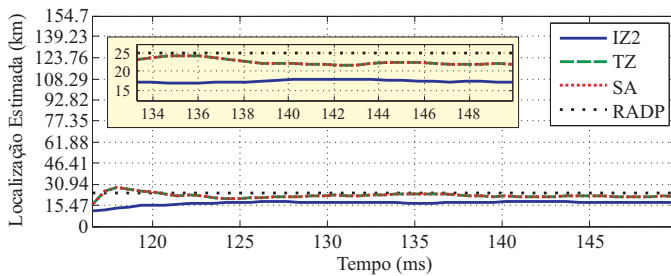


Fig. 4. Localização estimada para o registro 1) da falta na LT TSA-PRI.

TABELA IV
RESULTADOS OBTIDOS DA AVALIAÇÃO DOS REGISTROS SIMULADOS.

Registro	RADP (km)	Método TZ (km)	Método SA (km)
2) LT AGD-RCD	43,6	42,6	42,6
3) LT BNB-FTZ	32,2	39,9	39,9
4) LT ITB-PAF	130,3	127,6	127,6

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se uma revisão e avaliação de técnicas de localização de faltas baseada na análise de componentes fundamentais não-sincronizadas de dois terminais. Ao todo, cinco algoritmos disponíveis na literatura foram avaliados por meio da análise de registros oscilográficos reais e simulados.

Dos resultados obtidos, foram identificadas as técnicas mais robustas e precisas em casos ideais, nos quais os parâmetros da LT não apresentam erros. Em seguida, da análise de casos reais, constatou-se que erros nos parâmetros shunt das LTs podem comprometer o desempenho de técnicas baseadas no modelo π -exato de linha. Portanto, conclui-se que, na prática, devido a possíveis incertezas e erros nos parâmetros da linha, é preferível o uso de técnicas que utilizam apenas dados de impedância série das LTs, já que estes parâmetros são utilizados por relés de distância e, portanto, apresentam maior confiabilidade quanto à sua precisão.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] S. Das, S. Santoso, A. Gaikwad, and M. Patel, "Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application," *IEEE Access*, vol. 2, pp. 537–557, 2014.
- [2] M. M. Saha, J. Izykowski, and E. Rosolowski, *Fault Location on Power Networks*, ser. Power Systems. London: Ed. Springer, 2010.
- [3] F. V. Lopes, K. M. Silva, and B. F. Küsel, "Parametric analysis of two-terminal impedance-based fault location methods," *International Conference on Power Systems Transients*, July 2015.
- [4] P. Gale, "The use of GPS for precise time tagging of power system disturbances and in overhead line fault location," in *Developments in the Use of Global Positioning Systems*, 1994, pp. 5/1–5/2.
- [5] M. C. S. Cruz, F. Medeiros Jr., J. J. A. L. Leitão, and S. G. A. Cauponi, "Metodologia para sincronização de registros de falta baseada em equações de circuito equivalente de linhas de transmissão," *10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, Nov 2012.
- [6] J. Izykowski, E. Rosolowski, and M. Saha, "Post-fault analysis of operation of distance protective relays of power transmission lines," in *2005 IEEE Russia Power Tech*, June 2005, pp. 1–7.
- [7] J. Izykowski, E. Rosolowski, P. Balcerek, M. Fulczyk, and M. Saha, "Accurate noniterative fault location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 1, pp. 72–80, Jan. 2010.
- [8] D. Tziouvaras, J. Roberts, and G. Benmouyal, "New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines," in *70th IEEE International Conf. on Develop. in Power System Protection*, 2001, pp. 395–398.
- [9] J. Izykowski, R. Molag, E. Rosolowski, and M. Saha, "Accurate location of faults on power transmission lines with use of two-end unsynchronized measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 2, pp. 627–633, April 2006.
- [10] J. Izykowski, E. Rosolowski, P. Balcerek, M. Fulczyk, and M. Saha, "Fault location on double-circuit series-compensated lines using two-end unsynchronized measurements," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 4, pp. 2072–2080, oct. 2011.
- [11] A. Girgis, D. Hart, and W. Peterson, "A new fault location technique for two- and three-terminal lines," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 1, pp. 98–107, jan 1992.
- [12] M. C. S. Cruz, M. Almeida, J. Oliveira, C. Cândido, J. Leitão, and M. Medeiros Jr, "Localização de faltas em linhas de transmissão de múltiplos terminais a partir de registros oscilográficos sincronizados via transformada wavelet," *IEEE/PES T&D 2010*, 2010.
- [13] A. Johns and S. Jamali, "Accurate fault location technique for power transmission lines," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, vol. 137, no. 6, pp. 395–402, November 1990.
- [14] D. G. Hart, D. Novosel, and R. A. Smith, *Modified Cosine Filters*, U. S. Patent 6154687 ed., November, 2000.
- [15] F. Lopes, D. Fernandes, and W. Neves, "A traveling-wave detection method based on Park's transformation for fault locators," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1626–1634, 2013.
- [16] ONS, "Submódulo 11.2: Avaliação do desempenho dos sistemas de proteção (www.ons.org.br)," Tech. Rep., 2013.