

Localização de Falhas em Linhas de Transmissão de Extra-Alta Tensão – Análise dos Parâmetros de Influência na Exatidão

Guilherme Bertuol Rodrigues de Queiroz * Paulo Márcio da Silveira **

* *Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Sistemas Elétricos de Energia (e-mail: bertuol.guilherme@gmail.com).*

** *Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Sistemas Elétricos de Energia (e-mail: pmsilveira@unifei.edu.br).*

Abstract: Fault location algorithms present different formulations, data requirements, and parameters that determine their applicability to a specific scenario. Understanding these requirements and characteristic errors in different scenarios is essential for selecting the most appropriate approach. In this article, several phasor-based fault location algorithms are presented, and their performance are analyzed for faults in extra-high voltage transmission lines. The most suitable approach is selected based on the requirements for applying the algorithms and the sources of errors present in the monitored system.

Resumo: Os algoritmos de localização de faltas apresentam diferentes formulações, requisitos de dados e parâmetros, que determinam sua aplicabilidade a um cenário específico. Compreender esses requisitos e os erros característicos em cenários distintos é essencial para escolher a abordagem mais apropriada. Neste artigo, vários algoritmos de localização de faltas com base em fasores são apresentados, e seus desempenhos são analisados em casos de faltas em linhas de transmissão de extra-alta tensão. A abordagem mais adequada é selecionada com base nos requisitos para aplicação dos algoritmos e nas fontes de erros presentes no sistema monitorado.

Keywords: Fault location; Transmission lines; Extra-high voltage.

Palavras-chaves: Localização de faltas; Linhas de Transmissão; Extra-alta Tensão.

1. INTRODUÇÃO

A rápida expansão dos sistemas de energia elétrica impõem requisitos cada vez mais rígidos à disponibilidade e à qualidade do fornecimento de energia elétrica, tornando essencial o alto desempenho dos Sistemas de Proteção, Controle e Supervisão (SPCS), incluindo suas funções de localização de faltas (Saha et al., 2009). A escolha da melhor abordagem de localização de faltas é uma tarefa difícil e requer uma compreensão detalhada do princípio de funcionamento de cada algoritmo (Das et al., 2014).

As técnicas de localização de faltas, amplamente adotadas na prática, podem ser categorizadas em dois grupos principais: algoritmos com Base em Fasores (ABF) e algoritmos com Base em Ondas de Viajantes (Liu et al., 2020). Este artigo apresenta os resultados da implementação de diversos ABFs em um *software* para análise de faltas simuladas. As simulações foram feitas no ATPDRAW™, que é uma interface gráfica para o ATP, utilizado para simulação digital de Sistemas Elétricos de Potência (ATPDraw, 2021). Foram avaliados os desempenhos dos ABFs em Linhas de Transmissão (LTs) de Extra-alta Tensão (EAT), para diferentes tipos de faltas simuladas, considerando o efeito de diversas fontes de erro.

Saha et al. (2002), Mirzaei et al. (2009), Mora-Florez et al. (2008) e Lotfifard et al. (2013) fazem estudos semelhantes, aplicados à sistemas de distribuição. Das et al. (2014)

apresenta diversos ABFs, analisando o impacto da principais fontes de erros em LTs de média tensão. Schweitzer (1983), Zimmerman and Costello (2006) e Dalcastagne and Zimath (2008) fazem estudos semelhantes aplicados a LTs de EAT, mas com um número limitado de algoritmos. Este artigo apresenta oito ABFs, analisando o impacto de diversas fontes de erros em simulações de faltas em LTs de EAT.

2. ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS COM BASE EM FASORES DE UM TERMINAL

A figura 1a apresenta o diagrama unifilar de uma falta trifásica. A equação 1 define a tensão do terminal G em função da localização de falta m e, ao dividi-la pela corrente do terminal G I_G , tem-se a impedância vista pelo terminal G, conforme apresentado em (2). A figura 2 representa as duas parcelas que compõem (2): A primeira parcela $m.Z_L$ representa uma fração da impedância da LT Z_L que é proporcional à distância da falta; A segunda parcela $R_F.I_F/I_G$ está relacionada à resistência de falta R_F e terá um componente reativo, chamado de “efeito reatância”, se a corrente de falta I_F não estiver em fase com I_G . Este artigo apresenta os recursos utilizados pelos ABFs de um terminal para reduzir o impacto do “efeito reatância”.

$$V_G = m.Z_L.I_G + R_F.I_F \quad (1)$$

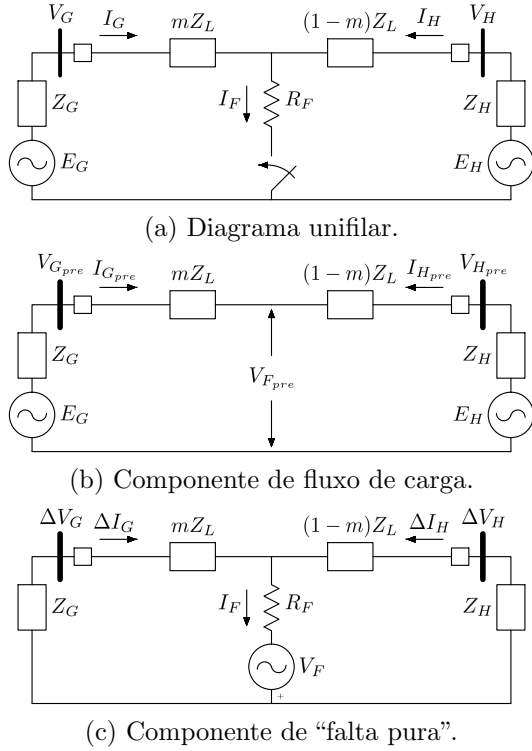


Figura 1. Falta trifásica em uma LT com as fontes G e H.

$$Z_{FG} = \frac{V_G}{I_G} = m \cdot Z_L + R_F \frac{I_F}{I_G} \quad (2)$$

A análise do “efeito reatância” pode ser realizada utilizando o Teorema da Superposição, separando o circuito da falta trifásica (figura 1a) em dois circuitos equivalentes: Circuito de pré-falta (figura 1b); Circuito de “falta pura” (figura 1c). Para o cálculo da corrente de “falta pura” ΔI_G , considera-se que a corrente do terminal G medida na pré-falta I_{preG} seja igual à corrente de fluxo de carga durante a falta (3). A impedância vista (2) pode ser reescrita (6) em função do fator de carga (4) e do fator de distribuição de corrente (5) (IEEE-Std-C37.114:2014, 2015).

$$I_G = \Delta I_G + I_{preG} \quad (3)$$

$$n_G = \frac{I_G}{\Delta I_G} = |n_G| \angle \sigma_G \quad (4)$$

$$d_G = \frac{\Delta I_G}{I_F} = \frac{Z_H + (1 - m)Z_L}{Z_H + Z_L + Z_G} = |d_G| \angle \beta_G \quad (5)$$

$$Z_{FG} = \frac{V_G}{I_G} = m \cdot Z_L + R_F \cdot \frac{1}{d_G \cdot n_G} \quad (6)$$

A componente reativa da segunda parcela de (6) é determinada pela soma dos ângulos σ_G e β_G dos fatores n_G e d_G . O ângulo β_G se aproxima de zero em sistemas homogêneos e o ângulo σ_G tende a zero a medida que a magnitude da corrente de falta se torna consideravelmente maior que a corrente de carga (IEEE-Std-C37.114:2014, 2015). O “efeito reatância” é, portanto, causado pela R_F , combinada com a corrente de carga e a não homogeneidade do sistema.

Os valores de V_G e I_G podem ser dispostos de tal forma que, para cada tipo de falta, a impedância vista no loop de falta corresponda à impedância de sequência positiva, considerando que a LT seja simétrica e perfeitamente

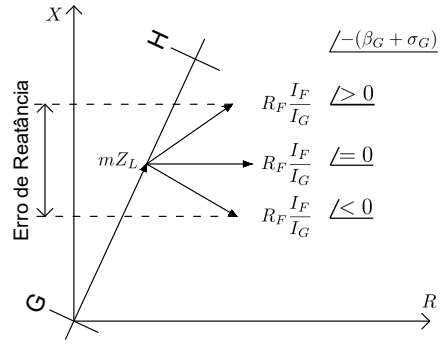


Figura 2. Interpretação gráfica erro devido ao “efeito reatância” (IEEE-Std-C37.114:2014, 2015).

transposta (Ziegler, 2011). A tabela 1 mostra a composição dos sinais de corrente e de tensão I_G , ΔI_G e V_G para os diferentes tipos de faltas.

A equação (7) será utilizada para o cálculo do fator de distribuição de corrente d_{kG} , calculado para a componente simétrica k igual a zero 0, positiva 1 e negativa 2, por considerar a ligação equivalente entre barras, comum ao calcular o equivalente de Thévenin. Saha et al. (2009) apresentam as formulações de K_k , L_k M_k , que variam de acordo com as configurações do sistema.

$$d_{kG} = \frac{K_k \cdot m + L_k}{M_k} \quad (7)$$

Tabela 1. Composição dos sinais de corrente e de tensão para os diferentes tipos de faltas (Saha et al., 2009).

Tipo de Falta	V_G	I_G	ΔI_G
AT	$V_{G,A}$	$I_{G,A}$ $K_0 \cdot I_{0G}$	$I_{G,A}$ - $I_{Gpre,A}$
BT	$V_{G,B}$	$I_{G,B}$ $K_0 \cdot I_{0G}$	$I_{G,B}$ - $I_{Gpre,B}$
CT	$V_{G,C}$	$I_{G,C}$ $K_0 \cdot I_{0G}$	$I_{G,C}$ - $I_{Gpre,C}$
ABC,AB,ABT	$V_{G,A} - V_{G,B}$	$I_{G,A} - I_{G,B}$	$I_G - I_{Gpre}$
BC,BCT	$V_{G,B} - V_{G,C}$	$I_{G,B} - I_{G,C}$	$I_G - I_{Gpre}$
CA,CAT	$V_{G,C} - V_{G,A}$	$I_{G,C} - I_{G,A}$	$I_G - I_{Gpre}$

2.1 Reatância Simples

A estimativa de localização de faltas (8) utilizada no algoritmo da Reatância Simples é obtida pela razão entre a reatância medida $\Im\{Z_{FG}\}$ (2) e a reatância total de sequência positiva da LT $\Im\{Z_{1L}\}$. A eliminação da parcela referente à R_F , ao resolver as componentes imaginárias de (2), ocorre apenas se I_F e I_G estiverem em fase (IEEE-Std-C37.114:2014, 2015). O desempenho desse algoritmo é, portanto, impactado pelo “efeito reatância”.

$$m = \frac{\Im\{Z_{FG}\}}{\Im\{Z_{1L}\}} \quad (8)$$

2.2 Takagi et al. (1982)

Ao decompor (1) em suas partes reais e imaginárias, tem-se um sistema subdeterminado com quatro incógnitas m , R_F , $\Re\{I_F\}$ e $\Im\{I_F\}$. Sendo que \Re e \Im representam a componente real e imaginária, respectivamente. Takagi et al. (1982) propuseram uma solução separando o circuito da falta (figura 1a) em um circuito de pré-falta (figura 1b) e um circuito de “falta pura” (figura 1c). Ao substituir I_F de (1) por (5), obtém-se a equação (9).

$$V_G = m \cdot Z_{1L} \cdot I_G + R_F \frac{\Delta I_G}{|d_G| \cdot e^{j\beta_G}} \quad (9)$$

A eliminação da parcela referente à R_F de (9) é alcançada ao multiplicá-la por $\Delta I_G^* \cdot e^{j\beta_G}$ e, então, resolver a componente imaginária, obtendo a expressão para m (10).

$$m = \frac{\Im\{V_G \cdot \Delta I_G^* \cdot e^{j\beta_{1G}}\}}{\Im\{Z_{1L} \cdot I_G \cdot \Delta I_G^* \cdot e^{j\beta_{1G}}\}} \quad (10)$$

A estimativa da localização de falta (11), utilizada no algoritmo Takagi et al. (1982), é obtida a partir de (10), considerando o sistema homogêneo $\beta_G = 0$.

$$m = \frac{\Im\{V_G \cdot \Delta I_G^*\}}{\Im\{Z_{1L} \cdot I_G \cdot \Delta I_G^*\}} \quad (11)$$

2.3 Takagi Modificado

Schweitzer (1983), Zimmerman and Costello (2006), Saha et al. (2009) e o guia IEEE-Std-C37.114:2014 (2015) apresentam modificações no algoritmo proposto por Takagi et al. (1982), para aprimorar o seu desempenho, utilizando o ângulo β_G , para considerar a não homogeneidade do sistema, e substituindo ΔI_G pela corrente residual $3I_{0G}$ (12), para evitar o uso de I_{preG} nos casos de faltas monofásicas.

$$m = \frac{\Im\{V_G \cdot I_{0G}^* \cdot e^{j\beta_{0G}}\}}{\Im\{Z_{1L} \cdot I_G \cdot I_{0G}^* \cdot e^{j\beta_{0G}}\}} \quad (12)$$

Para faltas monofásicas, utiliza-se (12) e o fator d_{0G} e, para os demais casos, utiliza-se (10) e o fator d_{1G} .

2.4 Wiszniewski (1983)

A decomposição de (2) em suas componentes reais e imaginárias forma um sistema subdeterminado com quatro incógnitas m , R_F , $\Re\{I_F/I_G\}$ e $\Im\{I_F/I_G\}$. A solução proposta por Wiszniewski (1983) consiste em substituir I_F de (2) por (5). Dessa forma, é possível obter expressões para a resistência R_{FG} e reatância X_{FG} (13) vistas pelo terminal, em função das incógnitas m e R_F .

$$\begin{cases} R_{FG} = m \cdot R_L + \frac{R_F}{|d_G|} \cdot \Re\left\{\frac{\Delta I_B}{I_B \cdot e^{j\beta_G}}\right\} \\ X_{FG} = m \cdot X_L + \frac{R_F}{|d_G|} \cdot \Im\left\{\frac{\Delta I_B}{I_B \cdot e^{j\beta_G}}\right\} \end{cases} \quad (13)$$

A estimativa da localização de falta (15), utilizada no algoritmo Wiszniewski (1983), é obtida com a solução de (13), utilizando a , b e ϕ (14). Para faltas monofásicas, utiliza-se $d_G = (2d_{1G} + d_{0G})/3$ e, para os demais casos, $d_G = d_{1G}$.

$$a = \Re\left\{\frac{\Delta I_B}{I_B \cdot e^{j\beta_G}}\right\}, \quad b = \Im\left\{\frac{\Delta I_B}{I_B \cdot e^{j\beta_G}}\right\}, \quad \phi = \arctan \frac{X_L}{R_L} \quad (14)$$

$$m = \frac{X_{FG}}{X_L} - \frac{R_{FG} \cdot \tan \phi - X_{FG}}{X_L \cdot ((a/b) \cdot \tan \phi - 1)} \quad (15)$$

3. ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS COM BASE EM FASORES DE DOIS TERMINAIS

A tensão no ponto da falta trifásica V_F da figura 1 pode ser determinada a partir do terminal G e do terminal H, considerando um ângulo de sincronização δ entre os terminais, para correção de possíveis erros de sincronismo na aquisição dos dados. A estimativa de localização de falta m é obtida ao correlacionar essas equações, eliminando a influência da R_F . Esse é o princípio da formulação dos ABFs de dois terminais analisados. A distinção entre eles está na formulação e nos requisitos necessários para sua implementação, conforme apresentado na tabela 2.

Essa abordagem pode ser estendida aos demais tipos de falta com a aplicação do *Teorema de Fortescue*, equacionando a tensão no ponto da falta V_{kF} para uma componente simétrica de sequência $k = 0, 1, 2$. Em casos de faltas assimétricas, utiliza-se as grandezas de sequência negativa $k = 2$ e, para os casos de faltas simétricas, utiliza-se as grandezas de sequência positiva incremental $k = \Delta 1$, que consiste em subtrair os valores de tensão e corrente medidos na falta pelos valores de pré-falta.

3.1 Tziouvaras (2001)

Tziouvaras (2001) apresenta um algoritmo que utiliza as informações das impedâncias e das correntes, determinando V_{kF} a partir dos terminais G e H (16).

$$\begin{cases} V_{kF} = I_{kG} \cdot e^{j\delta} \cdot (Z_{kG} + m \cdot Z_{kL}) \\ V_{kF} = I_{kH} \cdot (Z_{kH} + (1 - m) \cdot Z_{kL}) \end{cases} \quad (16)$$

Ao relacionar as equações de V_{kF} (16) e, então, tomar o módulo, obtém-se (17) que independe do ângulo δ . As impedâncias dos terminais G e H serão calculadas a partir dos valores de tensão e corrente $Z_{kG} = -V_{kG}/I_{kG}$ e $Z_{kH} = -V_{kH}/I_{kH}$, para evitar erros causados pelas variações das configurações do sistema.

$$|I_{kH}| = \left| I_{kG} \frac{Z_{kG} + m \cdot Z_{kL}}{Z_{kH} + Z_{kL} - m \cdot Z_{kL}} \right| \quad (17)$$

A solução de (17) é uma função de segundo grau (18) com os coeficientes reais, A_1 , B_1 e C_1 , definidos em função das impedâncias das fontes dos terminais G Z_{kG} e H Z_{kH} , das correntes dos terminais G e H I_{kG} , $|I_{kH}|$ e da impedância da LT Z_{kL} para uma componente de sequência k . Das et al. (2014) definem esses coeficientes para $k = 2$ e a solução para $k = \Delta 1$ é análoga. A solução de (18) são dois valores de m e o valor entre 0 a 1 deve ser selecionado.

$$A_1 \cdot m^2 + B_1 \cdot m + C_1 = 0 \quad (18)$$

3.2 Saha et al. (2009)

Saha et al. (2009) apresentam um algoritmo com as informações de tensão, corrente e impedância da LT, determinando V_{kF} a partir dos terminais G e H (19).

$$\begin{cases} V_{kF} = V_{kG} \cdot e^{j\delta} - m \cdot Z_{kL} \cdot I_{kG} \cdot e^{j\delta} \\ V_{kF} = V_{kH} - (1 - m) \cdot Z_{kL} \cdot I_{kH} \end{cases} \quad (19)$$

Ao relacionar as equações de V_{kF} (19) e, então, tomar o módulo, obtém-se (20) que independe do ângulo δ .

$$1 = \frac{|V_{kH} - (1 - m) \cdot Z_{kL} \cdot I_{kH}|}{|V_{kG} - m \cdot Z_{kL} \cdot I_{kG}|} \quad (20)$$

A solução de (20) é uma função de segundo grau (21) com os coeficientes reais A_2 , B_2 e C_2 definidos em função de V_{kG} , V_{kH} , I_{kG} , I_{kH} e Z_{kL} , para uma componente de seqüência k .

$$A_2.m^2 + B_2.m + C_2 = 0 \tag{21}$$

Os autores apresentam o cálculo desses coeficientes. A solução de (21) são dois valores de localização de falta m e apenas o valor entre 0 a 1 deve ser selecionado.

3.3 Izykowski et al. (2005)

Izykowski et al. (2005) propõe uma forma não interativa para determinação de δ baseado no modelo de LT curta. Ao resolver (19), obtém-se uma equação para cálculo da distância de falta m (22) em função de $e^{j\delta}$.

$$m = \left| \frac{V_{kG}.e^{j\delta} - V_{kH} + Z_{kL}.I_{kH}}{Z_{kL}.I_{kG}.e^{j\delta} + Z_{kL}.I_{kH}} \right| \tag{22}$$

O valor de δ (23) é obtido ao decompor as componentes reais e imaginárias de (19).

$$\delta = \sin^{-1}\left(\frac{N_3}{\sqrt{N_1^2 + N_2^2}}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{N_1}{\sqrt{N_1^2 + N_2^2}}\right) \tag{23}$$

Normalmente, apenas uma solução de δ se aproxima de zero e é, portanto, selecionada. Os autores apresentam as formulações para N_1 , N_2 e N_3 .

3.4 Izykowski et al. (2011)

Izykowski et al. (2011) apresentam um ABF, com base no modelo de LT de parâmetros distribuídos, determinando V_{kF} a partir do comprimento da LT l , dos valores de tensão e corrente dos terminais G e H, da velocidade de propagação da LT γ_k e da impedância de surto Z_{kC} , para uma componente de seqüência k (24). O valor de δ é calculado de forma não interativa.

$$\begin{cases} V_{kF} = V_{kG}.e^{j\delta}.cosh(\gamma_k.m.l) - Z_{kC}.I_{kG}.e^{j\delta}.sinh(\gamma_k.m.l) \\ V_{kF} = V_{kH}.cosh(\gamma_k.k(1-m)l) - Z_{kC}.I_{kH}.sinh(\gamma_k(1-m)l) \end{cases} \tag{24}$$

A distância da falta (25), em função de $e^{j\delta}$, é obtida ao resolver (24).

$$m = \frac{\tanh^{-1}\left(\frac{V_{kH}cosh(\gamma_k l) - Z_{kC}I_{kH}sinh(\gamma_k l) - V_{kG}e^{j\delta}}{V_{kH}sinh(\gamma_k l) - Z_{kC}I_{kH}.cosh(\gamma_k l) - Z_{kC}.I_{kG}e^{j\delta}}\right)}{l.\gamma_k} \tag{25}$$

A expressão para cálculo do operador de sincronização $e^{j\delta}$ (26) é obtida ao resolver (24).

$$A_3(e^{j\delta})^2 + B_3e^{j\delta} + C_3 = 0 \tag{26}$$

Os autores apresentam o cálculo dos coeficientes A_3 , B_3 , C_3 definidos em função de, V_{kG} , I_{kG} , V_{kH} , I_{kH} , γ_k , Z_{kC} e l , utilizando duas componentes simétricas: em faltas assimétricas, $k = \Delta 1$ e $k = 2$; em faltas simétricas, $k = \Delta 1$ e $k = 1$.

4. FONTES DE ERROS DOS ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS COM BASE EM FASORES

A análise do desempenho dos ABFs será realizada utilizando o método do erro relativo com base no comprimento

¹ Apenas em casos de faltas monofásicas.
² Apenas para os casos com linha paralela.
³ Apenas nos casos de faltas bifásicas e trifásicas.
⁴ Parâmetro opcional.
⁵ Apenas nos casos de faltas trifásicas.

Tabela 2. Resumo dos requisitos dos ABFs.

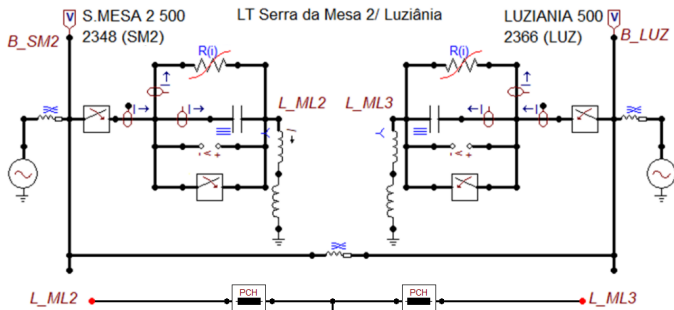
	Um terminal				Dois terminais			
	Reatância Simples	Takagi et al. (1982)	Takagi Modificado	Wiszniewski (1983)	Tziouvaras (2001)	Saha et al. (2009)	Izykowski et al. (2005)	Izykowski et al. (2011)
Dados da Falta								
Tipo	✓	✓	✓	✓	✓ ⁵	✓ ⁵	✓ ⁵	✓ ⁵
V_G	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
I_G	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
V_H	□	□	□	□	✓	✓	✓	✓
I_H	□	□	□	□	✓	✓	✓	✓
V_{Gpre}	□	□	□	□	✓ ⁵	✓ ⁵	✓ ⁵	✓ ⁵
I_{Gpre}	□	✓	✓ ³	✓	✓ ⁵	✓ ⁵	✓ ⁵	✓ ⁵
V_{Hpre}	□	□	□	□	✓ ⁵	✓ ⁵	✓ ⁵	✓ ⁵
I_{Hpre}	□	✓	✓	✓	✓ ⁵	✓ ⁵	✓ ⁵	✓ ⁵
I_{0GII}	✓ ²	✓ ²	✓ ²	✓ ²	□	□	□	□
Parâmetros da LT								
Z_{0L}	✓ ¹	✓ ¹	✓ ¹	✓ ¹	□	□	□	□
Z_{1L}	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	□
γ_1	□	□	□	□	□	□	□	✓
Z_{1C}	□	□	□	□	□	□	□	✓
l	□	□	□	□	□	□	□	✓
Parâmetros do Sistema								
Z_{0G}	□	□	✓	✓	□	□	□	□
Z_{1G}	□	□	✓	✓	□	□	□	□
Z_{0H}	□	□	✓	✓	□	□	□	□
Z_{1H}	□	□	✓	✓	□	□	□	□
Z_{0P}	□	□	✓ ⁴	✓ ⁴	□	□	□	□
Z_{1P}	□	□	✓ ⁴	✓ ⁴	□	□	□	□
Z_{0m}	✓ ²	✓ ²	✓ ²	✓ ²	□	□	□	□

da LT (27), que é definido pelo módulo da diferença entre m e o local real da falta pelo comprimento da LT m_r , expresso em porcentagem (IEEE-Std-C37.114:2014, 2015). A estimativa de localização m , utilizada nas análises, será a mediana dos valores calculados no período estacionário de falta, por apresentar melhor desempenho que o valor médio (Lopes et al., 2020). O período selecionado inicia na estabilização dos fasores, um ciclo de onda, e termina no instante de abertura disjuntor, três ciclos de onda após o início da falta. No final do capítulo, será apresentada a tabela 3 com o resumo das fontes de erros que afetam o desempenho dos ABFs estudados, levando em consideração os resultados obtidos nas simulações.

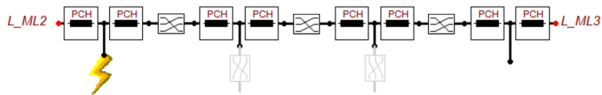
$$E\% = |m - m_r|.100\% \tag{27}$$

O sistema apresentado na figura 3 foi implementado no ATPDRAWTM para simular faltas nas LTs e gerar as formas de onda de tensão e de corrente, com taxa de amostragem de 1,2 kHz. As LTs têm a geometria e materiais utilizados na LT Serra da Mesa 2/Luziânia, que é uma LT de EAT de 500 kV, com 313,8 km de comprimento e está em operação no Sistema Interligado Nacional (SIN).

O padrão das faltas será LT transposta, sistema homogêneo, ângulo de potência θ de 0° , R_F de 0Ω e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão. Os Bancos de Capacitores Série (BCSs) estão fora de operação e os Reatores de Linha estão inseridos. Essas características serão alteradas de acordo com a fonte de erro analisada e essas alterações serão descritas nas seções seguintes.



(a) Sistema homogêneo, LT Transposta e LT não Transposta.



(b) Modelo da LT transposta por seguimento.

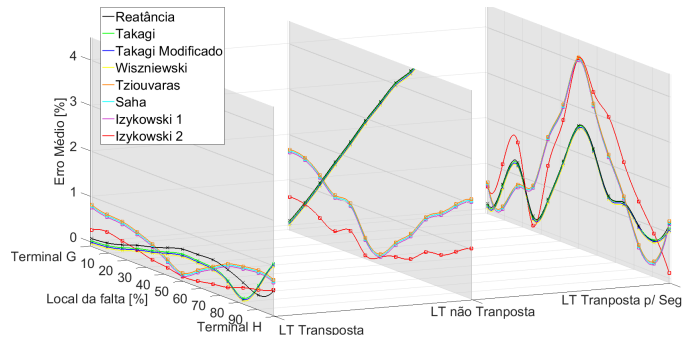
Figura 3. Sistema Modelado no ATPDRAW™.

4.1 Linhas não transpostas e transpostas por seguimento

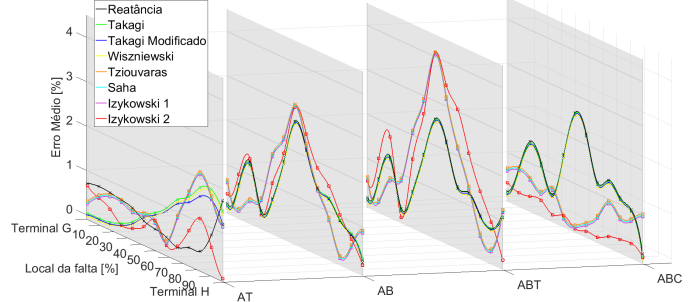
As formulações dos ABFs estudados consideram que a LT seja perfeitamente transposta. No entanto, LTs não transpostas ou com segmentos longos sem transposição dos condutores são comuns na prática (Das et al., 2014). Os algoritmos foram avaliados em simulações utilizando os modelos de LT transposta, não transposta e transposta por seguimento. A resistência de falta utilizada, nos casos de faltas monofásicas, foi de 10Ω e, nos demais casos, 5Ω . A figura 4 apresenta os resultados obtidos. Os ABFs de um terminal apresentam bons resultados, quando aplicados à LTs transpostas, com erros abaixo de 1,7%. Os ABFs de dois terminais aprimoram esse resultado com erros inferiores a 1%. Nos casos de LT não transpostas, há uma queda no desempenho dos ABFs de um terminal com erros acima de 5% para faltas além de 50% da LT. Os ABFs de dois terminais também apresentam uma redução no desempenho com erros de até 2%. Para os casos de LTs transpostas por seguimento, observa-se erros de até 2,5% e 4%, para os ABFs de um e de dois terminais, respectivamente.

4.2 Imprecisão do parâmetro de resistividade do solo

Os valores da resistividade do solo ρ variam com o tipo de solo, as condições físicas, a umidade, a temperatura, o conteúdo mineral, a compactação e a não uniformidade com o aumento da profundidade (Amberg et al., 2012)(IEEE-Std-81:2012, 2012). O ajuste de impedância de sequência zero da LT Z_{0L} utilizado nos ABFs de um terminal, para os casos de faltas monofásicas, é configurado a partir de



(a) Faltas bifásicas-terra ABT.



(b) Faltas aplicadas na LT Transposta por Seguimento.

Figura 4. Efeito da transposição da LT nos ABFs.

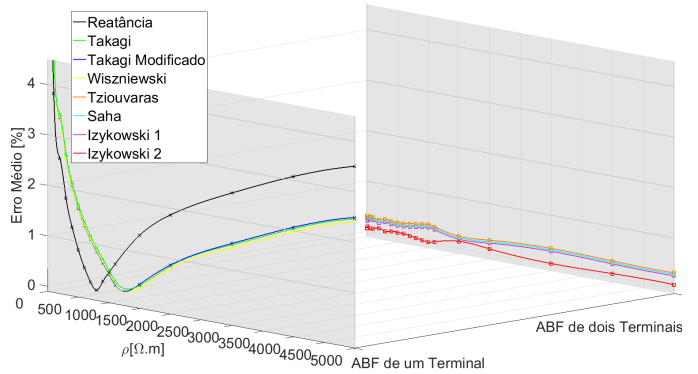


Figura 5. Efeito da imprecisão do parâmetro de resistividade do solo nos ABFs.

um valor fixo de ρ , não considerando as possíveis variações. Foram simulados casos de faltas monofásicas a 40% da LT Transposta, $R_F = 10\Omega$ e com ρ variando entre $10\Omega\text{m}$ e $5000\Omega\text{m}$. Os ABFs foram configurados com Z_{0L} calculada pelo ATPDRAW™ usando $\rho = 1000\Omega\text{m}$. Os ABFs de um terminal, exceto o algoritmo da Reatância Simples, apresentam erros abaixo de 1% para os casos dentro da faixa de $700\Omega\text{m}$ a $2100\Omega\text{m}$, conforme apresentado na figura 5. Para variações além dessa faixa, observa-se a perda de desempenho com erros acima de 2%. Os ABFs de dois terminais não utilizam Z_{0L} e, portanto, não apresentam variações no desempenho.

4.3 Resistência de Falta, Variação de Carga e Sistema não Homogêneo

As faltas podem ser classificadas em relação à R_F , sendo divididas em faltas francas ou resistivas. Em geral, as faltas entre fases apresentam R_F inferiores $0,5\Omega$. Faltas monofásicas por *flashover* de isolador também apresentam R_F baixa, não ultrapassando 3Ω . Entretanto, em casos

envolvendo árvores ou contato em solo a R_F pode se tornar elevada (Saha et al., 2009).

Foram simuladas faltas monofásicas a 50% da LT para analisar o impacto do “efeito reatância” na precisão dos ABFs. Foram considerados três casos: Sistema Homogêneo e $R_F = 1 \Omega$, Sistema Homogêneo e $R_F = 50 \Omega$, Sistema não Homogêneo e $R_F = 50 \Omega$. Os ABFs de dois terminais não são afetados pela variação da R_F , conforme apresentado na figura 6. Para faltas francas, os ABFs de um terminal são precisos, mesmo sob condições de carga pesada. Em faltas resistivas, o algoritmo da Reatância Simples apresenta erros de até 15%. O demais ABFs de um terminal apresentam variações pouco expressivas de desempenho, por terem recursos para redução do erro devido ao “efeito reatância”. O algoritmo Takagi et al. (1982), não considera a homogeneidade do sistema, com uma pequena perda de desempenho nessa condição.

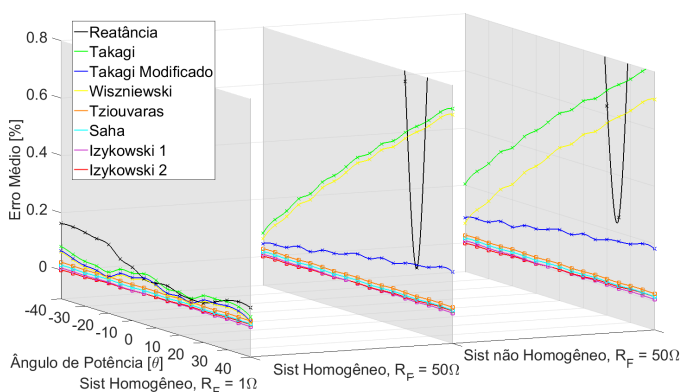


Figura 6. Impacto do “efeito reatância” nos ABFs.

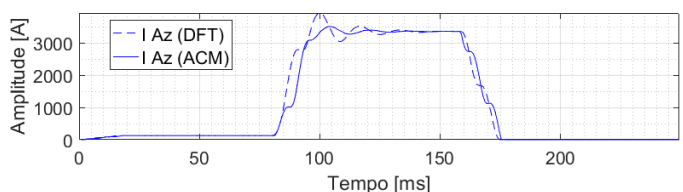
4.4 Componente DC de decaimento exponencial

As impedâncias das LTs e do sistema de transmissão são predominantemente indutivas e, portanto, a assimetria provocada pela componente DC (*Direct Current*) de decaimento exponencial é máxima para faltas que incidem no instante em que a tensão está próxima de zero e mínima quando está próxima ao pico (Das et al., 2014). Em faltas causadas por mecanismo lento o arco ocorrerá no pico de tensão e, por isso, não haverá componente DC de decaimento exponencial. Entretanto, em faltas causadas por fenômenos de alta velocidade, como descargas atmosféricas, o ponto de incidência da falta se torna aleatório (Ibrahim, 2011).

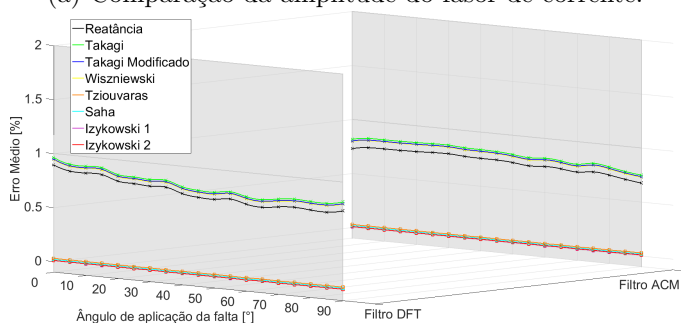
Os ABFs utilizam os fasores de tensão e de corrente na frequência fundamental os quais, nesse trabalho, são estimados com o algoritmo Transformada Discreta de Fourier (DFT) a partir das amostras de sinais de tensão e de corrente. Oliveira and Souza (2012) observam que os componentes harmônicos são filtrados pelo filtro DFT, mas o mesmo não ocorre com a componente DC de decaimento exponencial por ter um espectro de frequências relativamente amplo. Uma solução possível é a utilização de algoritmos com recursos para filtrar essa componente como, por exemplo, o Algoritmo Cosseno Modificado (ACM) Hart et al. (2000).

A figura 7a apresenta a comparação do resultado obtido com o filtro DFT e com o ACM. Observa-se que o

ACM apresenta um desempenho melhor na eliminação da componente DC de decaimento exponencial, reduzindo as distorções na amplitude dos fasores, melhorando o desempenho dos algoritmos de localização de faltas. A utilização da mediana dos resultados, encontrados no período estacionário de falta, também reduz o impacto dessas distorções. A figura 7b mostra os resultados para faltas monofásicas $R_F = 10 \Omega$ variando o ângulo de aplicação de 0° , tensão zero, a 90° , pico de tensão. Os ABFs apresentam um desempenho satisfatório, utilizando o filtro DFT, com uma pequena redução de desempenho para as faltas próximas ao ponto de tensão zero. A utilização do ACM aprimora o resultado, eliminando o impacto da Componente DC de decaimento exponencial.



(a) Comparação da amplitude do fasor de corrente.



(b) Comparação do desempenho dos ABFs utilizando DFT e ACM.

Figura 7. Análise do efeito da Componente DC de decaimento exponencial nos ABFs.

4.5 Banco de Capacitor Série (BCS)

A Compensação Série de LTs aumenta a capacidade de transferência de energia e melhora a estabilidade do sistema. Entretanto, traz uma série de desafios para os sistemas de proteção e localização de faltas causados pela alteração da reatância longitudinal da LT, pelas oscilações de frequência sub-harmônicas e as não linearidades causadas pelo MOV (Altuve et al., 2009). Faltas em LTs compensadas com BCS podem provocar oscilação transitória do circuito de indutâncias, capacitâncias e resistências (Circuito LCR) inserindo uma frequência sub-harmônica de 10 kHz e componente DC de decaimento exponencial sobrepostas à componente fundamental das grandezas de tensão e de corrente (Ziegler, 2011).

Os BCSs podem ser instalados nas extremidades ou ao longo da LT (Ziegler, 2011). Os ABFs apresentados podem ser aplicados nos casos em que os BCSs estejam fora da zona entre os Transformadores de Potencial (TPs), porque a diferença de tensão dos BCSs não está incluída na tensão medida (Bains and Zadeh, 2016). A figura 8 mostra o desempenho dos ABFs aplicados nessa configuração, considerando $R_F = 5 \Omega$ e os BCSs inseridos. Os algoritmos

Tabela 3. Resumo das fontes de erro que afetam os ABFs.

Fontes de erros	Um terminal				Dois terminais			
	Reatância Simples	Takagi et al. (1982)	Takagi Modificado	Wiszniewski (1983)	Tziouvaras (2001)	Saha et al. (2009)	Izykowski et al. (2005)	Izykowski et al. (2011)
4.1 – Linhas não transpostas e transpostas por seguimento.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4.2 – Imprecisão do parâmetro de Resistividade do solo.	✓ ¹	✓ ¹	✓ ¹	✓ ¹	□	□	□	□
4.3 – Resistência de Falta.	✓	□	□	□	□	□	□	□
4.3 – Variação da carga do sistema.	✓	□	□	□	□	□	□	□
4.3 – Não homogeneidade do sistema.	✓	✓	□	□	□	□	□	□
4.4 – Componente DC de Decaimento exponencial.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4.5 – Banco de Capacitor Série.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4.6 – Erro de sincronização de dados.	□	□	□	□	□	□	✓ ²	✓ ³

de um terminal apresentam erros inferiores a 2% para faltas em até 65% da LT. Os algoritmos de dois terminais apresentam erros médios abaixo de 1,5%. Observa-se que a utilização da mediana dos resultados, encontrados no período estacionário de falta, reduz o impacto das distorções provocadas pela oscilação transitória do Circuito LCR.

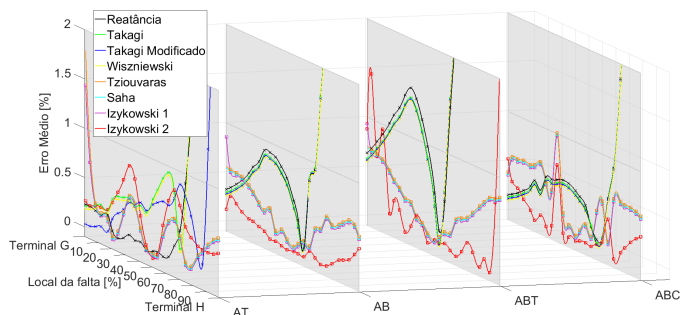


Figura 8. Efeito dos BCSs nos ABFs.

4.6 Erro de sincronização de dados

As amostras de tensão e de corrente podem apresentar erros de sincronismo devido à diferença na taxa de amostragem, ao deslocamento de fase causado pelos TPs e pelos Transformadores de Corrente (TCs), às falhas de equipamentos de sincronização e outros. Os ABFs de dois terminais, apresentados neste trabalho, têm recursos para correção de erros de sincronismo. Foram introduzidos erros de sincronismo de -180° a 180° para observação do impacto nos algoritmos de localização de faltas. Os algoritmos Tziouvaras (2001) e Saha et al. (2009) não apresentam variações significativas no resultado, conforme apresentado na figura 9. Os algoritmos Izykowski et al. (2005) e Izykowski et al. (2011) também são robustos para erros de sincronismo, mas estão limitados à faixa de erro de -90° a 90° e de -75° a 75° , respectivamente. Essa margem de erro possibilita a sincronização manual dos sinais.

¹ Apenas em casos de faltas monofásicas.

² Tolerância na faixa de -90° a 90°

³ Tolerância na faixa de -75° a 75°

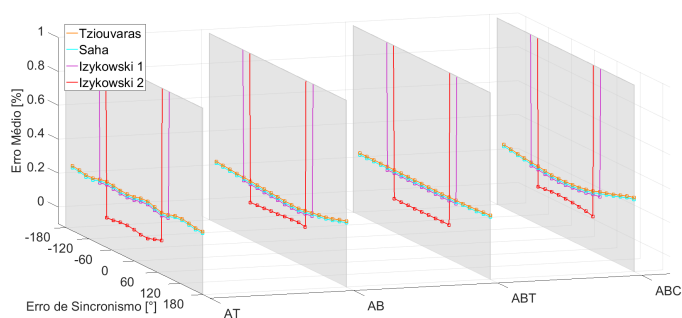


Figura 9. Efeito do erro de sincronismo nos ABFs.

5. CONCLUSÕES

A disponibilidade dos requisitos de dados e parâmetros, apresentados na tabela 2, é um fator crítico a ser considerado na escolha do ABF mais adequado. Para selecionar uma abordagem robusta e confiável, capaz de aprimorar a precisão da estimativa de localização, é primordial conhecer o sistema monitorado e considerar as possíveis fontes de erro, resumidas na tabela 3.

O Algoritmo da Reatância Simples é inadequado para estimar a localização de faltas, devido à sua sensibilidade ao “efeito reatância”. Para solucionar esse problema, os algoritmos Takagi et al. (1982), Takagi modificado e Wiszniewski (1983) apresentam recursos para reduzir o impacto da corrente de carga e, os dois últimos, consideram a não homogeneidade do sistema, eliminando o impacto do “efeito reatância”. Entretanto, as variações da resistividade do solo afetam o desempenho desses algoritmos em casos de faltas à terra. Os ABFs de dois terminais eliminam as fontes de erros relacionadas à resistência de falta e à resistividade do solo, além de apresentarem recursos para corrigir possíveis falhas de sincronismo. Izykowski et al. (2011), que utiliza o modelo de linha longa, é mais preciso que Tziouvaras (2001), Saha et al. (2009) e Izykowski et al. (2005), mas é mais sensível aos erros de sincronismo.

Outras fontes de erros afetam os ABFs de formas distintas. A não transposição das LTs ou a transposição por

seguimento trazem impactos nos resultados dos ABFs, por considerarem a LT perfeitamente transposta. A componente DC de decaimento exponencial e a presença de BCS provocam distorções no processo de cálculo dos fasores de tensão e corrente. A utilização da mediana dos resultados encontrados, no período estacionário de falta, reduz o impacto dessas fontes de erros. Outra solução é a utilização de algoritmos de estimação de fasores com recursos para reduzir essas distorções. Outras fontes de erros, que também impactam o desempenho dos algoritmos analisados, não foram simuladas como, por exemplo: erros relacionados aos TPs e TCs; LTs de três terminais; LTs não homogêneas e acoplamento mútuo em LTs paralelas.

Em geral, os ABFs de dois terminais apresentaram maior robustez e melhor desempenho com erros inferiores a 2%. Entretanto, em alguns casos específicos, o erro pode ser maior, ultrapassando 4%. Essa margem de erro compromete o desempenho das equipes de manutenção. Portanto, para LTs longas e para LTs com BCS, é recomendável a análise de outros algoritmos de localização de faltas ou a instalação de equipamentos de localização de faltas com base em ondas viajantes.

REFERÊNCIAS

- Altuve, H.J., Mooney, J.B., and Alexander, G.E. (2009). Advances in series-compensated line protection. In *2009 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers*. IEEE.
- Amberg, A., Rangel, A., and Smelich, G. (2012). Validating transmission line impedances using known event data. In *2012 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. IEEE.
- ATPDraw (2021). ATPDRAW version 7.3 - Users' Manual.
- Bains, T.P.S. and Zadeh, M.R.D. (2016). Supplementary impedance-based fault-location algorithm for series-compensated lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(1), 334–342.
- Dalcastagne, A.L. and Zimath, S.L. (2008). A study about the sources of error of impedance-based fault location methods. In *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 1–6.
- Das, S., Gaikwad, S., Patel, A., and Patel, M. (2014). Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application. *IEEE Access*, 2, 537–557.
- Hart, D.G., Novosel, D., and Smith, R.A. (2000). Modified cosine filters.
- Ibrahim, M.A. (2011). *Disturbance Analysis for Power Systems*. Wiley - IEEE. Wiley-Blackwell, Hoboken, NJ.
- IEEE-Std-81:2012 (2012). Ieee guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system. *IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983)*, 1–86.
- IEEE-Std-C37.114:2014 (2015). Ieee guide for determining fault location on ac transmission and distribution lines. *IEEE Std C37.114-2014 (Revision of IEEE Std C37.114-2004)*, 1–76.
- Izykowski, J., Rosolowski, E., Balcerek, P., Fulczyk, M., and Saha, M.M. (2011). Accurate noniterative fault-location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(2), 547–555.
- Izykowski, J., Rosolowski, E., and Saha, M. (2005). Post-fault analysis of operation of distance protective relays of power transmission lines. In *2005 IEEE Russia Power Tech*, 1–7.
- Liu, Y., Wang, B., Zheng, X., Lu, D., Fu, M., and Tai, N. (2020). Fault location algorithm for non-homogeneous transmission lines considering line asymmetry. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(5), 2425–2437.
- Lopes, F.V., Leite, E.J.S., Ribeiro, J.P.G., Piardi, A.B., Fabián Espinoza, R.G., Scheid, A.V., Zat, G., and Otto, R.B. (2020). Phasor-based fault location challenges and solutions for transmission lines equipped with high-speed time-domain protective relays. *Electric Power Systems Research*, 189, 106617.
- Lotfifard, S., Kezunovic, M., and Mousavi, M.J. (2013). A systematic approach for ranking distribution systems fault location algorithms and eliminating false estimates. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(1), 285–293.
- Mirzaei, M., Kadir, Z., Moazami, E., and Hizam, H. (2009). Review of fault location methods for distribution power system. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3, 2670–2676.
- Mora-Florez, J., Meléndez, J., and Carrillo-Caicedo, G. (2008). Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 78, 657–666.
- Oliveira, N.L.S. and Souza, B.A. (2012). Effects of the exponentially decaying dc offset in the phasor estimation algorithms performance. In *2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)*, 1–5.
- Saha, M.M., Das, R., Verho, P., and Novosel, D. (2002). Review of fault location techniques for distribution systems. *Power Systems and Communications Infrastructures for the future*.
- Saha, M.M., Izykowski, J., and Rosolowski, E. (2009). *Fault location on power networks*. Power systems. Springer, London, England, 2010 edition.
- Schweitzer, E.O. (1983). Evaluation and development of transmission line fault-locating techniques which use sinusoidal steady-state information. *Computers e Electrical Engineering*, 10(4), 269–278.
- Takagi, T., Yamakoshi, Y., Yamaura, M., Kondow, R., and Matsushima, T. (1982). Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(8), 2892–2898.
- Tziouvaras, D. A. J. Roberts, G.B. (2001). New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines.
- Wiszniewski, A. (1983). Accurate fault impedance locating algorithm. *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, 130, 311–314.
- Ziegler, G. (2011). *Numerical Distance Protection*. Publicis Publishing, 4 edition.
- Zimmerman, K. and Costello, D. (2006). Impedance-based fault location experience. In *2006 IEEE Rural Electric Power Conference*, 1–16.