



**XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPC/32
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

UM ALGORITMO BASEADO NA TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM TEMPO REAL UTILIZANDO DADOS NÃO SINCRONIZADOS DE DOIS TERMINAIS

Felipe Vigolvino Lopes (*)
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Kleber Melo e Silva
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Bernard Fernandes Küsel
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

RESUMO

Os métodos de localização de faltas de dois terminais baseados na teoria das ondas viajantes têm sido cada vez mais aceitos no setor elétrico. No entanto, a necessidade de meios para sincronização de dados ainda é considerada uma grande limitação destas técnicas. Nesse sentido, apresenta-se neste trabalho um algoritmo de dois terminais baseado na teoria das ondas viajantes para localização de faltas em tempo real usando dados não sincronizados. Dos resultados obtidos na avaliação do algoritmo, comprova-se o bom desempenho do mesmo, o qual consiste em uma boa alternativa para linhas de transmissão com canais de comunicação disponíveis.

PALAVRAS-CHAVE

Dados não sincronizados, linhas de transmissão, localização de faltas, ondas viajantes, sistemas de potência.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os métodos de localização de faltas têm desempenhado um papel de grande importância no processo de restabelecimento do fornecimento de energia após a ocorrência de faltas nos sistemas elétricos de potência (SEP), visto que reduzem o tempo de busca do defeito e, conseqüentemente, minimizam a duração dos desligamentos [1]. Da literatura, sabe-se que existem quatro tipos de métodos, dentre os quais se destacam os baseados em componentes de frequência fundamental e na teoria das ondas viajantes (OV). Com o avanço dos conversores A/D, os algoritmos baseados na teoria das OV ganharam espaço, sendo atualmente encontrados em relés numéricos de proteção e em registradores digitais de perturbações (RDP) [2], [3]. Embora esses métodos sejam imunes a diversas fontes de erro típicas das técnicas baseadas em componentes de frequência fundamental, os métodos clássicos de dois terminais baseados na teoria das OV requerem a sincronização de dados, o que tem limitado o seu uso de forma mais ampla nos SEP desprovidos de uma referência de tempo comum.

Neste trabalho, apresenta-se uma técnica de dois terminais baseada na teoria das OV para localização de faltas em tempo real em linhas de transmissão (LT). A vantagem da técnica em relação aos métodos clássicos do mesmo tipo é que esta não requer a sincronização dos dados provenientes dos terminais da linha. Para tanto, o algoritmo é executado em tempo real, requerendo apenas o uso de um sistema de comunicação com atraso passível de estimação. Para avaliar o algoritmo, foram realizadas 5950 simulações de curtos-circuitos em um SEP de 230 kV modelado em um *Real-Time Digital Simulator* (RTDSTM), considerando-se atrasos no sistema de comunicação com baixa e alta variabilidade. Os resultados obtidos comprovam a confiabilidade do algoritmo proposto.

2.0 - PRINCÍPIOS DOS MÉTODOS CLÁSSICOS DE DOIS TERMINAIS BASEADOS NA TEORIA DAS OV

Para facilitar a compreensão do princípio de funcionamento dos métodos clássicos de localização de faltas baseados na teoria das OV, considere-se o diagrama de reflexões de OV apresentado na Figura 1. Neste diagrama, ilustram-se as OV que se propagam ao longo de uma LT de comprimento L em decorrência de uma falta

(*) Campus Universitário Darcy Ribeiro, Bloco SG-11, Laboratório LAPSE – CEP 70.910-900 Brasília, DF, Brasil
Tel: (+55 61) 3107-1039 – Email: felipevlpes@unb.br

ocorrida no ponto F , localizado a d quilômetros do terminal local (Barra i) e a $L-d$ quilômetros do terminal remoto (Barra j). Os instantes de incidência das OV nos terminais da linha são ilustrados na própria figura.

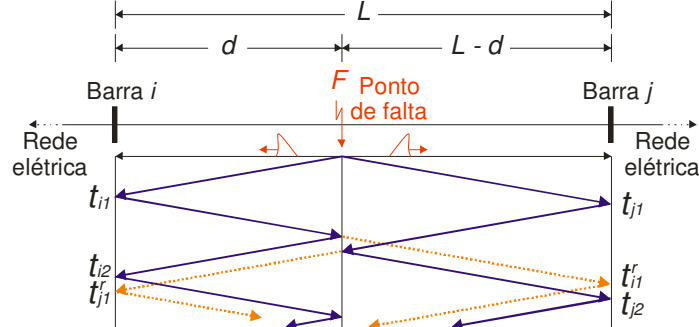


FIGURA 1 – Diagrama de reflexões das OV em uma LT de dois terminais.

Teoricamente, os métodos de um e dois terminais possuem a mesma precisão, pois ambos requerem a detecção de duas frentes de onda. No caso de um algoritmo de um terminal monitorando a Barra local j da LT, por exemplo, a localização da falta seria estimada a partir da detecção dos instantes t_{j1} e t_{j2} , referentes à primeira e segunda frentes de onda incidentes na referida barra, respectivamente. O problema é que, em alguns casos, t_{j2} é muito próximo de t_{j1}' (instante de chegada na Barra j das OV que refletiram na Barra i e refrataram no ponto F), o que dificulta sobremaneira a estimação correta do ponto de falta [1]. Por outro lado, os métodos de dois terminais requerem apenas a detecção dos instantes de incidência das primeiras OV nos terminais da LT (instantes t_{i1} e t_{j1}), sendo a distância d calculada por [1]:

$$d_i = \frac{L - (t_{j1} - t_{i1})v_p}{2}, \quad (1)$$

onde v_p é a velocidade de propagação das OV na LT.

Uma vez que requerem a detecção de OV nos terminais local e remoto, os métodos clássicos de dois terminais baseados na teoria das OV têm como requisito básico a sincronização das estampas de tempo. Por isso, a perda da referência de tempo comum compromete todo o procedimento de localização de faltas [4]. Vale salientar ainda que, mesmo se algum *Intelligent Electronic Device* (IED) instalado na Barra i ou na Barra j for utilizado como fonte da referência de tempo, ainda seria necessário avaliar as estampas de tempo das amostras utilizadas no algoritmo, o que poderia ocasionar erros na localização da falta em casos, por exemplo, de problemas no relógio dos IED.

3.0 - ALGORITMO PROPOSTO

O algoritmo proposto é uma extensão das técnicas de dois terminais clássicas baseadas na teoria das OV. Para implementá-lo, são utilizados dois módulos: o módulo detector de transitórios e o módulo localizador de faltas, cujas rotinas devem ser implementadas em IED com altas taxas de amostragem, preferencialmente, da ordem de algumas dezenas de kHz até alguns MHz.

O procedimento de localização de faltas é iniciado com a detecção em tempo real, nos terminais monitorados, das OV, as quais se propagam ao longo da linha em forma de transitórios eletromagnéticos. Nesse trabalho, tal detecção é realizada por meio do algoritmo descrito em [5], o qual tem se mostrado adequado para aplicações *on-line*. Esse algoritmo é capaz de identificar os instantes de incidência das OV por meio da detecção de transitórios e também de desbalanceamentos entre as fases, assegurando a localização da falta mesmo em casos nos quais as componentes de alta frequência induzidas pelo curto-circuito nos sinais avaliados se encontram atenuadas. Em seguida, obtém-se a estimativa da distância do defeito, cujo valor é automaticamente disponibilizado para as equipes de operação e manutenção tão logo uma falta interna na LT seja detectada pelo sistema de proteção.

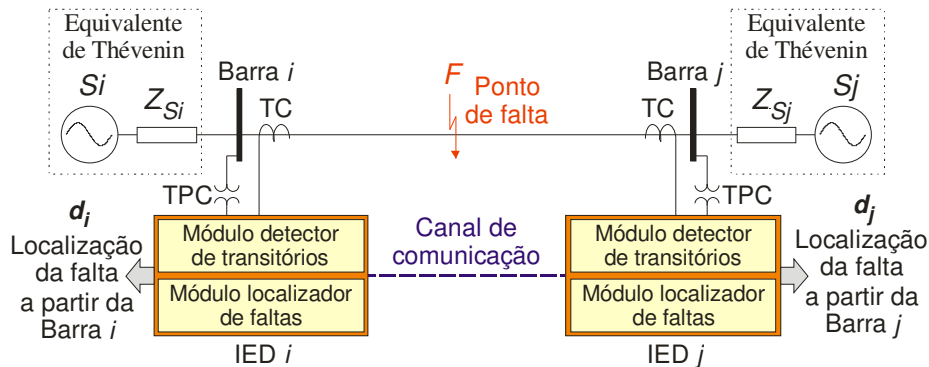


FIGURA 2 – Diagrama de reflexões das OV em uma LT de dois terminais.

Para realizar os procedimentos descritos, necessita-se de um canal de comunicação para intercâmbio de informações entre os IED instalados nos terminais da LT, nos quais os módulos de detecção de transitórios e de localização devem estar implementados (ver Figura 2). Assim, cada IED transmite e recebe apenas uma variável binária através do canal de comunicação, não existindo, portanto, a necessidade de canais com grandes capacidades de transmissão e nem da análise de informações de tempo do dispositivo remoto.

3.1 Eliminando a Necessidade de Dados Sincronizados

Para viabilizar a localização da falta utilizando dados não sincronizados no algoritmo proposto, as rotinas dos módulos detectores são aplicadas em tempo real, tendo como saída uma variável binária que indica apenas a ocorrência ou não de transitórios. Tal procedimento difere do verificado nos métodos clássicos de dois terminais, os quais necessitam da análise das estampas de tempo das amostras avaliadas no instante da detecção das OV. Desta maneira, uma vez detectadas as OV nos dois terminais da linha, pode-se calcular em tempo real o período $|t_{j1}-t_{i1}|$ ao invés dos instantes t_{j1} e t_{i1} individualmente, o que elimina a necessidade de uma referência de tempo comum. Para simplificar o desenvolvimento matemático do algoritmo, o período $|t_{j1}-t_{i1}|$ será representado por τ .

Usando τ ao invés de t_{j1} e t_{i1} , torna-se necessária, a princípio, a distinção entre faltas na primeira e segunda metades da LT. De fato, o termo $(t_{j1}-t_{i1})$ usado em (1) produz valores positivos quando $d \leq L/2$ e valores negativos quando $d > L/2$, comportamento este não reproduzido por τ . Portanto, considerando um fator α indentificador do trecho da LT com falta que assume o valor '1' para $d \leq L/2$ e '-1' para $d > L/2$, pode-se reescrever (1) como:

$$d_i = 0,5(L - \alpha\tau v_p). \quad (2)$$

Conforme mencionado anteriormente, os módulos de detecção de transitórios associam a chegada das primeiras OV incidentes nos terminais da LT a variáveis binárias, aqui denominadas de bits, cujos níveis lógicos assumem valores iguais a '0' durante o regime permanente e '1' após a detecção de transitórios. Em cada terminal, avaliam-se dois bits: B_{ij} e B_{ji} na Barra i e B_{ij} e B_{ji} na Barra j , onde o primeiro e segundo subscritos representam a barra na qual o bit foi gerado e a barra onde o bit está sendo medido, respectivamente. Por questões de simplificação, considerar-se-ão as variáveis binárias B_{ix} e B_{jx} como sendo os bits monitorados de forma contínua pelo módulo localizador de faltas em uma dada barra ' x ', onde $x = i$ ou j . Esse módulo consiste de uma porta lógica OU-Exclusivo (XOR) conectada a um contador, cuja saída é representada por k_{cx} , conforme ilustrado na Figura 3.

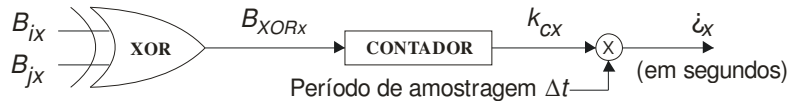


FIGURA 3 – Diagrama do módulo localizador de faltas.

A saída da porta XOR, representada por B_{xorx} , permanece em nível alto apenas entre os instantes de detecção t_{j1} e t_{i1} , sendo responsável pelo controle (incremento ou não) do contador. Assim, o contador é incrementado apenas durante o período τ , sendo o produto entre sua saída k_{cx} e o período de amostragem Δt igual ao período τ_x estimado na Barra x . τ_x seria igual a τ apenas para o caso ideal de um sistema de comunicação sem atraso, onde as variações no bit da Barra j seriam instantaneamente percebidas na Barra i , e vice-versa. Se esse caso fosse possível, a localização da falta poderia ser estimada facilmente usando (2), bastando determinar corretamente o fator α indentificador do trecho da LT com falta. Porém, na prática, os sistemas de comunicação apresentam atrasos, os quais precisam ser considerados na implementação de algoritmos aplicados em tempo real que requerem informações de mais de um terminal. No algoritmo proposto, o atraso na transmissão dos dados é descontado do valor de τ_x , conforme descrito na seção a seguir.

3.2 Compensando o Efeito do Atraso do Sistema de Comunicação

Segundo [6], o atraso de sistemas de comunicação, representado pela variável δ , possui uma característica estocástica, ou seja, pode variar aleatoriamente devido a uma série de fatores como comprimento do canal, mau funcionamento de repetidores ou até temperatura ambiente. Em sistemas de proteção, é comum o uso de técnicas para estimação de δ , a exemplo do algoritmo *ping-pong* [7]. Desta forma, estimando-se δ , os dispositivos de proteção se tornam imunes a variações no atraso do sistema de comunicação, viabilizando atuações mais confiáveis e seguras. Neste trabalho, assume-se que δ pode ser estimado de forma contínua com uma resolução no tempo da mesma ordem do período de amostragem dos IED nas barras i e j .

No caso de canais de comunicação assimétricos, o atraso na transmissão de dados do IED i para o IED j (ver Figura 2) é diferente do atraso na transmissão de dados do IED j para o IED i [6]. Por isso, são considerados os atrasos: δ_{ij} (transmissão de dados da Barra i para a j); e δ_{ji} (transmissão de dados da Barra j para a i). δ_{ij} e δ_{ji} são dados respectivamente por: $\delta_{ij} = t_{TXi} + t_{CHij} + t_{RXj}$ e $\delta_{ji} = t_{TXj} + t_{CHji} + t_{RXi}$, onde t_{CH} é o atraso do canal de

comunicação, t_{TX} é o tempo de processamento dos IED para preparar e enviar o pacote de informações, e t_{RX} é o tempo utilizado pelos IED para reconhecer as informações recebidas. Da literatura, sabe-se que o atraso t_{CH} depende apenas das características do canal de comunicação e é independente do tráfego de informações no mesmo, de forma que apresenta variações muito pequenas (valores praticamente determinísticos) [7], podendo ser estimado com boa precisão. Por outro lado, os atrasos t_{TX} e t_{RX} dependem do processamento interno dos IED, o que pode ocasionar variações imprevisíveis em δ_{ij} e δ_{ji} e, consequentemente, dificultar o processo de estimação do atraso do sistema de comunicação. Na Figura 4, ilustra-se o comportamento dos bits B_{ij} e B_{ji} (na Barra i) e B_{ji} e B_{ij} (na Barra j) já contemplando o efeito dos referidos atrasos.

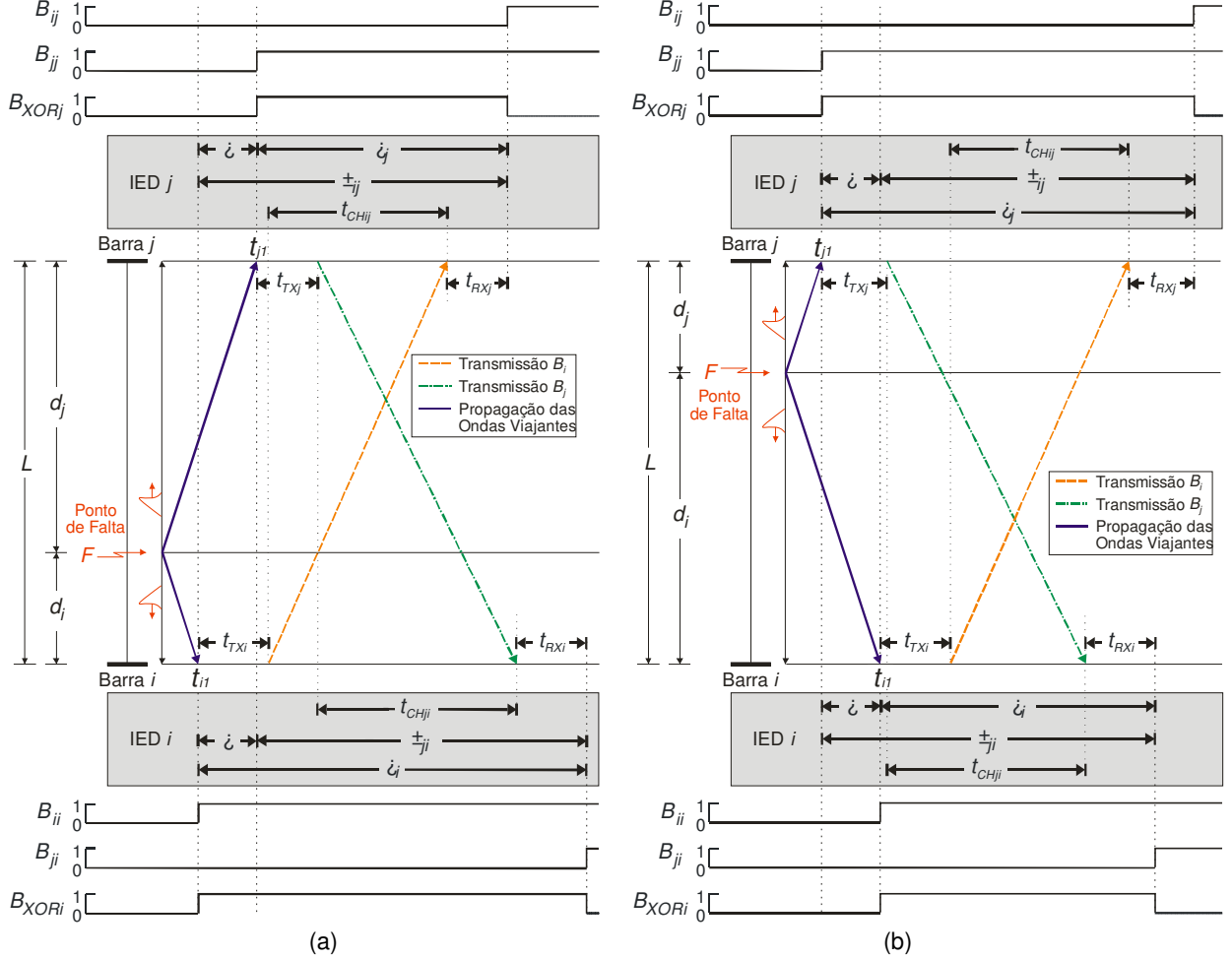


FIGURA 4 – Efeito do atraso dos sistemas de comunicação para faltas em: (a) $d \leq L/2$; (b) $d > L/2$.

Da Figura 4, percebe-se que o atraso do sistema de comunicação induz os IED a estimarem períodos τ_i e τ_j diferentes do período τ , evidenciando a necessidade de compensar o atraso na formulação do algoritmo proposto. Portanto, uma vez obtida a expressão para o período τ , já com o efeito do atraso na transmissão de dados incluso, pode-se obter a distância d_i estimada da falta em relação à Barra i :

$$d_i = 0,5[L - (\tau_i - \delta_{ji})v_p]. \quad (3)$$

A expressão (3) pode ser adaptada para qualquer outro terminal ou sistema utilizando-se os índices i e j para representar os terminais local e remoto, respectivamente. Além disso, percebe-se que, ao incluir o efeito do atraso δ_{ji} , elimina-se a necessidade de identificar a metade da LT na qual ocorreu o curto-circuito, ou seja, a variável α usada em (2) é eliminada da fórmula. Nota-se também que não existe nenhuma restrição quanto à velocidade do sistema de comunicação, desde que seja possível estimar o atraso na transmissão de dados com boa precisão. Nesse sentido, propõe-se o uso de dispositivos dedicados, bem como um canal dedicado ponto-a-ponto para o sistema localizador de faltas, o que reduz significativamente as variações do atraso δ_{ji} .

3.3 Adaptando o Algoritmo para Casos de Atrasos com Alta Variabilidade

Na prática, em casos mais adversos, o atraso δ_{ji} considerado em (4) pode apresentar uma alta variabilidade devido a incertezas nos valores de t_{TXj} e t_{RXi} (ver Figura 4). Essas variações podem induzir erros além dos níveis esperados na localização da falta, os quais crescem proporcionalmente aos desvios nos valores do atraso

estimado para utilização em (4).

Os efeitos das incertezas no valor de δ_{ji} podem ser incluídos na formulação do algoritmo proposto por meio de técnicas de estatística e probabilidade, como por exemplo, as relacionadas à teoria dos intervalos de confiança [8]. Desta forma, em casos nos quais δ_{ji} apresenta alta variabilidade, pode-se determinar um trecho da LT no qual provavelmente ocorreu o distúrbio, ou seja, calcula-se um campo de busca do curto-circuito ao invés da estimativa d_i da distância da falta. Conforme descrito em [8], se n medições são realizadas em um experimento, a média \bar{x} das medições pode ser usada como a melhor aproximação do valor real x . Nesse contexto, sabe-se que ao realizar vários experimentos, cada um com um valor elevado de n medições, se as médias $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ dos experimentos são independentes e tomadas de um mesmo conjunto de valores com média μ e desvio padrão σ , segundo o teorema do limite central, os valores de \bar{x} apresentarão uma distribuição de probabilidade aproximadamente Gaussiana, com média μ e desvio padrão σ/\sqrt{n} . Portanto, ao aplicar esse conceito no algoritmo de localização de faltas proposto, nota-se que, realizando experimentos com n estimativas do valor do atraso do sistema de comunicação (ou seja, $\{\delta_{ji1}, \delta_{ji2}, \delta_{ji3}, \dots, \delta_{jini}\}$) e calculando após cada experimento o atraso médio $\bar{\delta}_{ji}$, torna-se possível estimar um intervalo de confiança $[\bar{\delta}_{ji}^{inf}; \bar{\delta}_{ji}^{sup}]$, independentemente do conhecimento da função densidade de probabilidade que representa os atrasos do sistema de comunicação. Os limites desse intervalo de confiança são dados por:

$$[\bar{\delta}_{ji}^{inf}; \bar{\delta}_{ji}^{sup}] = \left[\mu_{\delta_{ji}} - z \frac{\sigma_{\delta_{ji}}}{\sqrt{n}}; \mu_{\delta_{ji}} + z \frac{\sigma_{\delta_{ji}}}{\sqrt{n}} \right], \quad (4)$$

onde $\mu_{\delta_{ji}}$ e $\sigma_{\delta_{ji}}$ são a média e desvio padrão dos valores médios $\bar{\delta}_{ji}$ calculados a cada n medições do atraso do canal, respectivamente, e z é o valor normalizado da distribuição normal, o qual depende do nível de confiança desejado para o intervalo de confiança em análise. Neste trabalho, considerou-se um nível de confiança de 99%, e portanto, $z = 2,575$ [8].

Como resultado, substituindo (4) em (3), obtém-se:

$$[d_i^{inf}; d_i^{sup}] = \left\{ 0,5 \left[L - (\tau_i - \bar{\delta}_{ji}^{inf})v_p \right]; 0,5 \left[L - (\tau_i - \bar{\delta}_{ji}^{sup})v_p \right] \right\} \quad (5)$$

onde $[d_i^{inf}; d_i^{sup}]$ é o trecho da LT no qual a falta deve ser procurada.

Deve-se destacar que o nível de confiança imposto para os valores de δ_{ji} pode não ser igual ao das localizações estimadas. De (5), observa-se que d_i^{inf} e d_i^{sup} dependem do período τ_i estimado pelo módulo localizador de faltas, cuja precisão depende da técnica de detecção de OV bem como da taxa de amostragem dos IED. Neste caso, também seria adequado utilizar um intervalo de confiança para τ_i , porém, uma vez que τ_i é estimado apenas na ocorrência de faltas, torna-se impossível estimar seu valor de forma contínua, o que dificulta sobremaneira a determinação de um intervalo de confiança para d_i . Por isso, para contornar os problemas decorrentes das incertezas no valor de τ_i , propõe-se uma extrapolação da variável $\sigma_{\delta_{ji}}$ usada em (4), resultando na ampliação do intervalo $[d_i^{inf}; d_i^{sup}]$ e, conseqüentemente, na estimativa de campos de busca da falta mais confiáveis. No algoritmo proposto, utiliza-se $\sigma_{\delta_{ji}} = 2\Delta t$, onde Δt é o período de amostragem dos IED (neste trabalho, igual 50 μs). Procedendo desta forma, mesmo em casos muito adversos nos quais o atraso do sistema de comunicação varia frequentemente, é possível estimar um campo de busca da falta, o que é bastante útil para as concessionárias de energia no processo de recomposição do SEP após a ocorrência de curtos-circuitos.

4.0 - AVALIAÇÃO EM TEMPO REAL DO ALGORITMO PROPOSTO

Para realizar a avaliação do algoritmo proposto, realizaram-se simulações em tempo real de uma grande variedade de faltas em um SEP de 230 kV/60 Hz modelado no RTDSTM. Conforme ilustrado na Figura 5, o SEP modelado consiste de uma linha com comprimento $L = 200$ km que interliga duas barras denominadas de i e j , nas quais se encontram conectados dois circuitos equivalentes de Thévenin que representam os SEP conectados às barras. Na Tabela 1, apresentam-se os parâmetros do SEP modelado e, na Tabela 2, listam-se as características das faltas simuladas. No total, 5950 simulações foram realizadas, nas quais foram considerados atrasos do sistema de comunicação com baixa e alta variabilidade.

Cabe ressaltar que o foco deste trabalho não é a avaliação do método de detecção de transitórios, mas sim, da formulação do algoritmo de localização de faltas descrito na seção anterior. Por isso, os transformadores de potencial capacitivos (TPC) e os transformadores de corrente (TC) foram intencionalmente modelados como ideais, evitando a sua influência no processo de estimação do instante de incidência das OV nos terminais da LT. Além disso, muito embora os localizadores de faltas baseados na teoria das OV tipicamente apresentem taxas de amostragem da ordem de MHz [2], o algoritmo proposto foi implementado para operar a uma frequência de amostragem f_s de 20 kHz, pois o passo de integração mínimo do RTDSTM é igual a 50 μs . Por isso, foram implementados também filtros anti-aliasing de 2ª ordem do tipo Butterworth com frequência de corte f_c igual a 7 kHz, a qual é um pouco menor que a frequência máxima $f_s/2$ determinada pelo teorema de Nyquist [1]. Em todas as simulações, considerou-se uma velocidade de propagação das OV igual a $v_p = 1/\sqrt{LC} \approx 287156$ km/s ($\approx 96\%$ da velocidade da luz c para a linha modelada), onde L e C são a indutância série e a capacitância em derivação

da LT por unidade de comprimento, respectivamente.

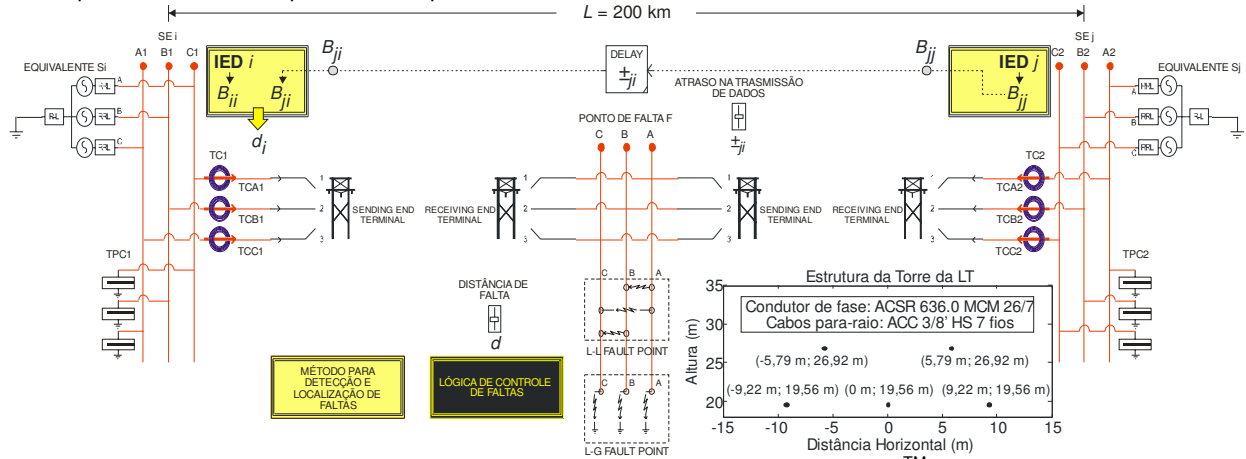


FIGURA 5 – SEP teste de 230 kV modelado no RTDSTM.

Tabela 1 – Parâmetros do SEP teste de 230 kV.

Parâmetros elétricos da LT			
Dados	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ωC (μmho/km)
Seq. Positiva	0,098	0,530	3,252
Seq. Zero	0,522	1,432	2,293
Parâmetros dos circuitos equivalentes de Thévenin			
Fonte	V _{th} (p.u.)	Z _{th} (Z _{si} e Z _{sj})	
		Seq. Zero (Ω)	Seq. Positiva (Ω)
S _i	1,02/0°	18,78/86,91°	25,67/89,81°
S _j	0,98/-10°	20,87/86,90°	28,53/88,06°

Tabela 2 – Variáveis utilizadas na simulação das faltas.

Variáveis de simulação	Valores escolhidos
Localização da falta (% de L)	10, 15, 20, ..., 80, 85 e 90
Resistência de falta (Ω)	0,01, 5, 10, 50 e 100
Ângulo de incidência da falta* (°)	0, 30, 60, 90, 120, 150 e 180
Tipo de falta	AT-BT-CT-AB-BC-CA-ABT-BCT-CAT-ABC

*A tensão da fase A no ponto de falta é tomado como referência.

4.1 Avaliação de Atrasos do Sistema de Comunicação com Baixa Variabilidade

Nesta etapa da avaliação, foram analisados casos de faltas no SEP modelado considerando atrasos do sistema de comunicação com variabilidade desprezível, ou seja, atrasos determinísticos. Após cada simulação, os erros percentuais das localizações estimadas do ponto de falta foram calculados usando $\epsilon = (|d - d_i|/L) \cdot 100$. Os valores obtidos de ϵ são apresentados em forma de boxplots, que consistem em um tipo de gráfico que permite a representação da distribuição de um conjunto de dados em formato visual por meio de cinco índices: o valor máximo, representado pela cauda superior; o quartil superior, representado pelo limite superior da caixa; a mediana, representada pela linha intermediária da caixa; o quartil inferior, representado pelo limite inferior da caixa; e o valor mínimo, representado pela cauda inferior. O quartil superior, a mediana e o quartil inferior representam, respectivamente, o erro máximo verificado em 75%, 50% e 25% dos casos analisados. Em cada gráfico, apresenta-se também o erro máximo esperado ϵ_{esp} , cujo valor depende da taxa de amostragem utilizada pelos IED. Conforme descrito em [9], $\epsilon_{esp} = 0,5\Delta t \cdot c$, de forma que, aumentando-se f_s , diminui-se Δt , resultando, em alguns casos, em valores de ϵ_{esp} da ordem de algumas centenas de metros [1]. Desta forma, pode-se dizer que ao utilizar frequências de amostragem mais baixas, os erros aumentam, o que não indica perda de confiabilidade dos métodos, desde que existam meios de detectar de forma precisa o instante inicial dos transitórios nos registros tomados dos terminais monitorados da LT. Neste trabalho, para as simulações realizadas no RTDSTM, utilizou-se $\Delta t = 50 \mu s$ (menor valor disponível no simulador), resultando em $\epsilon_{esp} = 7,5 \text{ km}$.

Para melhor evidenciar a influência dos erros de sincronismo nos métodos de dois terminais baseados na teoria das OV, o desempenho do algoritmo proposto foi comparado com o de uma técnica clássica reportada em [1], considerando casos dos IED i e j sincronizados e não sincronizados com erros de sincronismo de 0,926 ms ($\approx 20^\circ$). Em ambos os cenários, considerou-se $\delta_{ji} = 1 \text{ ms}$, valor este com ordem de grandeza semelhante a valores típicos para LT com mais de 100 km de extensão [7]. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.

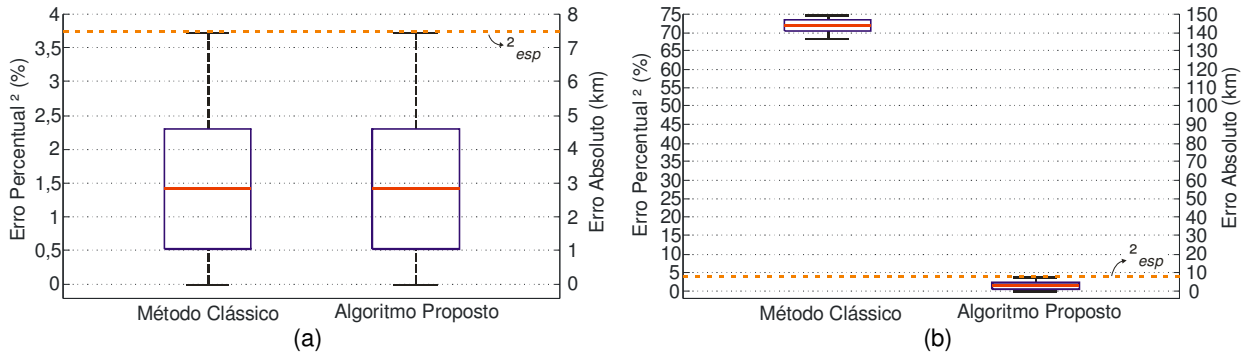


FIGURA 6 – Desempenhos do método clássico e do algoritmo proposto quando utilizados dados: (a) Sincronizados; (b) Não sincronizados com erro de sincronismo de 0,926 ms ($\approx 20^\circ$).

Percebe-se que o desempenho do algoritmo proposto é idêntico ao do método clássico quando utilizados dados sincronizados. Nesse cenário, os erros para ambos os métodos foram menores que ϵ_{esp} , não excedendo 3,72% (7,44 km) e sendo inferiores a 2,31% (4,62 km) em 75% dos casos simulados. Por outro lado, para o caso de dados não sincronizados, observa-se que o método clássico diverge completamente, atingindo erros da ordem de 75% (≈ 150 km), enquanto que o algoritmo proposto mantém o mesmo desempenho verificado no caso anterior.

4.2 Avaliação de Atrasos do Sistema de Comunicação com Alta Variabilidade

Nesta etapa da avaliação foram analisados os mesmos casos de faltas simulados anteriormente, porém, considerando atrasos do sistema de comunicação com alta variabilidade. Para tanto, atrasos com valores de $\delta_{ji} - \Delta t$, δ_{ji} e $\delta_{ji} + \Delta t$ foram escolhidos aleatoriamente segundo uma distribuição de probabilidade uniforme. Em cada simulação, o campo de busca da falta foi calculado considerando-se um atraso médio $\mu_{\delta_{ji}}$ de 1 ms, assumindo que este valor foi calculado a partir de um conjunto de experimentos, cada um com 20 medições do atraso ($n = 20$). O desvio padrão $\sigma_{\delta_{ji}}$ foi extrapolado para $2\Delta t = 100 \mu s$, resultando em campos de busca com extensão de aproximadamente 16 km. Para ilustrar essa aplicação, apresenta-se na Figura 7 o intervalo de confiança estimado para um conjunto de faltas AT simuladas ao longo da LT modelada no RTDSTM.

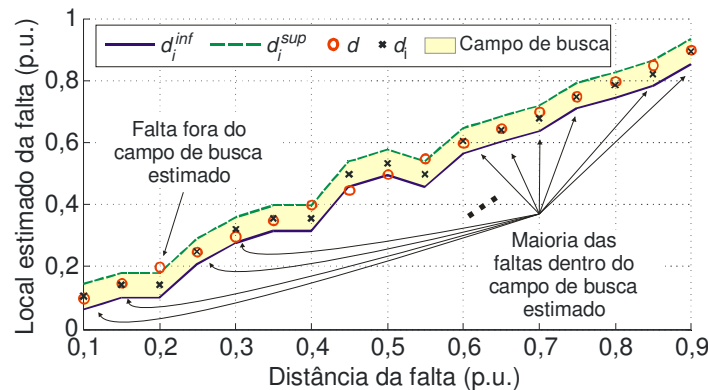


FIGURA 7 – Campo de busca estimado pelo método proposto considerando valores de δ_{ji} com alta variabilidade.

Do exposto na seção anterior, verificou-se que as estimativas d_i apresentam erros que crescem proporcionalmente com os desvios nos valores estimados do atraso na transmissão de dados. Entretanto, da Figura 7, percebe-se que, utilizando o método proposto, na maioria dos casos, as faltas simuladas se encontram dentro do campo de busca estimado, mesmo com variações desconhecidas nos valores de δ_{ji} . Obviamente, em alguns casos, as faltas estarão fora do campo de busca calculado, principalmente devido às incertezas sobre a precisão dos valores adotados para a velocidade de propagação v_p das OV e da precisão do método de detecção de transitórios, a qual dependerá da taxa de amostragem utilizada. Todavia, na maioria dos casos, o algoritmo identifica apropriadamente a região na LT onde a falta se encontra.

Para destacar a utilidade do método proposto e para abordar a influência de imprecisões nos valores de v_p , os cenários de falta foram novamente avaliados, porém, considerando velocidades de propagação iguais a $v_p = 1/\sqrt{LC}$ (como utilizado na análise anterior), 97%, 98%, 99% e 100% da velocidade da luz c . Na Tabela 3, apresenta-se, em porcentagem (dentre as 5950 simulações realizadas), para cada valor de v_p considerado, o número de faltas simuladas localizadas dentro do campo de busca estimado através da formulação proposta para o caso de atrasos na transmissão de dados com alta variabilidade.

Tabela 3 – Número de casos nos quais a falta se encontra dentro do campo de busca estimado.

Velocidade de propagação v_p considerada	Número de faltas dentro do campo de busca $[d_i^{inf}; d_i^{sup}]$
$1/\sqrt{LC}$	82,61%
$0,97c$	82,61%
$0,98c$	79,65%
$0,99c$	76,66%
c	76,66%

Dos resultados apresentados, percebe-se que o melhor desempenho foi obtido para v_p igual a $1/\sqrt{LC}$ e $0,97c$, o que era esperado, visto que $0,97c$ é o valor que mais se aproxima da velocidade calculada usando os dados da LT, ou seja, $1/\sqrt{LC} \approx 0,96c$. Nestes casos, 82,61% das faltas simuladas esteve dentro do campo de busca estimado, o que pode ser considerado como bastante satisfatório devido à adversidade dos casos simulados do ponto de vista dos desvios no atraso da transmissão de dados. Para as outras aproximações da velocidade de propagação, tal como v_p igual a $0,98c$, $0,99c$ e c , os resultados foram um pouco piores, de forma que 79,65%, 76,66% e 76,66% das faltas estiveram dentro do campo de busca calculado, respectivamente. Ainda assim, esses resultados também podem ser considerados satisfatórios, visto que na maioria das simulações o intervalo de confiança estimado indicou corretamente a área da LT na qual a falta foi aplicada. Além disso, da literatura, sabe-se que $v_p = 1/\sqrt{LC}$ é uma das aproximações mais adequadas para algoritmos baseados na teoria das OV [5], sendo uma das mais utilizadas em dispositivos reais. Por fim, deve-se destacar que, usando canais e dispositivos dedicados com frequências de amostragem elevadas, a precisão dos campos de busca pode melhorar consideravelmente. De fato, procedendo desta forma, reduz-se significativamente a variabilidade do atraso do canal, facilitando a estimação de δ_{ji} e, conseqüentemente, melhorando o desempenho do algoritmo.

5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentou-se um algoritmo de dois terminais baseado na teoria das OV capaz de localizar faltas em tempo real utilizando dados não sincronizados. Como requisito básico para a aplicação do algoritmo, destaca-se a necessidade de um sistema de comunicação para o intercâmbio de informações entre os terminais da linha com atraso passível de estimação na mesma resolução, no tempo, do período de amostragem dos localizadores de faltas. As etapas do desenvolvimento do algoritmo foram descritas, sendo, na sequência, avaliadas por meio de simulações em tempo real de curtos-circuitos em um sistema de 230 kV modelado no RTDSTM. Em cada simulação, foram considerados atrasos do sistema de comunicação com baixa e alta variabilidade.

Dos resultados obtidos, concluiu-se que o algoritmo proposto apresenta desempenhos idênticos para o caso de dados sincronizados e não sincronizados quando considerado um atraso com baixa variabilidade (determinístico). Dos resultados obtidos nos casos de atrasos com alta variabilidade, comprovou-se a confiabilidade do algoritmo proposto, visto que em mais de 82% dos 5950 das simulações realizadas as faltas estavam dentro do campo de busca estimado. Como desafio futuro, pretende-se estender o algoritmo proposto para linhas de três terminais, viabilizando a localização de faltas mesmo em sistemas desprovidos de uma referência de tempo comum.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. *Fault Location on Power Networks*. London: Ed. Springer, 2010. (Power Systems). ISBN 978-1-84882-885-8.
- [2] ZIMATH, S. L.; RAMOS, M. A. F.; FILHO, J. E. S. "Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults," IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010.
- [3] SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M., "Speed of line protection - can we break free of phasor limitations?," Western Protective Relay Conference, oct. 2014.
- [4] IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E.; BALCEREK, P.; FULCZYK, M.; SAHA, M., "Accurate noniterative fault location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements," IEEE Trans. on Power Delivery, v.25, p.72–80, 2010.
- [5] LOPES, F. V.; FERNANDES Jr., D.; NEVES, W. L. A., "A traveling-wave detection method based on Park's transformation for fault locators," IEEE Trans. on Power Delivery, v. 28, n. 3, p. 1626–1634, 2013.
- [6] NGUYEN, C.; FLUECK, A., "Modeling of communication latency in smart grid," IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011.
- [7] FERRER, H.; SCHWEITZER, E., *Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2010.
- [8] LILJA, D. J., *Measuring Computer Performance: A Practitioner's Guide*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2000.
- [9] LOPES, F. V.; FERNANDES Jr., D.; NEVES, W. L. A. "Fault location on transmission lines based on travelling waves," International Conference on Power Systems Transients, Delft, Netherlands, June 2011.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Felipe V. Lopes nasceu em Campina Grande, 1985. Recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc. e D.Sc. no domínio da Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em 2009, 2011 e 2014, respectivamente. Atualmente é Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB). Tem maior interesse em transitórios eletromagnéticos, proteção de sistemas elétricos e simulações em tempo real.



Kleber M. Silva nasceu em João Pessoa, 1980. Recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc. e D.Sc. no domínio da Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em 2004, 2005 e 2009, respectivamente. Em 2007, foi professor Visitante da Universidade Federal da Paraíba (UEPB). De 2008 a 2009 foi professor efetivo do Instituto Federal da Paraíba (IFPB). Em 2009, esteve em cooperação técnica com o Instituto Federal de Brasília (IFB). Atualmente é Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB). Tem atuado nas áreas de proteção de sistemas elétricos de potência e transitórios eletromagnéticos.



Bernard F. Küsel nasceu em Brasília, 1989. Recebeu o título de B.Sc. e M.Sc. no domínio de Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (UnB) em 2011 e 2014, respectivamente. Atualmente, atua como Engenheiro no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), é membro do Grupo de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência (GPSE) na UnB e presta consultoria em estudos elétricos. Tem maior interesse em proteção de sistemas elétricos, transitórios eletromagnéticos e operação do sistema elétrico.