

Practical Use of Class M PMU Data for Automatic Fault Location in Power Transmission Lines

E. L. de Almeida¹, F. O. Passos², M. J. Ramos¹, M. V. da Costa¹.

Abstract-- This research aims to utilize data from class M Phasor Measurement Units (PMUs) to locate faults in transmission lines automatically. The goal is to showcase the potential of these devices, which are currently not fully utilized by electricity companies, and to streamline the fault location process, thereby reducing response times to incidents on transmission lines. This application involves automatic analysis and identification of the timing and type of fault, as well as fault location using the Takagi, Modified Takagi, and Tziouvaras methods. Additionally, it includes a web interface for viewing the results.

Index Terms-- Automatic Disturbance Analysis, Fault location, Phasor measurement units, Power Transmission Lines, Protective relaying

I. INTRODUÇÃO

As Phasor Measurement Units (PMUs) desempenham um papel crucial no monitoramento e controle do Sistema Interligado Nacional (SIN), fornecendo medições precisas de grandezas elétricas, como tensão, corrente, potência e frequência, com capacidade de apresentar essas medições em diferentes formatos, como grandezas de fase ou de sequência, tanto na forma fasorial ou ao longo do tempo.

Desde 2005, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) exige a instalação de equipamentos registradores de perturbação (RDPs) de longa duração com PMUs de Classe M integradas, impulsionando significativamente sua adoção pelo SIN [1]. Isso tem levado a um aumento notável no número de PMUs instaladas em todo o país. Em 2021, a rede de PMUs brasileira era composta por 156 unidades de medição [2].

As PMUs não apenas fornecem dados precisos em tempo real para monitorar e controlar o sistema elétrico, como também desempenham um papel fundamental na melhoria da eficiência operacional, identificando áreas de sobrecarga, otimizando o fluxo de energia e facilitando a integração de energias renováveis [3]. Essa capacidade de análise em tempo real permite uma rápida resposta a eventos imprevistos, minimiza o risco de falhas, aumenta a confiabilidade e agiliza a recomposição do sistema elétrico.

Embora as empresas de transmissão sejam responsáveis pela

instalação e manutenção das PMUs, os dados coletados são encaminhados diretamente para o ONS, que os utiliza para tomada de decisões estratégicas, estudos de planejamento, análises de perturbações e outras atividades operacionais [4]. Ainda que a tecnologia PMU seja amplamente utilizada e cada vez mais aprofundada, nota-se que há um potencial ainda não explorado pelas transmissoras.

Uma das possíveis aplicações das PMUs, abordada neste trabalho, consiste na localização automática de faltas em Linhas de Transmissão (LTs) de dois terminais. A rápida identificação do ponto de falta é um requisito para garantir a agilidade no restabelecimento, contribuindo para aumentar a segurança sistêmica e reduzir os custos de Operação e Manutenção.

Atualmente, o processo de localização de faltas na ISA CTEEP é realizado de forma manual. Isto é, um engenheiro coleta e sincroniza as oscilografias de ambos os terminais da LT, compila as informações referentes ao curto-circuito e obtém a localização da falta utilizando algoritmos específicos [2], [6]-[10] para este fim. Embora haja um sistema para coleta das oscilografias dos relés de proteção e RDPs, em alguns casos pode ser necessário intervir em campo, retardando ainda mais o retorno para o Centro de Operações da transmissora (COT).

Assim, com o intuito de explorar novas possibilidades para a utilização dos dados de PMUs e permitir a localização de faltas no menor tempo possível, de forma sistêmica e em larga escala, este trabalho apresenta um sistema automático de localização de faltas através do monitoramento das PMUs instaladas em uma ou nas duas extremidades da LT. Além de ser um passo inovador para as transmissoras, a presença de PMUs já instaladas no sistema elétrico facilita o avanço em técnicas sem necessidade de grandes investimentos financeiros.

Ao longo do trabalho será apresentada a metodologia utilizada para o tratamento dos dados, a automatização da localização de faltas através de métodos existentes na literatura técnica [6]-[10], destacando-se os métodos Takagi original, Takagi Modificado [9] e Tziouvaras [10], além da comparação com o real local do defeito. Vale ressaltar que não é o foco deste trabalho comparar os algoritmos de localização, os quais já são bastante consolidados [2][5].

1 – E. L. de Almeida, M. J. Ramos, M. V. da Costa estão com a Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (ISA CTEEP), Av. das Nações Unidas, 14171, 04794-000, Jundiaí - SP, Brasil (e-mail: elalmeida@sactcep.com.br).

2 – F. O. Passos está com a Universidade Federal de Itajubá (UNIFED), Av. B P S, 1303, 37500-903, Itajubá - MG, Brasil (e-mail: fredericopassos@unifei.edu.br).

II. METODOLOGIA PARA A LOCALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE FALTAS

A localização automática de faltas abordada neste artigo está baseada na implementação de um programa computacional desenvolvido na linguagem Python, que utiliza como ponto de partida a leitura dos sinais de corrente e tensão fornecidos em grandezas de fase das PMUs disponíveis nas diversas LTs monitoradas pela empresa de transmissão de energia elétrica, respeitando as etapas descritas a seguir:

A. Preparação dos dados para localização das faltas

Para iniciar as localizações de faltas são aplicadas as seguintes etapas no programa:

- Detecção do evento (Identificação da LT e respectivas PMUs).
- Transformação das grandezas de fase para grandezas de sequência (positiva, negativa e zero).
- Identificação automática do momento da falta.
- Identificação automática da(s) fase(s) defeituosa(s).
- Seleção de sinais de pré-falta (método Takagi).
- Aplicação dos métodos de localização de falta escolhidos para este trabalho.
- Exportação dos dados e resultados para um sistema com interface gráfica e acesso via *web*.

Para a identificação automática do momento do defeito, o programa compara os sinais de tensão da LT iterativamente, sinalizando o horário que houve uma variação negativa em qualquer uma das três fases A, B e C, maior que 5%, sugerindo ocorrência de uma perturbação no sistema elétrico. Com isso, o programa indica qual ou quais fases houve variação bem como o *loop* de falta aquele evento se enquadra. Durante a pesquisa, observou-se que devido à taxa de amostragem das PMUs, a influência do curto-circuito nos dados de pré-falta era significativa, por isso, buscando representar o mais próximo possível da pré-falta sem a influência da corrente de falta, foi considerado a média aritmética das últimas 10 amostras anteriores ao momento identificado da falta. Destaca-se que um dos métodos de localização de defeito escolhidos e que serão apresentados na sequência, utiliza as informações do momento anterior à falta, justificando tal necessidade.

A exportação dos dados já tratados e calculados para uma planilha, além de possibilitar para o usuário ter as informações de modo textual e poder trabalhá-las para outros fins, serviu como base para todas as verificações necessárias no decorrer do desenvolvimento do programa. Adicionalmente, essa planilha exportada contém apenas uma pequena janela de tempo com os dados de pré-falta, falta e pós falta, apresentando o recorte necessário para a análise da ocorrência. Esse mesmo recorte é utilizado como dado de entrada para o algoritmo de localização de defeito por 2 terminais. Por fim, a exportação para um aplicativo *web* apresenta uma interface amigável e intuitiva para o usuário, permitindo com pouca ambientação entender o que o programa informa de maneira ágil.

B. Algoritmos de localização de defeito utilizados

Algoritmos de localização de falta são fundamentais na manutenção e operação seguras das LTs. Eles são projetados para analisar dados de tensão e corrente, identificando anomalias que podem indicar a ocorrência de uma falha. Diversos métodos foram desenvolvidos para essa finalidade, desde abordagens mais simples baseadas em medidas de impedância até técnicas mais avançadas que utilizam modelos matemáticos sofisticados.

Uma dessas técnicas avançadas é o método de Takagi modificado (TKG MOD 3I0) [5]. Derivado do método original de Takagi, emprega modelos matemáticos complexos para analisar as características das ondas de tensão e corrente ao longo da LT considerando a não homogeneidade do sistema e substituindo a variação da corrente pela corrente residual de modo a evitar a corrente de pré-falta para curtos monofásicos, conforme (1).

$$m = \frac{\text{imag}(V_G \times 3I_{G_0}^{f*})}{\text{imag}(Z_{1L} \times I_G \times 3I_{G_0}^{f*})} \quad (1)$$

Onde:

m = local da falta [pu]

V_G = tensão no terminal G [V]

Z_{1L} = impedância de sequência positiva da linha [Ω]

I_G = corrente no terminal G [A]

$3I_{G_0}^{f*}$ = conjugado da corrente de sequência zero no terminal G [A]

Existe ainda uma variação desse método que utiliza ao invés da corrente residual a corrente de sequência negativa (TKG MOD I2) apresentado em (2).

$$m = \frac{\text{imag}(V_G \times I_{2G}^{f*})}{\text{imag}(Z_{1L} \times I_G \times I_{2G}^{f*})} \quad (2)$$

Onde:

I_{2G}^{f*} = conjugado da corrente de sequência negativa no terminal G [A]

A Tabela I indica a definição das grandezas de fase a serem utilizadas em V_G e I_G , de acordo com o tipo de falta.

TABELA I
DEFINIÇÃO DE V_G E I_G PARA DIFERENTES TIPOS DE FALTAS

Tipo da Falta	V_G	I_G
A-G	$V_{G_a}^f$	$I_{G_a}^f + kI_{G_0}^f$
B-G	$V_{G_b}^f$	$I_{G_b}^f + kI_{G_0}^f$
C-G	$V_{G_c}^f$	$I_{G_c}^f + kI_{G_0}^f$
AB, AB-G, ABC	$V_{G_a}^f - V_{G_b}^f$	$I_{G_a}^f - I_{G_b}^f$
BC, BC-G, ABC	$V_{G_b}^f - V_{G_c}^f$	$I_{G_b}^f - I_{G_c}^f$
CA, CA-G, ABC	$V_{G_c}^f - V_{G_a}^f$	$I_{G_c}^f - I_{G_a}^f$

O termo k significa o fator de compensação de sequência zero da LT e é representado por (3):

$$k = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{Z_{1L}} \quad (3)$$

Onde:

Z_{0L} = impedância de sequência zero da LT [Ω]

O método original de Takagi é uma técnica estabelecida para a localização de faltas em LTs. Assim como o método avançado, ambos trabalham com os dados de um único terminal. Este método analisa de maneira incremental as diferenças entre as condições de pré-falta e falta. Ele utiliza as ondas de tensão e corrente medidas da LT antes e depois da ocorrência de uma falha. Ao comparar essas formas de onda e calcular as diferenças entre elas, o método de Takagi (TKG) em (4) proporciona uma estimativa precisa da distância até o ponto da falha. Embora menos complexo que o método modificado, o método original de Takagi tem demonstrado sua eficácia em muitas situações, oferecendo uma abordagem relativamente direta e robusta para a localização de faltas em LTs [9].

$$m = \frac{\text{imag}(V_G \times \Delta I_G^*)}{\text{imag}(Z_1 \times I_G \times \Delta I_G^*)} \quad (4)$$

Onde:

ΔI_G^* = conjugado da corrente de falta no terminal G [A]

A definição das grandezas de fase a serem utilizadas em ΔI_G^* , é dada conforme a Tabela II e representa a corrente de falta pura, sem a corrente de carregamento.

TABELA II
DEFINIÇÃO DE ΔI_G PARA DIFERENTES TIPOS DE FALTAS

Tipo da Falta	ΔI_G
A-G	$I_{G_a}^f - I_{G_a}$
B-G	$I_{G_b}^f - I_{G_b}$
C-G	$I_{G_c}^f - I_{G_c}$
AB, AB-G, ABC	$(I_{G_a}^f - I_{G_a}) - (I_{G_b}^f - I_{G_b})$
BC, BC-G, ABC	$(I_{G_b}^f - I_{G_b}) - (I_{G_c}^f - I_{G_c})$
CA, CA-G, ABC	$(I_{G_c}^f - I_{G_c}) - (I_{G_a}^f - I_{G_a})$

Diferente dos métodos anteriores, o método de Tziouvaras [10] apresenta um algoritmo de localização de faltas de dois terminais que utiliza sinais de tensão e corrente de sequência negativa de ambas as extremidades da LT, bem como os dados da própria LT. De posse dessas informações, ele calcula em (5) a impedância aparente da linha com as medições sincronizadas, permitindo a identificação precisa do ponto de falta.

$$|I_{2H}| = \frac{|(I_{2G} \times Z_{2G}) + m \times (I_{2G} \times Z_{2L})|}{|(Z_{2H} \times Z_{2L}) - m \times (Z_{2L})|} \quad (5)$$

Onde:

I_{2H} = corrente de sequência negativa no terminal H [A]

I_{2G} = corrente de sequência negativa no terminal G [A]

Z_{2G} = impedância de sequência negativa da fonte no terminal G [Ω]

Z_{2H} = impedância de sequência negativa da fonte no terminal H [Ω]

Z_{2L} = impedância de sequência negativa da linha [Ω]

Ao trabalhar matematicamente (5), obtém-se uma equação de segundo grau, onde a raiz encontrada com valor entre 0 e 1 indica (em pu) o local da falta a partir do Terminal G.

Os métodos de localização abordados são amplamente reconhecidos como alguns dos principais, devido à sua eficácia comprovada e abordagens distintas. Como demonstrado sucintamente, cada um utiliza técnicas matemáticas e algoritmos específicos para analisar os sinais de corrente e tensão ao longo da LT e determinar a localização exata de faltas. Sua importância reside na capacidade de oferecer respostas rápidas e exatas em situações críticas, garantindo a operação segura e confiável dos sistemas elétricos de potência, além de minimizar interrupções no fornecimento de energia e reduzir os custos associados à manutenção e reparo das LTs.

C. Características de relés de proteção e PMUs

A aquisição de dados em relés de proteção e PMUs desempenha um papel fundamental na monitorização e análise do sistema elétrico. Os relés de proteção capturam dados instantâneos de tensão e corrente em resposta a eventos de falta ou outras condições anormais, operando com frequências de amostragem que variam de algumas centenas a alguns milhares de vezes por segundo. Por outro lado, as PMUs, com suas altas taxas de amostragem, fornecem medições detalhadas em tempo real da magnitude e fase das grandezas elétricas, operando com frequências de amostragem que podem chegar a várias milhares de vezes por segundo. As PMUs são essenciais para o monitoramento em tempo real da estabilidade do sistema elétrico e a análise de eventos transitórios.

A norma C37.118/2011 estabelece duas classes de desempenho para as PMUs: proteção (tipo P) e medição (tipo M). A classe P é projetada para aplicações que exigem menor latência, como proteção e controle, e possui requisitos mais flexíveis em relação ao erro de medição. Em contraste, a classe M é destinada a aplicações que requerem maior precisão de medição, permitindo uma latência maior [11]. Vale ressaltar que o Submódulo 2.13 dos Procedimentos de Rede [12] do ONS determina que sejam utilizadas PMUs de Classe M, com uma taxa de amostragem de 60 amostras por segundo, equivalente a uma amostra por ciclo.

III. ESTUDOS DE CASO

Este trabalho utiliza informações de registros reais de eventos de defeitos em LTs de 440kV e 525kV, obtidos por PMUs e relés de proteção. A primeira ação (etapa) foi selecionar as faltas nas LTs monitoradas (11 no total) que estivessem na janela da capacidade de armazenamento do servidor (3 meses). Os principais eventos foram identificados e

serão abordados com maior detalhamento na sequência. A análise entre os métodos de localização será realizada, evidenciando a exatidão e o desempenho de cada método com base nos dados coletados.

A. Evento 1 – Falta Loop CG à 37,3 km do Terminal G

A Tabela III apresenta as características da LT deste primeiro evento. Trata-se de uma LT em circuito simples, a qual não possui circuitos paralelos, portanto, sem influência de impedância mútua de sequência zero.

TABELA III
 CARACTERÍSTICAS DA LT DO EVENTO I

Tensão (kV)	Distância (km)	Z1 (Ω)	Local do Defeito (km)
440	142,1	3,760 + j47,887	37,3 do Terminal G

A perturbação em questão consistiu no desligamento automático da LT 440kV devido à ocorrência de um curto-circuito monofásico envolvendo a fase vermelha “C”. A falta foi eliminada em 57ms em um terminal e 66ms no outro. Em inspeção realizada, foi identificado “que houve aproximação da fase C à torre (37,3 km do Terminal G) por força do vento”.

A Tabela IV apresenta os erros percentuais calculados para os diferentes métodos de localização de faltas, utilizando tanto os dados com base nos dados advindos das PMUs quanto os dados obtidos dos relés de proteção. Inicialmente, observa-se que os métodos de 1 terminal (TKG, TKG MOD 3I0, TKG MOD I2) apresentaram menor exatidão, o que justifica o esforço empregado na aplicação do método de 2 terminais (TZIOUVARAS) e a contribuição deste trabalho ao buscar a automatização dessa aplicação, visando fornecer informações mais rápidas e precisas para o COT.

Além disso, nota-se a eficácia do sistema desenvolvido ao compilar as informações referentes ao curto-circuito, tendo em vista que a localização obtida através dos dados compilados de forma automática é muito próxima à obtida por um engenheiro a partir da análise das oscilografias dos relés de proteção.

Outra observação importante é a respeito dos rápidos tempos de eliminação do defeito, que ocorrem exatamente em 4 ciclos em um sistema de 60Hz. Mesmo com esse curto período, a característica das PMUs de realizar 1 amostragem por ciclo proporciona exatamente 4 oportunidades para a estimativa da distância da falta. É notável que, mesmo com esse número limitado de amostras, as PMUs performaram bem, entregando resultados com boa exatidão. Ressalta-se também a importância da correta escolha do instante de pré-falta, pois essa escolha pode influenciar diretamente o resultado da localização da falta, dependendo do método utilizado.

A Fig. 1 apresenta o dado de saída do programa em aplicativo web, indicando na linha do tempo sinais de tensão por fase no primeiro quadrante, corrente por fase no segundo quadrante e o local da falta no terceiro e último quadrante. Com isso, é possível acompanhar a trajetória da localização da falta para os sinais amostrados no tempo.

TABELA IV
 CÁLCULOS DE LOCALIZAÇÃO DO DEFEITO NO EVENTO 1

Fonte	Método	Cálculo (km)	Real (km)	Erro (%)
P M U	TKG (1T)	33,16		-11,09
	TKG MOD 3I0 (1T)	32,18		-13,73
	TKG MOD I2 (1T)	33,16	37,3	-11,10
	Média			-11,97
R e l é	TZIOUVARAS (2T)	36,63		-1,81
	TKG (1T)	34,98		-6,22
	TKG MOD 3I0 (1T)	34,94		-6,33
	TKG MOD I2 (1T)	33,13	37,3	-11,18
	Média			-7,91
	TZIOUVARAS (2T)	36,57		-1,96

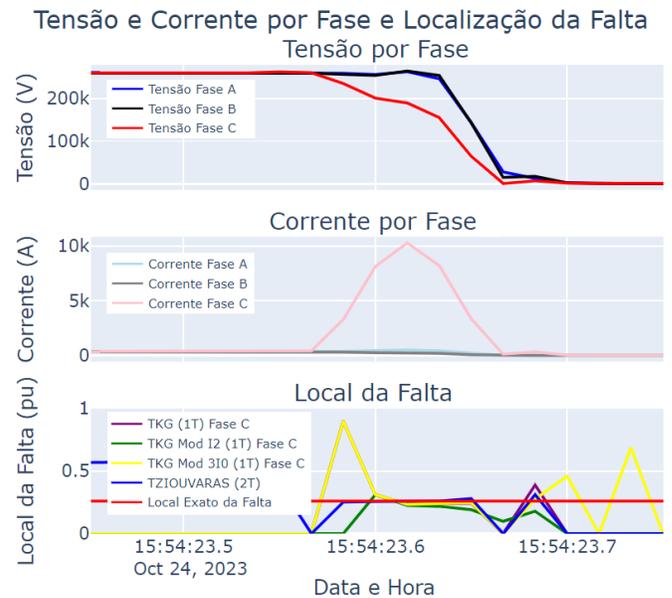


Fig. 1. Interface gráfica para exibição dos resultados no aplicativo web (superior) Tensão, (meio) Corrente e (inferior) Local da Falta no Terminal G

B. Evento 2 – Falta Loop BC à 47,07 km do Terminal G

A Tabela V apresenta as características da LT deste segundo evento. Trata-se de uma LT de 525kV com circuito duplo, existindo influência de impedância mútua de sequência zero.

TABELA V
 CARACTERÍSTICAS DA LT DO EVENTO 2

Tensão (kV)	Distância (km)	Z1 (Ω)	Local do Defeito (km)
525	172,9	2,939 + j50,314	47,07 do Terminal G

A perturbação em foco consistiu no desligamento automático da LT 525kV C2, devido à ocorrência de um curto-circuito bifásico envolvendo as fases branca “B” e vermelha “C”. A falta foi eliminada em 50ms em um terminal e 62ms no outro. Em inspeção realizada, constatou-se “que foram encontradas evidências de curto-circuito bifásico no vão da

torre (47,07 km do Terminal G)”.
 Na Tabela VI, em primeiro lugar nota-se que, os métodos de localização de 1 terminal TKG e TKG MOD 310 apresentaram menor exatidão, enquanto TKG MOD I2 indicou falta fora da LT no sistema de localização automática, além de apresentar grande variação na indicação do ponto da falta com os dados do relé de proteção. Já o método de localização por 2 terminais se manteve com resultados comparáveis tanto pelo modo de localização automática quanto para a localização manual.

TABELA VI
CÁLCULOS DE LOCALIZAÇÃO DO DEFEITO NO EVENTO 2

Fonte	Método	Cálculo (km)	Real (km)	Erro (%)
P M U	TKG (1T)	43,65		-7,27
	TKG MOD 310 (1T)	43,88		-6,78
	TKG MOD I2 (1T)	Fora da LT	47,07	N/A
	Média			-7,02
	TZIOUVARAS (2T)	47,36		0,62
R e l é	TKG (1T)	47,39		0,68
	TKG MOD 310 (1T)	47,17		0,21
	TKG MOD I2 (1T)	97,57	47,07	107,29
	Média			36,06
	TZIOUVARAS (2T)	46,69		-0,81

A Fig. 2 apresenta a saída do programa no aplicativo *web*.

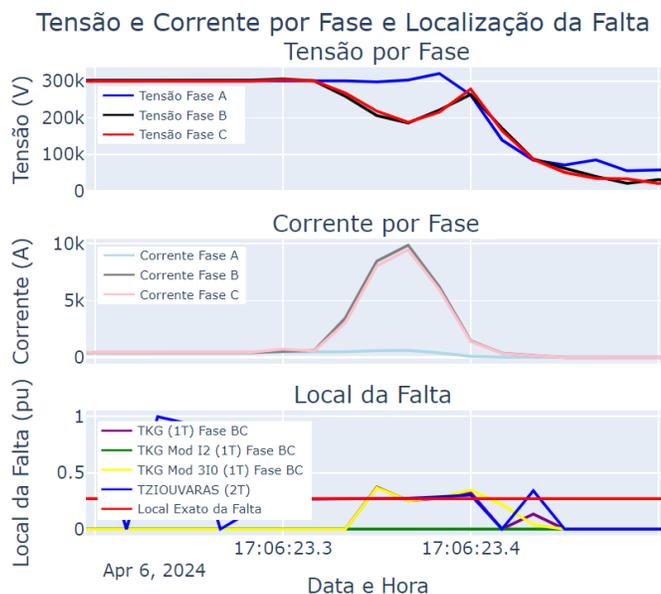


Fig. 2. Interface gráfica para exibição dos resultados no aplicativo *web* (superior) Tensão, (meio) Corrente e (inferior) Local da Falta no Terminal G

C. Evento 3 – Falta Loop BC à 26,5 km do Terminal G

A Tabela VII apresenta as características da LT deste terceiro evento. Trata-se da mesma LT do Evento 2, no entanto, dessa vez no circuito paralelo.

TABELA VII
CARACTERÍSTICAS DA LT DO EVENTO 3

Tensão (kV)	Distância (km)	Z1 (Ω)	Local do Defeito (km)
525	172,9	2,939 + j50,314	26,5 do Terminal G

A Fig. 3 apresenta a estrutura da LT com os circuitos 1 e 2 em paralelo.



Fig. 3. Característica da LT 525kV com circuito duplo.

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 525kV C1, devido a ocorrência de um curto-circuito bifásico, envolvendo as fases branca “B” e vermelha “C”. A falta foi eliminada em 58ms em um terminal e 60ms no outro. Em inspeção realizada, foram “encontradas evidências de curto-circuito bifásico no vão da torre (26,5 km do Terminal G)”.

Observando a Tabela VIII, o primeiro ponto que chama atenção está no fato de que os métodos de localização por 1 terminal TKG e TKG MOD 310 indicaram o local do defeito com alta exatidão (menor do que 2%) para os dados calculados automaticamente. Com os dados calculados manualmente, essa exatidão não foi seguida, evidenciando novamente neste caso aceitabilidade no método de localização automática. O comportamento observado para o método TKG MOD I2 (1 terminal) manteve a indicação bastante comprometida. Curiosamente, nessa ocorrência, o método de localização por 2 terminais resultou num desempenho mais singelo, e um pouco fora do esperado, indicando erros de -6,87% e 9,96%, respectivamente para localização automática e manual.

TABELA VIII
CÁLCULOS DE LOCALIZAÇÃO DO DEFEITO NO EVENTO 3

Fonte	Método	Cálculo (km)	Real (km)	Erro (%)
P M U	TAKAGI (TKG)	26,19		-1,17
	TKG MOD 310	26,04		-1,74
	TKG MOD I2	37,28	26,5	40,68
	Média			12,59
	TZIOUVARAS	24,68		-6,87
R e l é	TAKAGI (TKG)	24,20		-8,68
	TKG MOD 310	24,33		-8,19
	TKG MOD I2	81,48	26,5	207,47
	Média			63,53
	TZIOUVARAS	29,14		9,96

A Fig. 4 apresenta a saída do programa em aplicativo *web*.

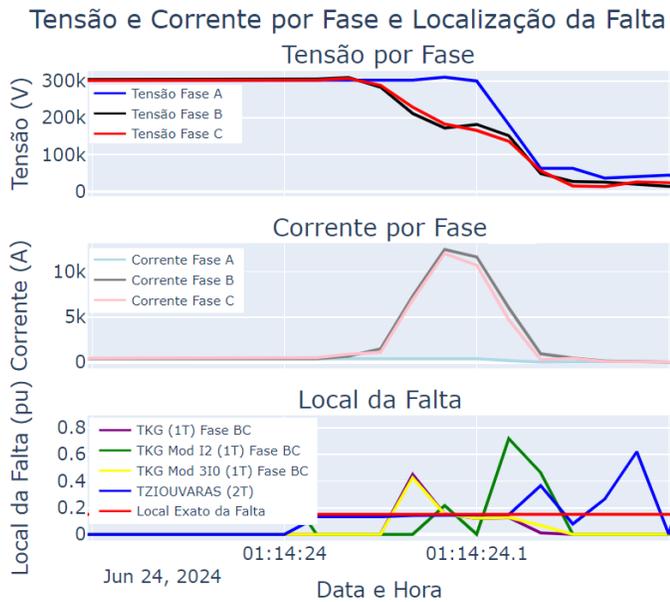


Fig. 4. Interface gráfica para exibição dos resultados no aplicativo *web* (superior) Tensão, (meio) Corrente e (inferior) Local da Falta no Terminal G

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir dos métodos de localização de faltas utilizando as informações compiladas de forma automática através dos dados de PMUs em comparação à utilização das informações compiladas por um engenheiro através de relés de proteção e RDPs foram detalhados nos estudos de caso apresentados. A seguir, são discutidos os principais pontos de cada evento, juntamente com a análise geral do desempenho do sistema desenvolvido.

A. Evento 1 – Falta Loop CG à 37,3 km do Terminal G

Os métodos de localização de falta por 1 terminal (Takagi e Takagi Modificado por Sequência Zero / Sequência Negativa) apresentaram erros esperados, em torno de 10%, enquanto o método de 2 terminais demonstrou maior exatidão, tanto com dados de PMUs, quanto de relés de proteção. Os resultados similares observados nos cálculos de localização utilizando as informações compiladas de forma automática e as informações calculadas pelo engenheiro de análise indicam a viabilidade da utilização das PMUs para habilitar mais uma possibilidade na localização de faltas.

B. Evento 2 – Falta Loop BC à 47,07 km do Terminal G

Neste evento, também foram observados maiores erros nos métodos de localização por 1 terminal, especialmente no método Takagi Modificado por Sequência Negativa. O método de localização por 2 terminais manteve-se com bom desempenho, justificando sua escolha como principal método usado pelos engenheiros de análise da ISA CTEEP e uma das contribuições deste trabalho, ao automatizar a sua aplicação. Novamente, os resultados foram similares considerando as duas fontes de dados.

C. Evento 3 – Falta Loop BC à 26,5 km do Terminal G

Para este evento, os resultados dos métodos de 1 terminal

mostraram bom desempenho nos dados de PMUs, ao contrário dos dados de relés de proteção, que apresentaram maiores erros. Curiosamente, o método de 2 terminais apresentou um desempenho ligeiramente abaixo do esperado, indicando a necessidade de mais estudos para entender as variáveis envolvidas.

D. Visão Sistêmica e Análise Consolidada dos Resultados

Nesta subseção é apresentada uma visão sistêmica e consolidada dos resultados obtidos a partir dos eventos apresentados.

1) Desempenho dos Algoritmos de Localização de Faltas

Os resultados mostram que os algoritmos de localização de faltas tiveram um desempenho satisfatório, indicando pontos de falta próximos à localização real dos defeitos registrados. Dos eventos analisados:

- 2 eventos conseguiram obter resultados corretos com exatidão aceitável.
- 3 algoritmos demonstraram eficácia, com destaque para o método de localização por 2 terminais que apresentou resultados consistentes em todas as situações.

2) Correlação entre Fontes de PMUs e Relés de Proteção

Ao comparar os resultados obtidos de forma automática através dos dados de PMUs com os resultados obtidos por um engenheiro através dos dados de relés de proteção, nota-se que houve uma correlação significativa, indicando a eficácia do aplicativo desenvolvido em tratar os dados, detectar o evento, identificar o momento da falta e as fases envolvidas e aplicar os métodos de localização. Além disso, indica que as PMUs podem ser utilizadas como uma fonte confiável para localização de faltas.

3) Importância da Pré-Falta e Desafios

A análise também destacou a importância de considerar a pré-falta nos cálculos. Devido à taxa de amostragem das PMUs (1 amostra por ciclo):

- As poucas amostras disponíveis são suficientes para uma estimativa precisa, porém, é crucial identificar corretamente o instante de pré-falta para evitar influências negativas da corrente de falta.
- A média aritmética das últimas 10 amostras antes da falta mostrou-se uma abordagem eficaz para representar a condição de pré-falta.

4) Benefícios do Sistema Automatizado de Localização de Faltas

Os resultados obtidos demonstram que a utilização de PMUs em um sistema automatizado de localização de faltas oferece inúmeros benefícios:

- **Eficiência Operacional:** Permite uma rápida identificação e localização de faltas, minimizando o tempo de resposta e os custos associados.
- **Confiabilidade:** A precisão dos resultados comparáveis aos relés de proteção garante a confiabilidade do sistema elétrico.

- Valor Agregado: A automatização e utilização das PMUs existentes agregam valor ao parque instalado, otimizando o uso de infraestrutura já disponível sem necessidade de grandes investimentos adicionais.

Portanto, a implementação de um sistema automatizado de localização de faltas utilizando dados de PMUs é uma solução viável e benéfica para as empresas de transmissão de energia elétrica, oferecendo uma ferramenta poderosa para melhorar a eficiência, reduzir custos e aumentar a segurança do sistema elétrico de potência.

V. CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho demonstram que os dados de PMUs classe M podem ser eficazmente utilizados para a localização de faltas em LTs, mostrando uma exatidão comparável aos métodos tradicionais baseados em relés de proteção. A implementação de métodos de localização por 2 terminais utilizando dados de PMUs revelou-se altamente precisa, oferecendo uma solução adicional e complementar para a identificação rápida e precisa de faltas.

A adoção sistemática de PMUs para localização de faltas pode proporcionar vários benefícios, incluindo a utilização eficiente da infraestrutura existente e a possibilidade de implementação a baixo custo. Além disso, a localização automática de faltas, como demonstrado neste trabalho, pode agilizar significativamente o processo de recomposição e busca de defeitos, aumentando a confiabilidade do sistema elétrico de potência.

Recomenda-se, portanto, que as empresas de transmissão considerem a integração de PMUs em seus processos operacionais, não apenas para monitoramento em tempo real, mas também como uma ferramenta poderosa para a localização de faltas. Esta abordagem não apenas melhora a eficiência operacional, mas também pode reduzir custos de manutenção e aumentar a segurança do sistema elétrico.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 2.11: Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção, ONS Procedimentos de Rede, 2024.05. Disponível em: https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocs/Subm%C3%B3dulo%202.11-RQ_2024.05.pdf. Acesso em: 15 jul. 2024.
- [2] F.V. Lopes, A. Mouco, R.O. Fernandes and F.C. Neto, "Real-World case studies on transmission line fault location feasibility by using M-Class phasor measurement units", *Electric Power Syst. Res.* 196 (2021) pp.1–7.
- [3] X. Liu, Z. Y. Dong, Y. Chen, and K. P. Wong, "Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 337–349, 2016.
- [4] D. Novosel, M. M. Begovic, D. Karlsson, C. Henville, and G. Michel, "Benefits of PMUs for real-time operations and control," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 6, no. 5, pp. 51–59, 2008.
- [5] G. B. R. de Queiroz, "Localização de faltas em linhas de transmissão de extra-alta tensão: teoria e aplicação de algoritmos com base em fasores," 2023.
- [6] S. Das, S. Santoso, and S. N. Ananthan, *Fault location on transmission and distribution lines: principles and applications*, John Wiley & Sons, 2021.

- [7] E. O. Barreto, "Avaliação de algoritmos para localização de faltas em redes elétricas," M.S. thesis, Universidade Federal de Pernambuco, 2003.
- [8] E. O. Schweitzer, "Evaluation and development of transmission line fault-locating techniques which use sinusoidal steady-state information," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 269–278, 1983.
- [9] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, and T. Matsushima, "Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2892–2898, 1982.
- [10] D. A. Tziouvaras, J. B. Roberts and G. Benmouyal, "New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines," 2001 Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IEE), Amsterdam, Netherlands, 2001, pp. 395–398.
- [11] *IEEE STANDARD FOR SYNCHROPHASOR MEASUREMENTS FOR POWER SYSTEMS*, IEEE Standard C37.118.1-2011, Dez. 2011.
- [12] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 2.13: Requisitos mínimos para Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores, ONS Procedimentos de Rede, 2020.12. Disponível em: https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocs/Subm%C3%B3dulo%202.13-RQ_2020.12.pdf. Acesso em: 30 jul. 2024.

VII. BIOGRAFIAS



Emerson Luis de Almeida (Jundiá - Brasil, 1993) é graduado em Engenharia Elétrica pela Faculdade Anhanguera Jundiá no ano de 2015. Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética pela Universidade de São Paulo no ano de 2020. Pós-Graduando em Especialização de Proteção em Sistemas Elétricos. Desde fevereiro de 2016 atua como Engenheiro de Estudos de Operação e Proteção na empresa ISA CTEEP.



Frederico Oliveira Passos (Volta Redonda – Brasil, 1982) é professor Adjunto pela Universidade Federal de Itajubá pelo Instituto de Sistemas Elétricos e Energia ISEE. Doutorado em Engenharia Elétrica, ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, pela Universidade Federal de Itajubá (2015) com o tema "Localizador da Fonte de AMTs baseado nas Medições das Tensões de Fronteira". Obteve título de mestre em Engenharia Elétrica na mesma instituição de ensino em 2010 com o tema "Solução para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Não Transpostas baseada em Sincrofasores e Algoritmo Genético". Especialista em Proteção de Sistemas Elétricos pelo Curso de Especialização em Proteção de Sistemas Elétricos CEPSE 2009. Foi vice-diretor do ISEE, diretor acadêmico da UNIFEI - Campus Itabira, Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica Campus Itabira e Chefe de Laboratório de Máquinas Elétricas. Atualmente é membro do Centro de Estudos em Qualidade da Energia e Proteção Elétrica (QMAP), atua na área de localização de faltas em linhas de transmissão e localização da fonte de variações de tensão de curta duração em sistemas através de medição fasorial e componentes simétricos.



Marcos Vinícius da Costa (Poços de Caldas – Brasil, 1992) é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá. Obteve título de mestre pela mesma instituição de ensino em 2018 com o tema "Uma contribuição à regulação das variações de tensão de curta duração". Desde 2019 atua na área de proteção de sistemas elétricos de distribuição e transmissão. Atualmente, ocupa o cargo de Engenheiro de Estudos de Operação e Proteção na ISA CTEEP.



Meronides Jonnel Ramos (Ourinhos – Brasil, 1963) formou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá em 1986. Iniciou sua carreira em empresas de consultoria em engenharia de projetos como engenheiro de controle e proteção de usinas e subestações, ingressando na Companhia Energética de São Paulo (CESP) em 1994 como engenheiro de proteção de sistema elétricos de potência. Em 1999, após a cisão de ativos da CESP, passou a trabalhar na Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP), onde exerceu o cargo de Coordenador de Estudos de Operação e Proteção no período de 2004 a 2022.