

IVANNA CASTELLI

Diagnóstico de faltas em sistemas de potência:

uso e aplicação de RDP com TWFL

Ivanna Castelli

Diagnóstico de faltas em sistemas de potência:

uso e aplicação de RDP com TWFL

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias

C348d	Castelli, Ivanna Diagnóstico de faltas em sistemas de potência: uso e aplicação de RDP com TWFL / Ivanna Castelli – Guaratinguetá, 2022. 52 f : il. Bibliografia: f. 50-52 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022. Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias 1. Energia elétrica - Transmissão. 2. Energia elétrica - Distribuição. 3. Sistemas de energia elétrica. I. Título.
	CDU 621.315


IVANNA CASTELLI


**ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA”**


**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**


Prof. Dr. DANIEL JULIÊN BARROS DA SILVA SAMPAIO
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
Orientador/UNESP – FEG


Prof.ª Dra. PALOMA MARIA SILVA ROCHA RIZOL
UNESP – FEG


Prof. Dr. DANIEL JULIÊN BARROS DA SILVA SAMPAIO
UNESP – FEG

Fevereiro 2022

DADOS CURRICULARES

IVANNA CASTELLI

NASCIMENTO 13.02.1999– São Paulo / SP

FILIAÇÃO Juan Carlos Castelli
Solange Maria Lopes Rodrigues Castelli

Dedico este trabalho as pessoas que me inspiraram dedicação, responsabilidade e paixão pelo conhecimento, aos meus pais Juan e Solange e ao Prof. Dr Rubens Alves Dias.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e virtude de minhas conquistas. Agradeço pela minha vida, minhas oportunidades de aprendizado, minha família, meu namorado, a república “Tudo Pela Dona” que se tornou uma segunda família, e aos meus amigos;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Rubens Alves Dias* que jamais deixou de me incentivar, com a sua orientação, dedicação e auxílio;

aos meus pais *Solange e Juan*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos e estiveram orgulhosos mesmo quando me deparei com obstáculos;

ao *Marcelo Esteves* colega de turma, amigo que mais me apoiou e ajudou durante as aulas e atividades e se tornou um dos responsáveis por esta conquista;

aos professores da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação no ensino aos alunos.

“Se há algum segredo de sucesso, consiste ele na habilidade de apreender o ponto de vista da outra pessoa e ver as coisas tão bem pelo ângulo dela como pelo seu”.

Henry Ford

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar e explicar através de estudo de caso o Registrador Digital de Perturbações, equipamento que é utilizado em subestações de energia, dentre outras aplicações, para localização de faltas em linhas de transmissão. Inicialmente é mostrada a introdução de âmbito geral a respeito de faltas em linhas de transmissão e ondas viajantes que são ocasionadas por estas faltas. Em seguida, são analisados os métodos de localização de faltas com a utilização do algoritmo de impedância conhecido como Takagi e a utilização de ondas viajantes. Por fim, é um exemplo de análise com uma falta real no sistema, de modo a comprovar o método de ondas viajantes apresentado e demonstrar os parâmetros e características do sistema que estão diretamente ligados na precisão da solução.

PALAVRAS-CHAVE: Localização de faltas. Linhas de transmissão. RDP. Registrador digital de perturbações. Ondas viajantes.

ABSTRACT

This work aims to present and explain the Digital Disturbance Recorder equipment for fault location in transmission lines. Initially, an introductory approach was presented in order to provide a general knowledge about faults in transmission lines and, also, about the traveling waves that are caused by these faults. Then, the fault location methods were analyzed, using the TAKAGI algorithm and the use of TWFL. Finally, a practical analysis was carried out in order to prove the method of travelling waves presented and demonstrate the parameters and characteristics of the system that are directly linked to the accuracy of the solution.

KEYWORDS: Fault location. Transmission line. DFL. Digital fault locator. TW.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Oscilografia de longa duração.....	22
Figura 2 – Mercado de registradores digitais de perturbações, taxa de crescimento 2020 – 2026.....	24
Figura 3 – Algoritmo de localização de faltas	27
Figura 4 – Circuito pré-falta	28
Figura 5 – Circuito pré-falta com a fonte V_F e a resistência R_F	29
Figura 6 – Circuito em falta.....	29
Figura 7 – Circuito em falta com duas fontes em oposição.....	30
Figura 8 – Circuito superposto ou puro de falta	30
Figura 9 – Circuito superposto ou puro de falta	33
Figura 10 – Frentes de ondas viajantes ocasionadas por uma falta	34
Figura 11 – Momento da ocorrência da falta.....	35
Figura 12 – Onda viajante ampliada, capturada por um RDP	37
Figura 13 – Localização de falta aplicada em onda viajante capturada por RDP	37
Figura 14 – Região geográfica de Ponta Grossa.....	39
Figura 15 – Diagrama elétrico da região afetada em operação normal	40
Figura 16 – Perfil de tensão registrado pela Copel (PDC) WAMS	41
Figura 17 – Diagrama antes do início da ocorrência	41
Figura 18 – Perda LT ARE/PGN 230 kV as 12h51	42
Figura 19 – Valores de sobrecarga da LT 230 kV BTA/PGS.....	42
Figura 20 – A carga de frio capacitiva inrush durante o religamento manual do TL BTA/PGS de 230 kV na barra PGS de 230 kV.....	43
Figura 21 – Configurações do Relé 79	44
Figura 22 – Localização de faltas pelo método de TW	45
Figura 23 – Localização de faltas pelo método de um terminal	45
Figura 24 – Relatório SIMEPAR.....	46
Figura 25 – Gravação do circuito 230 kV PGS pelo lado 230kV BTA.....	47
Figura 26 – Valores das características de impedância dos cabos LT 230 kV BTS / PGS medidos online pelo PDC.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais fabricantes de localizadores de faltas por ondas viajantes.....	36
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAGR	Taxa de crescimento anual composta
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PMU	Medição Sincrofasorial
RDP	Registrador Digital de Perturbações
SMSF	Sistema de Medição de Sincrofasores
SOE	Sequence of Events
TW	Ondas Viajantes
TWFL	Localizador de Falhas por Ondas Viajantes

LISTA DE SÍMBOLOS

V_F	tensão no ponto de falta (V)
I_F	corrente no ponto de falta (A)
V_S	tensão pós-falta no terminal S (V)
I_S	corrente de falta no terminal S (A)
V'_S	tensão pré-falta no terminal S (V)
I'_S	corrente pré-falta no terminal S (A)
V''_S	tensão no ponto S para o circuito superposto (V)
I''_S	corrente no ponto S para o circuito superposto (A)
I''_{FS}	corrente no ponto F do circuito superposto que flui para o terminal S (A)
V_R	tensão pós-falta no terminal R (V)
I_R	corrente pós-falta no terminal R (A)
V'_R	tensão pré-falta no terminal R (V)
I'_R	corrente pré-falta no terminal R (A)
V''_R	tensão no terminal R para o superposto (V)
I''_R	corrente no terminal R para o circuito superposto (A)
I''_{FR}	corrente no ponto F do circuito superposto que flui para o terminal R (A)
E_S	tensão da fonte local (V)
E_R	tensão da fonte remota (V)
Z_{SS}	impedância da fonte local (Ω)
Z_{RR}	impedância da fonte remota
Z_{SF}	impedância da linha de transmissão do terminal S ao ponto de falta (Ω)
Z_{RF}	impedância da linha de transmissão do terminal R ao ponto de falta (Ω)
Z_C	impedância da falta (Ω)
R_F	resistência de falta (Ω)
Z_S	impedância medida do terminal S ao ponto de falta (Ω)
Z_N	impedância longitudinal total da linha (Ω)
$k_t(x)$	fator de distribuição de corrente para o algoritmo de Takagi (-)
x	distância para a falta (m)
A, B, C, D	constantes generalizadas do quadripolo representativo da linha (-)
\underline{z}	constante de propagação da linha (-)
L	comprimento da linha de transmissão (m)
d	distância do começo da linha de transmissão até a falta (m)
ha	primeiro registro de tempo da onda viajante (s)
hb	segundo registro de tempo da onda viajante (s)
hf	registro de tempo da ocorrência da falta (s)
ta	tempo, em segundos, que a onda “a” levou para percorrer a distância do local da falta até o terminal A (s)
tb	tempo, em segundos, que a onda “b” levou para percorrer a distância do local da falta até o terminal B (s)
td	tempo de ocorrência da falta (s)
c	velocidade da luz no vácuo (2.99792458×10^8 m/s)
k	constante de aproximação de velocidade em um condutor (m/s)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO	16
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	17
2	ANÁLISE DE PERTURBAÇÕES ELÉTRICAS ATRAVÉS DE OSCILOGRAFIAS	18
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DE PERTURBAÇÕES E REDE DE OSCILOGRAFIAS.....	18
2.2	REGISTRADOR DIGITAL DE PERTURBAÇÕES	21
2.3	EXIGÊNCIAS DO SISTEMA NACIONAL.....	22
2.4	REGISTRADORES DIGITAIS DE PERTURBAÇÕES NO EXTERIOR	23
3	ASPECTOS CONCEITUAIS	26
3.1	TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	28
3.1.1	Algoritmo de TAKAGI – Utiliza dados de um terminal	31
3.2	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS POR ONDAS VIAJANTES	34
4	ESTUDO DE CASO	38
4.1	COPEL – LT BATEIAS/PONTA GROSSA SUL 230 KV	38
4.2	FALHA DO RELIGAMENTO AUTOMÁTICO (79) DO LT BTA/PGS DE 230 kV APÓS A PRIMEIRA FALTA (13h9min).....	43
4.3	LOCALIZAÇÃO DO RESULTADO EM 230 kV LT BTA/PGS NA PRIMEIRA FALHA (13h09min).....	44
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão aéreas são componentes de um sistema elétrico. Possuem grande extensão, estando sujeitas a intempéries, como descargas atmosféricas e tempestades, ventos fortes, poluição, grande variação de temperatura, ação humana de vândalos ou acidentes e alta insolação, que podem provocar os mais diversos tipos de faltas, tirando-as de seu funcionamento normal, havendo, inclusive, a possibilidade de uma falta levar ao colapso do sistema elétrico.

O progresso dos sistemas elétricos de potência está intimamente ligado com o progresso de sua proteção. A localização rápida e precisa de uma falta é imprescindível para uma operação segura e econômica em um sistema elétrico de potência (ZAHRA et al. 2000).

De acordo com Silveira (2007), na ocorrência de uma falta, é de interesse das concessionárias dispor de uma sistemática que permita isolar, com rapidez e precisão, a partir do sistema elétrico que está com defeito e garantir seu pronto restabelecimento, de forma a atender a demanda de carga existente. Isso implica na redução de custos e dos riscos de colapso no sistema elétrico de potência, maior confiabilidade e a satisfação do consumidor com a qualidade do serviço prestado.

Quando há um curto-circuito em uma linha de transmissão, cabe aos relés de proteção a sua detecção, identificação e sinalização, comandando os disjuntores de forma a retirar de serviço a linha em falta.

É tarefa então da concessionária, mais especificamente das suas divisões relacionadas à manutenção, à execução dos trabalhos de reparo, de forma a garantir que a linha possa ser reintegrada ao sistema elétrico, no menor tempo possível e com níveis de confiabilidade adequados. Para atingir esses objetivos é importante que a equipe de manutenção tenha uma informação confiável do possível local de defeito (SILVEIRA, 2007).

A identificação, localização e classificação das faltas, as quais podem ser coletivamente chamados de processo de detecção de faltas, constituíram-se ao longo dos anos em metas almejadas por diversos segmentos do sistema elétrico de potência, tais como o setor de transmissão e o setor de distribuição de energia elétrica, destacando-se três linhas de pesquisa: estudo das formas de ondas fundamentais de corrente e tensão, principalmente por medições de impedância, estudo de ondas viajantes e componentes de alta frequência e ampliação de sistemas inteligentes (TANG, 2000).

Desde que se iniciou o processo de desregulamentação do mercado de energia elétrica brasileira, as concessionárias vêm experimentando uma gradual alteração na postura de

análise de ocorrências nos sistemas os quais elas mantêm e operam. Se antes a análise visava basicamente o estudo da falta a fim de que se evitasse um posterior distúrbio, no mercado de energia atual esta análise deve também levar em conta o tempo de resposta e recomposição do sistema, uma vez que as empresas são penalizadas por indisponibilidade das linhas e equipamentos. Neste cenário, é importante garantir que o acesso aos registros dados pelo sistema seja rápido que existam ferramentas que permitam uma resposta rápida, precisa e segura da ocorrência e esclareçam a causa, localização da falta, condições climáticas na região e condição sistêmica em regime, durante a falta e após ocorrência.

O uso de registrador digital de perturbações (RDP) por si só já representou um avanço significativo na análise de ocorrências, permitindo análises de formas de onda com alta resolução e acesso ágil aos registros, bem como acesso centralizado a medições de toda subestação ou usina monitorada, pela capacidade de várias entradas analógicas e digitais disponíveis em equipamentos deste tipo. Apesar de relés digitais modernos possuírem funções de oscilografia, de forma geral a análise com estes dados é prejudicada por filtragens digitais após aquisição dos dados, limitações no tamanho do registro, nomenclatura dos canais analógicos e digitais e limitação na quantidade de canais analógicos e digitais no registro por equipamento, além de muitas simplificações nos algoritmos de localização de faltas.

Está disponível atualmente, entre outras tecnologias, localização de faltas de forma precisa por ondas viajantes, comumente referida como TWFL (do inglês: *Traveling Wave Fault Location*), Sistemas de Medição de Sincrofasores (SMSF) e acesso a banco de dados meteorológicos.

A TWFL permite uma localização de faltas na ordem de centenas de metros, tipicamente entre torres, onde o analista pode de forma rápida localizar o ponto da falta e enviar as equipes de manutenção de linhas verificar em campo os efeitos da ocorrência. A SMSF, por ter aquisição sincronizada no tempo, permite ao analista a visualização da condição do Sistema de Potência comparando as medidas diretamente nos períodos pré-falta, falta e pós-falta, nas quais podem-se verificar de forma eficiente a extensão da ocorrência e suas consequências nas linhas ou sistemas adjacentes. Por fim, os dados meteorológicos indicam qual a situação do tempo na região onde a falta ocorreu, permitindo ao analista restringir sua investigação às ocorrências típicas de acordo com a situação meteorológica.

A eficiência do uso de múltiplas fontes de dados é mostrada no caso da ocorrência no sistema operado pela COPEL GT de 17/10/2016, conforme Krefta, et.al (2018). Por causa de um desligamento programado da linha de 230 kV KCL-PGS e desligamento automático da linha de 230 kV ARE-PGN, a região da cidade de Ponta Grossa permaneceu sendo alimentada

radialmente pela linha de 230 kV BTA-PGS. Por sua vez, esta linha sofreu uma falta com atuação dos elementos de distância e teleproteção nos terminais das subestações, BTA 230kV e PGS 230kV, ocasionando uma interrupção no fornecimento de 206,5 MW para a região. Houve atuação com sucesso do religamento automático da extremidade da linha de BTA 230kV, porém o religamento não atuou na extremidade PGS 230kV. São apresentados os dados obtidos desta ocorrência pelos sistemas de Oscilografia, TWFL, SMSF, registro meteorológico e SOE (do inglês: *Sequence of Events*), onde percebe-se como os sistemas se somam para fornecer dados de qualidade para os analistas da COPEL.

Por fim, pelo estudo de caso apresentado, verificou-se que as diversas ferramentas disponíveis aos analistas permitiram localizar a falta de forma eficiente, verificar as condições climáticas e verificar detalhes da falta e sua extensão no sistema operado pela COPEL. Também se observou que as ferramentas de análise são acessíveis por canais de comunicação com resposta adequada à aplicação e permitiram a análise detalhada, bem como uma resposta eficaz perante a complexidade da ocorrência.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho discute os princípios básicos da localização de faltas e das ondas viajantes ocasionadas devido a ocorrências de faltas em uma linha de transmissão de energia elétrica, os registradores digitais de perturbações que estimam a localização da falta utilizando informações das TWs de dois terminais e os benefícios de se ter uma estimativa da localização da falta baseada nas TWs. Além disso, são compartilhadas as experiências de campo dos procedimentos de localização de faltas ocorridas em COPEL GT de 17/10/2016, conforme Krefta, et.al (2018).

1.2 JUSTIFICATIVA

Os registradores digitais de perturbações possuem grande importância no ramo de transmissão de energia, são equipamentos indispensáveis para a análise de ocorrências. De acordo com Silva (2001) sem estes equipamentos seria muito difícil, na maioria das vezes impossível, analisar uma perturbação e propor medidas preventivas/corretivas que minimizassem o número e a duração dos desligamentos em Linhas de Transmissão. Vários são os métodos que fornecem e que realizam a localização de faltas, contudo serão abordados aqueles envolvendo ondas viajantes que trafegam pelas linhas de transmissão, os quais vêm,

atualmente, se destacando no mercado brasileiro.

Logo, com o fim de agregar todos esses dados utilizados e aplicá-los em um caso real, provando assim a prática em decorrência da teoria, mostra-se a motivação deste trabalho.

1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2 encontra-se a revisão da literatura, a qual permite ter uma visão mais ampla do assunto pesquisado, tanto no âmbito internacional quanto nacional. Os aspectos conceituais que permitem o entendimento dos fenômenos envolvidos e recursos tecnológicos empregados são apresentados no Capítulo 3. No Capítulo 4 é descrita e comentada uma ocorrência na área de concessão da Copel, levando-se em conta a abordagem proposta. O fechamento do trabalho, mediante as considerações finais, é desenvolvido no Capítulo 5.

2 ANÁLISE DE PERTURBAÇÕES ELÉTRICAS ATRAVÉS DE OSCILOGRAFIAS

De acordo com Rodrigues (1997), entende-se por perturbação qualquer distúrbio ocorrido na rede elétrica que altere os parâmetros de tensão e corrente, enquanto a falta é definida como uma perturbação caracterizada pela interrupção do fluxo de energia.

Conforme Brito (2016) a análise de perturbações tem como principais objetivos:

- Verificar a correta atuação do sistema de proteção durante um desligamento;
- Observar o comportamento dos disjuntores;
- Identificar as falhas em equipamentos;
- Monitorar o comportamento do sistema em resposta à perturbação.

Essa análise tem, como uma de suas ferramentas mais importantes, a oscilografia.

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DE PERTURBAÇÕES E REDE DE OSCILOGRAFIAS

A rede de oscilografia foi concebida com o objetivo de realizar monitoração contínua do sistema elétrico. Os primeiros oscilógrafos eram equipamentos eletromecânicos, cuja impressão dos registros era feita em papel, utilizando uma tinta especial. Dentre os diversos modelos dessa categoria, o S41 da Thompson foi o mais utilizado (BRITO, 2016).

Em seguida, de acordo com Barreto (2003), vieram os oscilógrafos que utilizavam papel fotossensível dentro de uma câmara hermeticamente fechada, em que os registros eram gravados por sinais luminosos e posteriormente, revelados para análise. Nessa categoria, os mais utilizados foram os oscilógrafos MD444 da Hathaway, os quais apresentavam desempenho superior aos S41 da Thompson, principalmente, em relação à qualidade de impressão e quantidade de canais disponíveis. O registro da falta era realizado de forma analógica, no qual uma agulha acoplada a um galvanômetro desenhava em um papel as oscilações induzidas pelo fenômeno elétrico monitorado.

Até a década de 1970, conforme descrito por Silva (2001), os sistemas de controle das subestações eram predominantemente dominados pelos relés eletromecânicos e desprovidos de qualquer sistema de localização de faltas em linhas de transmissão. Os registradores de perturbações existentes eram limitados, pois tinham que ser coletados localmente e enviados por transportes convencionais para os centros de análise. Adicionalmente, nem sempre estavam disponíveis, pois exigiam frequentes manutenções, e apenas permitiam uma análise simplificada do tipo de defeito ocorrido (mono, bi ou trifásico), além de uma estimativa

grosseira da proximidade do defeito de um terminal ou do outro, a partir da “sensibilidade” e experiência das equipes que analisavam os registros oscilográficos.

Com o passar do tempo, vários problemas foram surgindo, tais como:

- Coleta dos registros local e envio por transportes convencionais ou fax, para os centros de análise;
- Custo elevado de impressão dos registros;
- Difícil manuseio e armazenamento dos registros;
- Taxas de falhas crescentes dos oscilógrafos em decorrência do tempo de uso, o que provocou aumento do custo de manutenção;
- Dificuldades para adquirir peças sobressalentes para reparos.

A partir dos anos 1970, o registro passou a ser feito em papel fotográfico por aparelhos analógicos. Só em meados dos anos 1980 surgiram os primeiros oscilógrafos digitais, que foram então chamados de registradores digitais de perturbação (RDP). Ao constatar que uma rede de oscilografia eficiente e moderna constituía-se em uma ferramenta valiosa na busca pelo padrão de qualidade exigido pela sociedade, foi preciso a modernização e expansão do sistema de oscilografia (BRITO, 2016).

A preferência pela utilização do sistema e registro digital de perturbações se dá pelas vantagens apresentadas por Barreto (2003):

- **Custos operacionais:** os gastos mensais com papéis fotossensíveis e tinta são consideráveis para os registradores tradicionais, em função do uso de tintas e papéis especiais, consumidos largamente em ocorrências e testes periódicos de rotina. Nos digitais esse custo é insignificante;

- **Custos de manutenção:** a natureza eletromecânica dos registradores S41, com motores, cilindros de impressão, engrenagens, uso de tinta e outros elementos, gera a necessidade de manutenções gerais anuais além de outras corretivas de menor periodicidade. No caso dos RDP, por se tratarem de equipamentos digitais, não existe a necessidade de manutenções preventivas periódicas, que se limitam às intervenções corretivas, as quais tem ocorrido em pequena escala;

- **Qualidade de impressão:** esse também é um dos grandes problemas dos registradores tradicionais, com muitos pontos de falhas associados aos aspectos de manutenção já citados, prazo de validade das tintas e do papel fotossensível, implicando em constantes perdas ou dificuldades de leitura dos registros, uma vez que a impressão é a única forma de armazenamento dos dados da ocorrência, e as eventuais falhas eram irreversíveis.

No caso dos RDP, o armazenamento dos dados e arquivos digitais possibilita a visualização e a impressão na qualidade que se desejar;

- **Flexibilidade para análise:** os registros convencionais não permitem qualquer tipo de “tratamento”, já que se limitavam a um papel impresso e de qualidade nem sempre adequada. A utilização de softwares especialistas desenvolvidos pelos fabricantes de RDP permite uma flexibilidade considerável para tratamento dos dados digitalizados, tais como medição de grandezas, intervalos de tempo, aplicação de zoom em partes apropriadas, análise harmônica dos sinais e, em particular, a possibilidade do cálculo da distância de faltas em linhas de transmissão, com a aplicação de algoritmos adequados para este fim;

- **Disponibilidade imediata para todos os usuários:** a coleta dos registros era feita de forma manual pelos operadores das instalações e depois enviados para análise dos órgãos especialistas, num processo lento e serial, já que se dispunha de um único registro muitas vezes “disputado” por vários segmentos que tinham interesse na análise da ocorrência. Os RDP possibilitam o acesso remoto do registro via redes de comunicação com modem ou diretamente com redes TCP/IP, e podem ser disponibilizados imediatamente em rede para acesso e análise de todas as áreas/setores que possam estar interessados.

O uso desta tecnologia vem permitindo a integração harmoniosa entre alternativas de supervisão e controle e de estudos e análise mais confiáveis. Essa integração resulta numa operação mais eficiente do sistema elétrico como um todo (Costa, 1990).

Os relés de proteção, agora também construídos com tecnologia digital, incorporaram além das funções tradicionais de proteção a medição, funções de automação, comunicação e de oscilografia. A capacidade de gerar registros de oscilografia inserida nos relés de proteção não eliminou o uso de registros dedicados de perturbação pois, além da pequena capacidade de armazenamento de dados dos relés de proteção em comparação com o RDP, quando esses relés são danificados o registro de falha é perdido (KREFTA, 2018).

Os oscilógrafos digitais que surgiram em meados da década de 1980 eram constituídos de duas unidades, chamadas de unidade de aquisição de dados (UAD) e unidade de processamento dos dados adquiridos (UPD). Na UAD é efetuada a monitoração do sistema elétrico pela aquisição de dados do sistema. Posteriormente, os dados adquiridos são analisados na UPD e disponibilizados ao analista na forma de gráficos representando o comportamento das grandezas do sistema elétrico (frequência, potência ativa, potência reativa e tensão) (COSTA, 1991).

De acordo com Silveira (2007), as facilidades incorporadas na década de 1980 foram incorporadas inclusive nos serviços de proteção, e tornaram-se disponíveis os dados de tensão

e corrente nos períodos pré e pós-falta que, entre outras aplicações, são utilizados nos localizadores de faltas.

2.2 REGISTRADOR DIGITAL DE PERTURBAÇÕES

O Registrador Digital de Perturbações (RDP) é um oscilógrafo com tecnologia digital utilizado no monitoramento de sistemas de energia, com destaque para sistemas de transmissão e geração. O RDP armazena vários tipos de grandezas em uma grande quantidade de canais, analógicos e digitais (SANTOS, 2014).

Os RDP possuem quantidade de canais analógicos da ordem de 8 a 64 canais, e uma quantidade maior de canais digitais que variam entre 32 e 384 canais. Armazenam também estados de contadores auxiliares de relés, chaves e disjuntores. (MORETO, 2011)

Atualmente, eventos do sistema elétrico são registrados por RDP, os quais geram arquivos que permitem desenhar as formas de onda, fasores e sinais digitais monitorados. Estes arquivos podem estar em formato proprietário, definido pelo fabricante do RDP, ou seguir um formato normatizado, sendo o formato mais comum atualmente o formato COMTRADE (C37.111). Além de superar as limitações da oscilografia analógica, em termos de armazenamento e manutenção da qualidade dos dados, a oscilografia digital permitiu o desenvolvimento de diversas ferramentas computacionais, as quais auxiliam na análise de perturbações (BRITO, 2016).

Pode-se classificar a oscilografia de duas formas:

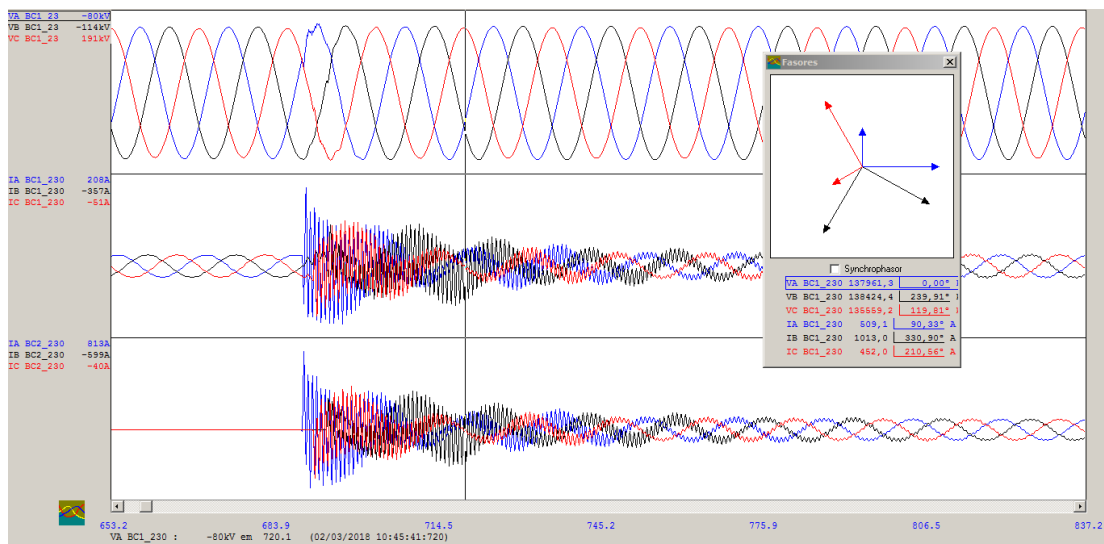
- Oscilografia de curta duração ou transitória: utilizada para o monitoramento de fenômenos transitórios de origem eletromagnética, em geral para o estudo e manutenção de sistemas de proteção e para realizar a localização da falta. Além disso, pode ser utilizada também para a análise de harmônicos e outros procedimentos envolvendo processamento de sinais para a análise do sistema, como validação de modelos do sistema. De acordo com a ONS (2002) esse tipo de oscilografia é voltada essencialmente para o registro das formas de onda das tensões e correntes para fins de análise de distúrbios rápidos, principalmente curtos-circuitos.

- Oscilografia de longa duração: responsável pelo monitoramento de oscilações de baixa frequência, de transitórios lentos de origem eletromecânica, em geral utilizada com o propósito de avaliar o comportamento dinâmico de sistemas elétricos interconectados de grande porte. De acordo com a ONS (2002) esse tipo de oscilografia é voltada essencialmente para o registro dos valores eficazes de tensões e correntes de sequência positiva e dos ângulos

relativos para fins de análise de distúrbios lentos, principalmente os transitórios, eletromecânicos.

A Figura 1 mostra um exemplo do estado real da arte de registros obtidos de RDP. Com o auxílio de ferramentas computacionais é possível calcular vetores, magnitudes, ângulos, a sequência de correntes e tensões, magnitude de distorção harmônica, entre outras grandezas pertinentes para análise de ocorrências. A frequência amostral atualmente disponível está na ordem de 15 kHz ou superior. Assim, é possível analisar um amplo espectro harmônico das grandezas monitoradas.

Figura 1 – Oscilografia de longa duração



Fonte: Krefta (2018).

2.3 EXIGÊNCIAS DO SISTEMA NACIONAL

Atualmente as empresas do setor elétrico deparam-se cada vez mais com as exigências do mercado energético sendo obrigadas a assegurar aos seus clientes bons níveis de continuidade e confiabilidade no serviço de fornecimento da energia elétrica e também atender os índices de continuidade do serviço estabelecidos pela agência reguladora do setor elétrico (ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica). Para alcançar estes objetivos além de investir na melhoria dos seus sistemas de transmissão e distribuição, as empresas responsáveis têm investido na automação de suas operações, buscando alternativas que reduzam os tempos de interrupção por faltas permanentes nos sistemas de potência (BRITO, 2016).

A partir de novembro de 2004 tornou-se obrigatório a observação da Lei 10.848/2004 (BRASIL, 2004) para o controle e análise das faltas, sendo responsabilidade dos agentes de operações das linhas de transmissão e do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), também estabelecido pela Resolução Normativa Aneel nº 115 (ANEEL, 2004). No Submódulo 11.6 do Procedimento de Rede da ONS (ONS, 2009) são determinadas as medidas obrigatórias a serem implementadas pelas subestações (SE) para registro de perturbações, transferência e armazenamento das informações (COSTA, 2010).

A regulamentação dessa nova necessidade foi resolvida conforme sugerido pelo procedimento, por meio da instalação de RDP, a fim de realizar registros das faltas, perturbações, quando identificadas na linha.

Por outro lado, o corpo técnico das transmissoras vem sofrendo significativa sobrecarga de atividades voltadas à análise de eventos, devido à quantidade de registros de oscilografias das faltas no sistema de transmissão, devido ao fato de que não há em geral, por parte do RDP e de maneira automática, identificação, classificação da falta ou a determinação automática de um possível agente causador da falta (MORETO, 2010).

2.4 REGISTRADORES DIGITAIS DE PERTURBAÇÕES NO EXTERIOR

Segundo Mordor Intelligence (2020) espera-se que o mercado de RDP cresça a um CAGR (Taxa de crescimento anual composta) de mais de 4,4% durante o período de previsão (2020 - 2026). A crescente necessidade por subestações digitais se tornou o principal impulsionador do crescimento do mercado de RDP. Além disso, o investimento contínuo em infraestrutura de energia em várias nações em todo o mundo potencialmente impulsionará o mercado de registradores digitais de perturbações nos próximos anos. No entanto, os custos mais elevados de instalações de sistemas de RDP é um dos principais fatores que dificultam o crescimento do mercado de gravadores digitais de falhas nos últimos tempos.

O mercado global de RDP está projetado para atingir USD 458,2 milhões até 2023, crescendo a um CAGR de 4,76% de um estimado USD 363,1 milhões em 2018. O crescimento deste mercado pode ser atribuído ao crescimento na melhoria da confiabilidade do sistema de energia e monitoramento da rede elétrica (MARKETSANDMARKETS, 2017).

A transmissão deve dominar o mercado devido ao aumento dos investimentos na infraestrutura de transmissão de energia em todo o mundo.

Prevê-se que várias legislações ambientais estabelecidas pelas agências de proteção ambiental em todo o mundo, juntamente com investimentos em projetos de energia, proporcionarão maiores oportunidades para os participantes que operam no mercado de RDP.

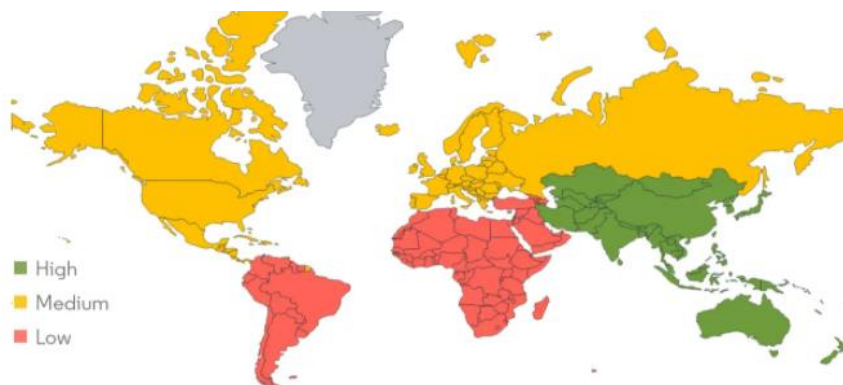
Espera-se que a Ásia-Pacífico testemunhe um crescimento significativo no mercado de falhas digitais durante o período de previsão. A Ásia-Pacífico deve testemunhar um crescimento significativo no mercado global de gravadores digitais de falhas durante o período de previsão. Isso é atribuído ao aumento dos investimentos do governo para melhorar a infraestrutura da rede elétrica a fim de maximizar a confiabilidade dos sistemas de energia.

A Índia é um dos principais países para o mercado de registradores digitais de falhas na Ásia-Pacífico devido ao aumento na demanda por infraestrutura de rede elétrica no país. Um aumento na demanda por recursos de energia renovável e rede elétrica também está impulsionando o mercado de registradores digitais de falhas na Ásia-Pacífico. Japão, China e Índia estão fazendo investimentos no segmento de transmissão e distribuição; A China é responsável pela maior parcela do mercado de RDP na região Ásia-Pacífico. O país é uma economia voltada para a exportação e tem testemunhado um crescimento exponencial na demanda por eletricidade nos últimos anos, alimentado por alta industrialização e desenvolvimento de infraestrutura, levando ao investimento em redes confiáveis de T&D.

Além disso, também se estima que o crescimento na Ásia-Pacífico será impulsionado pela crescente demanda por eletricidade em países como China e Índia. Em 2019, a geração de eletricidade atingiu 12.690,5 TWh na Ásia-Pacífico, com uma taxa de crescimento de 3,1% em relação ao ano anterior (MORDOR INTELLIGENCE, 2020).

Portanto, espera-se que a demanda por RDP na Ásia-Pacífico aumente para atender à crescente demanda de eletricidade assim como apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Mercado de registradores digitais de perturbações, taxa de crescimento 2020 - 2026



Fonte: Mordor Intelligence (2020).

Os investimentos do governo em infraestrutura de rede elétrica para aumentar a confiabilidade do sistema de energia estão entre os principais fatores que provavelmente impulsionarão esse mercado. De acordo com o Banco de Desenvolvimento da Ásia (ADB), um investimento de cerca de US \$ 944 bilhões está planejado na Ásia-Pacífico até 2020 para cumprir as metas de eficiência energética. A China foi responsável pela maior participação de mercado em 2017 para o mercado de gravadores digitais de falhas na Ásia-Pacífico. O governo da China está planejando investir US \$ 315 bilhões na melhoria de sua infraestrutura de rede elétrica entre 2015 e 2020. Esses investimentos impactariam positivamente o crescimento do mercado de gravadores digitais de falhas durante o período de previsão.

O mercado de registradores digitais de falhas é fragmentado, e o alto investimento inicial tem atuado como uma restrição significativa para a expansão do mercado global de registradores digitais de falhas. Neste cenário, os fabricantes AMETEK.Inc. (EUA), DUCATI Energia Spa (Itália), ERLPhase Power Technologies Ltd. (Canadá), Elspec LTD (Israel), General Electric Company (EUA), KoCoS Messtechnik AG (Reino Unido), Kinkei System Corporation (Japão), LogicLab s.r.l. (Itália), Prosoft-Systems Ltd. (Rússia), Qualitrol Company LLC (EUA) e Siemens AG (Alemanha) são os principais participantes do mercado (MARKETSANDMARKETS, 2017).

3 ASPECTOS CONCEITUAIS

Com o advento da proteção digital, algoritmos de localização de faltas têm sido desenvolvidos com o objetivo de melhorar a exatidão e precisão nos resultados. O desafio é grande, pois diversos fatores podem contribuir para erros de localização. Além disso, faz-se necessária a adaptação dos localizadores ao sistema elétrico, visando à redução de custos e facilidade de operação.

De acordo com Silveira (2007) na localização de faltas em linhas de transmissão, vários fatores podem contribuir para provocar erros na indicação do local, dentre os quais se pode citar:

- A resistência de falta, que não é conhecida. Nos casos de faltas entre fases, as resistências são pequenas, em geral menores que $0,5 \Omega$. Em faltas envolvendo a terra, estas podem ter valores maiores que 10Ω (BLACKBURN, 1987). Em alguns casos, podem se tornar muito elevadas, como em árvores encostadas em cabos (da ordem de 50Ω a 100Ω), condutores caídos em terrenos de elevada resistividade ou mesmo em queimadas (da ordem de 15Ω a 40Ω) (PEREIRA, 2004).
- Corrente de contribuição para a falta do terminal remoto da linha, fator ainda mais agravante se esta vier do lado da fonte de menor impedância de curto-circuito.
- Presença de linhas paralelas ou próximas.
- Não simetria da linha.
- Presença de compensação série.
- Correntes e tensões pós-falta não puramente senoidais.
- Incorreções nos parâmetros de linha.
- Fluxo de carga pré-falta.

Os algoritmos de localização de falta podem ser classificados em duas categorias:

- Métodos baseados em medições de fasores em regime permanente;
- Métodos baseados em ondas viajantes.

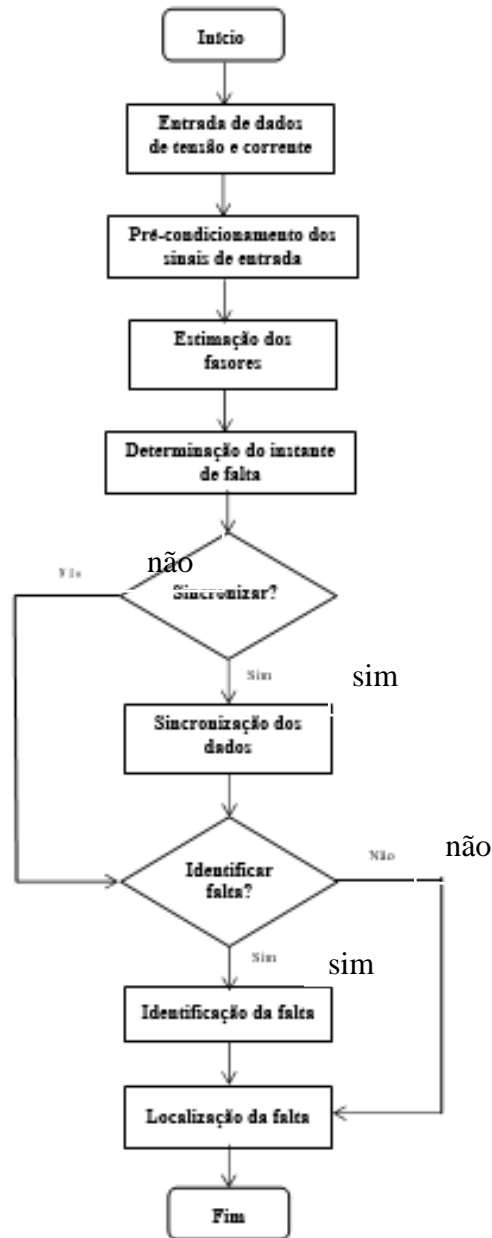
Estas duas categorias podem ser divididas em dois grupos:

- Métodos que utilizam dados de um terminal da linha;
- Métodos que utilizam dados de mais de um terminal da linha.

Silveira (2007) afirma que estágios de um algoritmo de localização de faltas podem variar conforme as informações requeridas pelo mesmo. Desta forma, pode não haver necessidade de identificação da falta ou ser necessário sincronizar os dados no tempo. A seguir, são descritas as rotinas de pré-processamento para um localizador, conforme Figura 3.

O ponto inicial é a obtenção dos dados digitalizados de tensões e correntes. Os passos seguintes envolvidos no processo são: pré-condicionamento dos sinais de entrada, estimativa dos fasores fundamentais, determinação do instante da falta, identificação e, finalmente, o método de solução, baseado em equações que calculam a distância até o ponto de falta.

Figura 3 – Algoritmo de localização de faltas



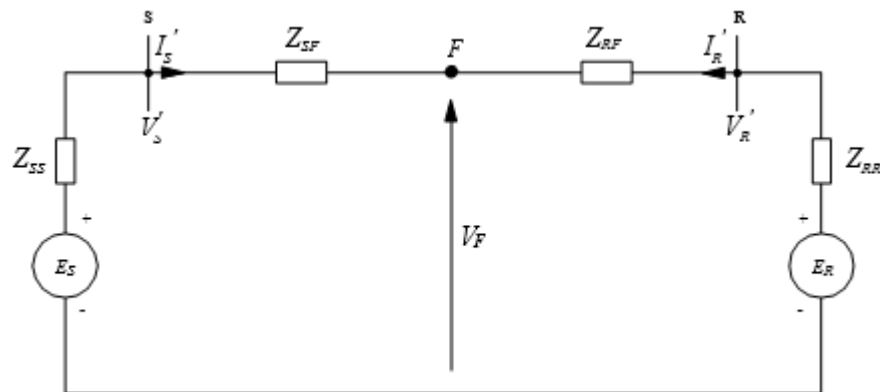
Fonte: Silveira (2007).

3.1 TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Uma técnica de análise de circuitos, utilizada por alguns dos métodos a serem apresentados neste capítulo, é o teorema da superposição. Para descrevê-lo, será apresentada a análise realizada por Silveira (2007).

É considerado o circuito da Figura 4 em que se apresenta um sistema elétrico em condições normais de operação (ou pré-falta), composto pela linha de transmissão com terminais S e R e fontes equivalentes E_S e E_R nas extremidades.

Figura 4 – Circuito pré-falta



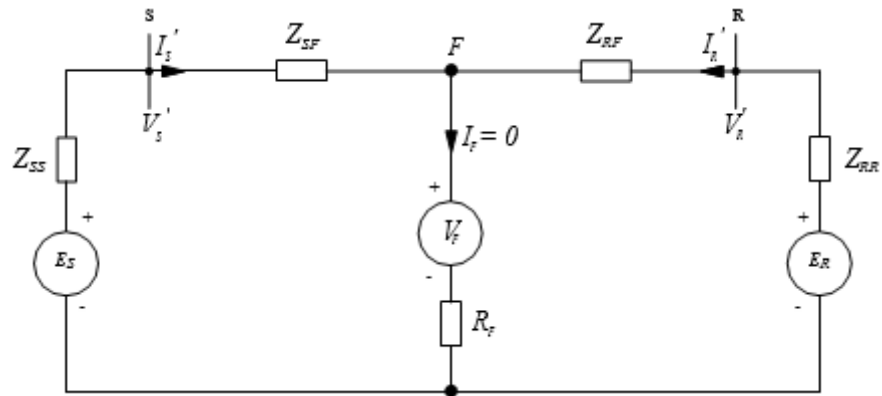
Fonte: Silveira (2007).

Na Figura 4:

- V_S' e V_R' são as tensões pré-falta, nos terminais S e R ;
- I_S' e I_R' , as correntes pré-falta, nos terminais S e R;
- Z_{SS} e Z_{RR} , as impedâncias das fontes local e remota;
- V_F , a tensão no ponto F, situado entre os extremos S e R.

É inserido em F uma fonte de tensão ideal, em que o valor é o mesmo de V_F , de modo que não haja corrente e um resistor de valor R_F , representando a resistência de uma falta que pudesse ocorrer no ponto F. O circuito obtido é mostrado na Figura 5.

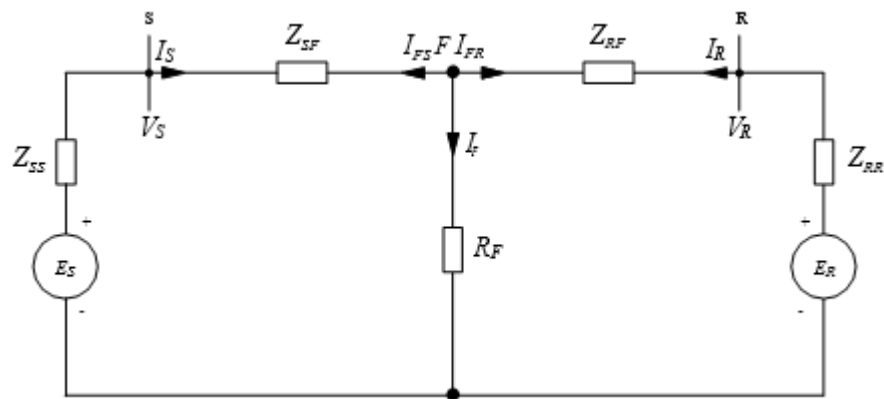
Figura 5 – Circuito pré-falta com a fonte V_F e a resistência R_F



Fonte: Silveira (2007).

Do circuito da Figura. 5, retira-se a fonte V_F , ligando o ponto F diretamente em R_F , provocando um curto-circuito, mostrado na Figura 6, na qual se representa o circuito em falta e V_S , V_R , I_S e I_R correspondem às tensões e correntes de falta nos terminais S e R , respectivamente.

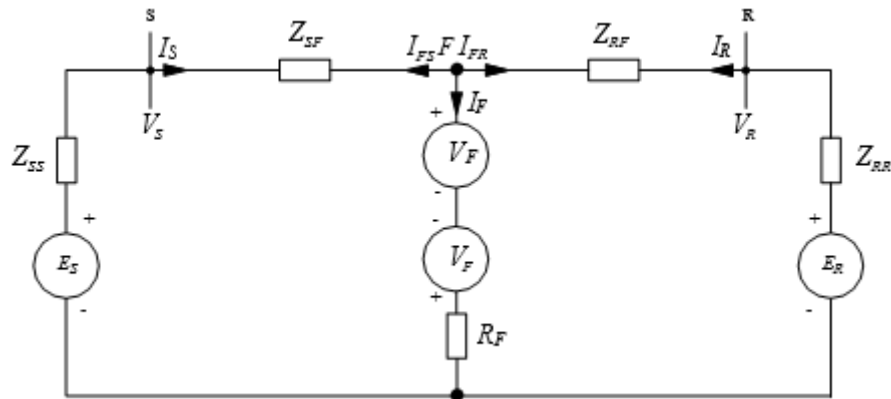
Figura 6 – Circuito em falta



Fonte: Silveira (2007).

Inserir duas fontes de valor V_F com polaridades em oposição, no circuito da Figura 5, sem alterar o valor de I_F , resulta no circuito da Figura 7.

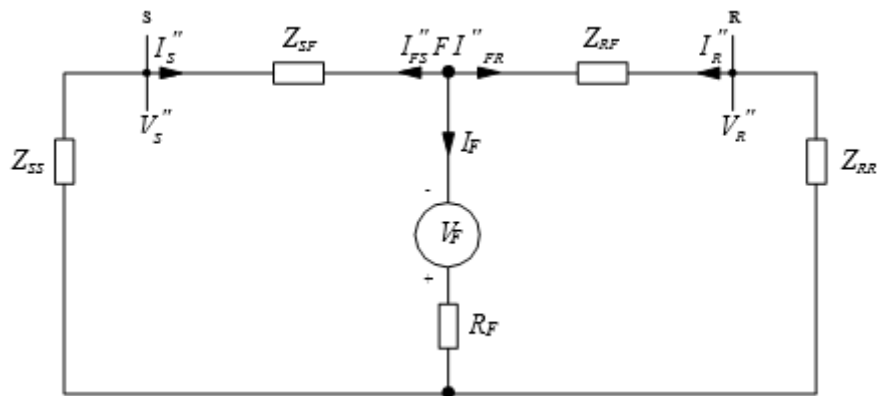
Figura 7 – Circuito em falta com duas fontes em oposição



Fonte: Silveira (2007).

O teorema da superposição estabelece que o circuito da Figura 7 pode ser considerado como a soma do circuito pré-falta da Figura 5 com o circuito chamado superposto ou puro de falta, mostrado na Figura 8, na qual V_S , V_R , I_S'' e I_R'' correspondem às tensões e correntes superpostas nos terminais S e R, I_{FS}'' e I_{FR}'' às correntes superpostas no ponto F.

Figura 8 – Circuito superposto ou puro de falta



Fonte: Silveira (2007).

Apresenta-se a técnica para localização de faltas em linhas de transmissão existentes na literatura, abordando os métodos baseados em fasores e ondas viajantes, utilizando dados de um terminal da linha (SILVEIRA, 2007).

3.1.1 Algoritmo de TAKAGI – Utiliza dados de um terminal

O equipamento que será utilizado na SE em questão no estudo de caso no Capítulo 4 pode utilizar o algoritmo matemático de TAKAGI para determinação de localização de faltas e portanto, este, será apresentado como retratado em Silveira (2007).

A tensão no ponto F da Figura 5 é dada pela equação (1)

$$V_F = I_F \cdot R_F \quad (1)$$

Do circuito da Figura 7 é possível concluir a equação (2)

$$I_F = -(I''_{FS} + I''_{FR}) \quad (2)$$

Substituindo a equação (2) na equação (1), chega-se à equação (3)

$$I_F = -R_F \cdot (I''_{FS} + I''_{FR}) \quad (3)$$

Definindo uma nova variável $k_t(x)$ pela equação (4)

$$k_t(x) = \frac{I''_{FR}}{I''_{FS}} \quad (4)$$

Substituindo I''_{FR} obtida de (4) em (3), tem-se a equação (5)

$$V_F = -R_F \cdot I''_{FS} \cdot [1 + k_t(x)] \quad (5)$$

Ou seja, ao dividir a equação (5) por R_F obtem-se a equação (6)

$$I_F = -I''_{FS} \cdot [1 + k_t(x)] = I''_{SF} \cdot [1 + k_t(x)] \quad (6)$$

Na equação (5), V_F e I''_{FS} podem ser determinados por medições disponíveis localmente, obtendo-se o valor nominal das equações (7) e (8).

$$V_F = V_S \cdot \cosh \gamma x - I_S \cdot Z_c \cdot \sinh \gamma x \quad (7)$$

$$I''_{FS} = \frac{V''_S}{Z_c} \cdot \sinh \gamma x - I''_S \cdot \cosh \gamma x \quad (8)$$

Portanto, a equação (5) pode ser reescrita apenas com dados obtidos localmente, como a equação (9).

$$\begin{aligned} V_S \cdot \cosh \gamma x - I_S \cdot Z_C \cdot \sinh \gamma x &= \\ &= -R_F \cdot [1 + k_t(x)] \cdot \left(-\frac{V''_S}{Z_C} \cdot \sinh \gamma x + I''_S \cdot \cosh \gamma x \right) \end{aligned} \quad (9)$$

O que leva à equação (10).

$$R_F \cdot [1 + k_t(x)] = \frac{V_S \cdot \cosh \gamma x - I_S \cdot Z_C \cdot \sinh \gamma x}{\frac{V''_S}{Z_C} \cdot \sinh \gamma x - I''_S \cdot \cosh \gamma x} \quad (10)$$

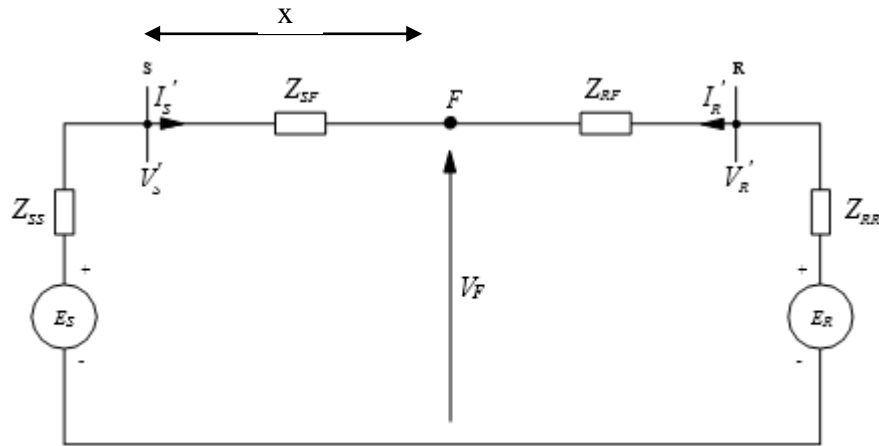
A impedância de falta é puramente resistiva, sendo $R_F = Z_C$ uma variável real. A razão $k_t(x)$ também se torna real, na condição de que a linha de transmissão seja de baixa perda e as impedâncias das fontes dos dois terminais sejam puramente indutivas. Estes fatos implicam que o lado esquerdo de (10) é um valor real. Portanto o lado direito deve também ser, para que a equação seja verdadeira. A equação (11) é a representação matemática básica do localizador .

$$\Im \left\{ \frac{A(x) \cdot V_S - B(x) \cdot I_S}{C(x) \cdot V''_S - D(x) \cdot I''_S} \right\} = 0 \quad (11)$$

Sendo $\Im[.]$ representa a parte imaginária de uma variável complexa. A solução para a equação (11) é a distância da extremidade local da linha ao ponto de falta assim como indicado por x na Figura 9, a distância do terminal S até o ponto F de ocorrência da falta. Como as equações (11) e (12) são não-lineares, é necessária a utilização de métodos indiretos ou iterativos.

Este algoritmo é um dos principais da classe de um terminal. Uma das fontes de erro é considerar o fator de distribuição real.

Figura 9 – Circuito superposto ou puro de falta



Fonte: Autoria Própria.

$$\Im \left\{ (V_S - Z_C \cdot I_S \cdot \tanh zx) \left([1 + k_t(x)] \cdot \left[I''_S - \frac{V''_S}{Z_C} \tanh zx \right] \right) \right\} = 0 \quad (12)$$

Do ponto de vista prático, a apresentação do erro pela equação (13) em quilômetros facilita o entendimento para a equipe de manutenção.

$$e(\%) = \frac{(\text{local estimado}) - (\text{local real})}{(\text{comprimento total da linha})} \cdot 100\% \quad (13)$$

Nos casos reais de curto-circuito, é calculado também o erro médio obtido pelos algoritmos, para o total de casos analisados. Isto é feito para que seja verificado o desempenho alcançado, para um conjunto de arquivos de faltas. Importantes variações no valor do erro podem ocorrer de uma falta a outra, em função de diversos fatores, como características da linha de transmissão, do curto-circuito e da precisão dos parâmetros da linha fornecidos pela concessionária (SILVEIRA, 2007).

Em Silveira (2007) foi aplicado a uma linha de transmissão (LT) de 138 kV de 200 km de extensão o algoritmo de TAKAGI, e simulada como perfeitamente transposta e não transposta, para resistência de falta de 0 ohms, para as faltas fase-fase e fase-terra com a não transposição os erros atingiram quase 5%.

Os casos analisados pelo método de TAKAGI, e pelos outros métodos de localização de faltas em linhas de transmissão utilizando um ou dois terminais apresentaram um erro final muito alto, no caso do algoritmo apresentado para falta fase-fase para uma LT de 400 km em 345 kV, no meio da linha chega a 2,5% o erro simulado por Silveira (2007), ou seja, uma

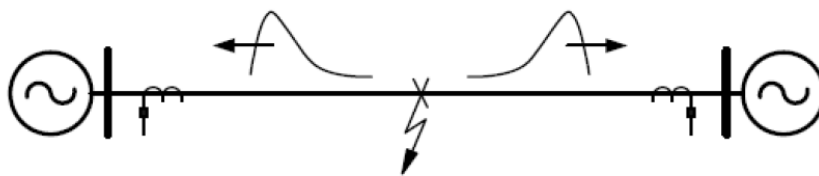
imprecisão de 20 km, o que não auxilia a concessionária na localização da falta, uma vez que linhas de transmissão tipicamente são instaladas em ambientes de difícil acesso, e erros de ordem de quilômetros precisarão de várias horas de equipes de manutenção para serem identificados e sanados. Neste cenário, os localizadores de faltas por ondas viajantes, com erros típicos menores, foram identificados como solução para localização de faltas.

3.2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS POR ONDAS VIAJANTES

Os sistemas elétricos de potência em corrente alternada possuem características de um sistema oscilatório com perdas, e nestes sistemas a energia trafega, no tempo, desde seu ponto de geração até suas extremidades de consumo. Além disso, sabe-se que uma onda é a propagação da energia em um meio, meio o qual pode ser o ar, água ou, até mesmo, um condutor de uma linha de transmissão.

Conforme Hedman (1978), a partir do momento que houver qualquer tipo de variação de corrente ou tensão elétrica em uma extremidade da LT, a outra extremidade irá verificar essa mudança somente quando a onda relativa ao sinal elétrico ocasionado por esta variação perfazer toda a distância da linha. Essa transferência de energia de um ponto a outro ocorre através das chamadas ondas viajantes assim como apresentado pela Figura 10.

Figura 10 - Frentes de ondas viajantes ocasionadas por uma falta



Fonte: Saviato (2014).

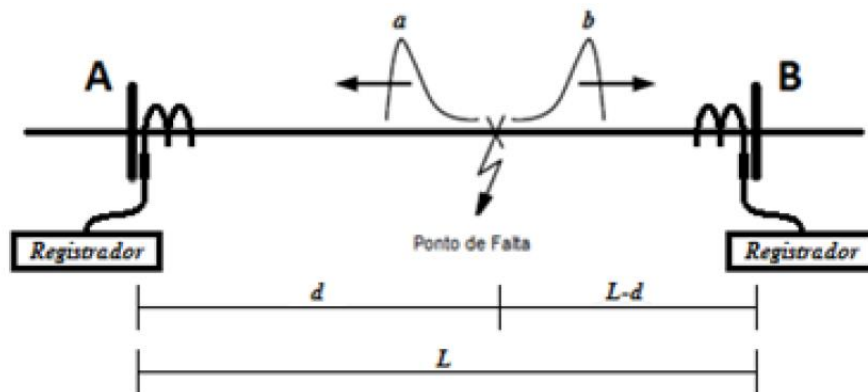
Qualquer não conformidade em uma LT, seja provocado por curto-circuito, raios ou alterações no regime permanente, origina ondas que trafegam na linha. O deslocamento dessas acontece do ponto onde ocorreu tal discontinuidade ao sentido das extremidades da LT, com uma velocidade que depende do dielétrico da linha, refletindo e refratando à medida que encontram interferências físicas. Este processo persiste até que a amplitude das ondas, devido às atenuações provocadas por perdas na linha de transmissão, seja pequena o suficiente para ser considerada insignificante (Greenwood, 1971).

A localização de faltas por ondas viajantes, que se utiliza do fenômeno de detecção

destas frentes de onda ao invés de cálculo de impedância ou medição de fasores para determinação do ponto de falta na linha, tem sido utilizada com êxito em linhas de transmissão de extra-alta-tensão em todo o mundo a décadas. Várias técnicas para a localização de faltas têm fomentado estudos técnicos especializados, inclusive dentro de organizações como o Cigré, utilizando dados de um ou dois terminais da LT.

Segundo Jensen (1996), com um sistema de localização de faltas utilizando dados provenientes de registradores localizados nos dois terminais da LT, a localização da falta é concluída através dos registros dos horários em que as primeiras frentes das TW, originadas por uma falta, sensibilizam os dois pontos de monitoração, um no início e outro no final do trecho monitorado da linha de acordo com a Figura 11.

Figura 11 - Momento da ocorrência da falta



Fonte: Saviato (2014).

Assumindo que o horário em que ocorreu o primeiro registro da onda viajante é o h_a , o horário do segundo registro da onda viajante é o h_b e o horário que a falta ocorreu é o h_f , pode-se concluir o apresentado pela equação (14) e (15).

$$t_a = h_a - h_f \quad (14)$$

$$t_b = h_b - h_f \quad (15)$$

Igualando as equações (14) e (15) temos as equações (16) e (17):

$$h_a - t_b = h_b - t_a \quad (16)$$

$$h_a - h_b = t_a - t_b = t_d \quad (17)$$

Assim, ta é o tempo, em segundos, que a onda a levou para percorrer a distância do local da falta até o terminal A e tb é o tempo, em segundos, que a onda b levou para percorrer a distância do local da falta até o terminal B , ou seja, uma onda percorreu uma distância d quilômetros em ta segundos e a outra, uma distância $L - d$ quilômetros em tb segundos. Desse modo, a distância d pode ser calculada pela equação (19) a partir da manipulação da equação (18).

$$Vm = k \cdot c = \frac{d-(L-d)}{ta-tb} = \frac{2d-L}{td} \quad (18)$$

$$d = \frac{L + k \cdot c \cdot td}{2} \quad (19)$$

Para que o método tenha sucesso, é necessário que os registradores estejam sincronizados temporalmente. Pode-se utilizar de um relógio GPS em cada terminal da LT para proporcionar a mesma base de tempo para os registradores, de maneira que ambos os registradores possuirão a estampa de tempo única proveniente dos sinais do GPS.

O relógio GPS disponibiliza um sinal de referência temporal, transmitido via satélite, o qual sua precisão determinará a máxima precisão do localizador de faltas. Considerando uma onda trafegando na velocidade da luz, com um erro de estampa de tempo ¹ por imprecisão do relógio GPS de 1 μ s, tem-se que o localizador terá aproximadamente 300 m de imprecisão na localização da falta assim como indicados alguns exemplos na Tabela 1.

Tabela 1– Principais fabricantes de localizadores de faltas por ondas viajantes

Fabricante	Modelo	Precisão (m)
Reason	RPV311	+/- 60
SEL – Schweitzer	SEL-411L	+/- 300
Rochester	TR-2000	Não informado no Datasheet
Qualitrol	TWS	+/- 150

Fonte: Autoria própria

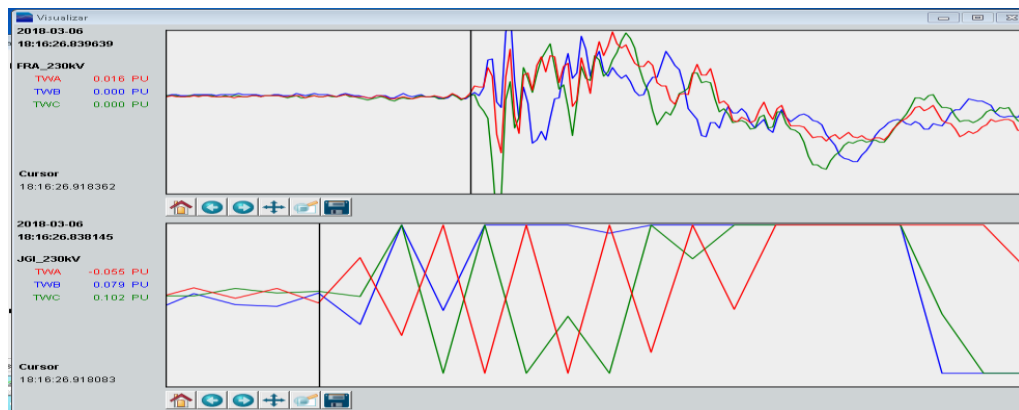
O primeiro parâmetro que precisa ser conhecido é o comprimento exato dos condutores entre os equipamentos localizadores de falta (o parâmetro L), incluindo-se ali o comprimento dos cabos internos da subestação onde o equipamento está instalado. O segundo parâmetro é o fator k , o qual depende de fatores físicos como a isolamento da linha de transmissão, o material e

¹ Estampa de tempo ou timestamp é uma cadeia de caracteres denotando a hora ou data que certo evento ocorreu

as dimensões dos condutores da linha de transmissão considerada. Este fator reflete a relação entre a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no condutor e no vácuo (SAVIATO, 2014).

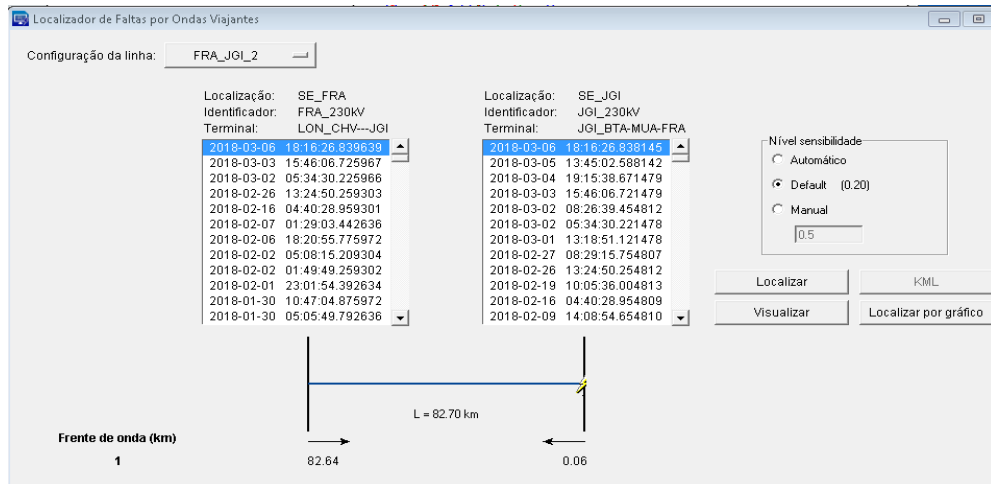
A localização de faltas com a utilização de TW atualmente é feita por meio de softwares de análise automática da falta e de sua localização. As Figuras 12 e 13 exemplificam como é a visualização da interface do software para a localização de ondas viajantes.

Figura 12 – Onda viajante ampliada, capturada por um RDP



Fonte: Krefta (2018).

Figura 13 – Localização de falta aplicada em onda viajante capturada por RDP



Fonte: Krefta (2018).

4 ESTUDO DE CASO

Com o advento da proteção digital, algoritmos de localização de faltas têm sido desenvolvidos com o objetivo de melhorar a precisão nos resultados. O desafio é grande, pois diversos fatores podem contribuir para erros de localização. Além disso, faz-se necessária a adaptação dos localizadores ao sistema elétrico, visando à redução de custos e facilidade de operação (SILVEIRA, 2007).

No estudo de caso a seguir será apresentada uma análise prática de uma perturbação de ocorrência na Copel, os dados e informações técnicas referentes à Copel foram obtidos de Krefta et al. (2018), os quais foram recebidos autorização para replicação e estudo conforme Krefta (2021). Neste caso serão utilizadas algumas tecnologias de monitoramento assim como RDP, medição sincrofasorial (PMU) e ondas viajantes, para garantir a qualidade do diagnóstico. Além disso serão apresentados os benefícios de se ter múltiplos recursos de análise disponíveis aos operadores e engenheiros de sistemas de proteção.

O estudo de caso a seguir será uma revisão e releitura de um caso estudado por Krefta (2018) e, portanto, os dados utilizados trabalhados referem-se ao artigo publicado por este.

4.1 COPEL – LT BATEIAS/PONTA GROSSA SUL 230 kV

A concessionária Copel possui sistemas de geração, transmissão e distribuição e está localizada no Sul do Brasil. O Sistema de Energia Elétrica em operação da Copel quando o estudo foi publicado era composto por 55 subestações com 10 linhas de transmissão (LT) de 525 kV, 67 LT de 230 kV e 4 LT de 138 kV. Além disso, há seis usinas hidrelétricas acima de 100MVA, oito abaixo de 30 MVA, uma usina térmica acima de 100 MVA e três parques eólicos. O comprimento das LTs da Copel varia de 0,6 km a 334,3 km. O sistema de localização de faltas (TW) está disponível em todas as linhas de transmissão. O Sistema de Monitoramento de Ampla Área (WAMS) da Copel possui 37 PMU distribuídos em todo o Estado do Paraná, sendo prevista ampliação futura para mais de 250 PMU.

- PMU – As unidades de medição fasorial (PMU) dão uma contribuição valiosa para o monitoramento dinâmico de processos transitórios em sistemas de fornecimento de energia. Esses dados são a base para sistemas de monitoramento, proteção e controle de área ampla. Este sistema de monitoramento rápido detecta os eventos e tendências em grades com fluxos de carga flutuantes ou li-

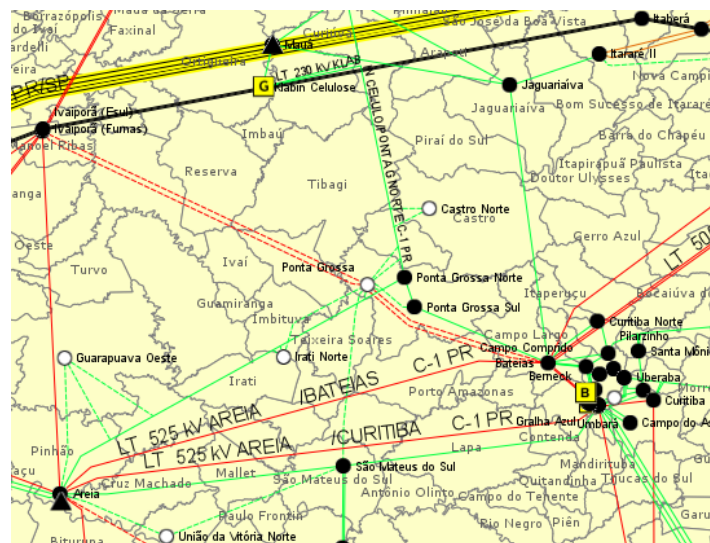
nhas altamente carregadas que os sistemas convencionais não podem detectar ou podem detectar tarde demais (SIEMENS, 2021).

- WAMS - é uma tecnologia para monitorar a dinâmica do sistema de energia em tempo real, identificar fraquezas relacionadas à estabilidade do sistema e ajudar a projetar e implementar medidas contrárias. Ele usa sinal de satélite do sistema de posicionamento global (GPS) para sincronizar o tempo das unidades de medição fasorial (PMU) em nós, importantes no sistema de energia e envia dados fasoriais em tempo real (ângulo e magnitude) para um Centro de Controle. Os dados do fasor adquiridos fornecem informações dinâmicas sobre os sistemas de energia, que ajudam os operadores a iniciar ações corretivas para aumentar a confiabilidade do sistema de energia (MAHESWARI. 2021).

Com a ajuda das ferramentas descritas acima, será esclarecida a ocorrência e o restabelecimento do sistema elétrico da região de Ponta Grossa devido ao desligamento automático dos 230 kV Areia-Ponta Grossa Norte (ARE/PGN 230 kV) e 230 kV Bateias-Ponta Grossa Sul (BTA/PGS 230 kV) e consequente queda de tensão de carga nas subestações Ponta Grossa Sul 230 kV (SE PGS 230 kV) e Ponta Grossa Norte 230 kV (SE PGN 230 kV), ocorrida em 17/10/2016 às 13h09min.

A Figura 14 mostra a região geográfica de Ponta Grossa e as subestações envolvidas na ocorrência.

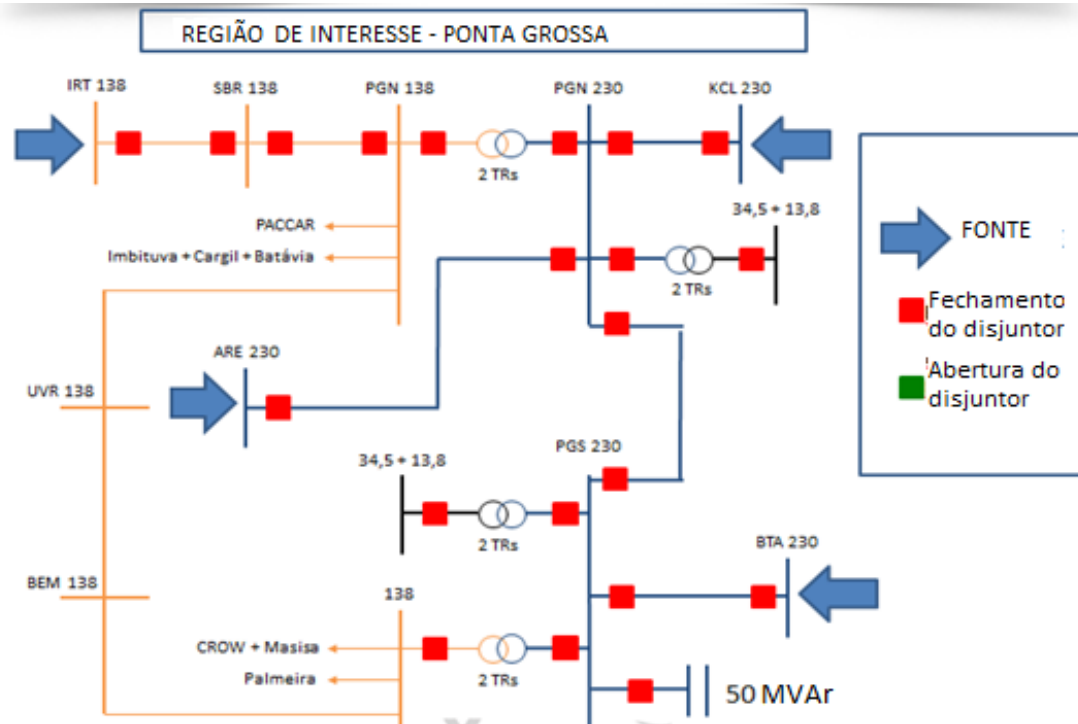
Figura 14 – Região geográfica de Ponta Grossa



Fonte: SINDAT (2021).

A Figura 15 mostra as fontes e subestações envolvidas na perturbação e na configuração normal do sistema de operação.

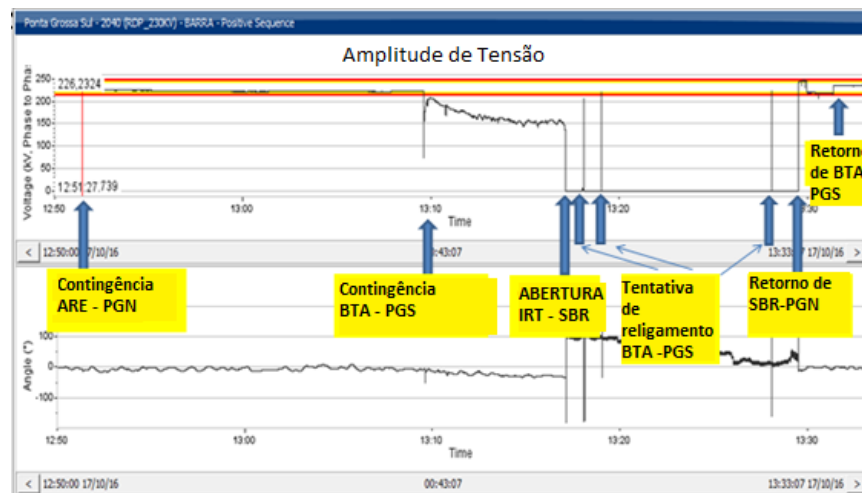
Figura 15 – Diagrama elétrico da região afetada em operação normal



Fonte: Krefta et al. (2018).

Utilizando dados do *Phasor Data Concentrator* (PDC), a Figura 14 mostra o perfil de tensão registrado pela Copel WAMS durante todo o período de falha e as tentativas de restauração do sistema. A Sequência de Eventos (SOE) foi obtida do Sistema Supervisório (SCADA) e, de acordo com o tempo de abertura dos disjuntores, foi possível identificar cada etapa do evento no gráfico de tensão. Assim, pode-se observar, na Figura 16, a queda de tensão exponencial no barramento 230 kV de Ponta Grossa Sul sendo sustentada pela alimentação do capacitor do barramento conectado pelo sistema de 138 kV conectado no barramento no secundário dos dois transformadores de interconexão (230 / 138 kV - 150 MVar) após a abertura da LT 230 kV Bateias / Ponta Grossa Sul. Por meio dessa visão geral da perturbação e de outras ferramentas é possível entender cada evento individual assim como pela utilização dos dados da Figura 16 (KEFTA, 2018).

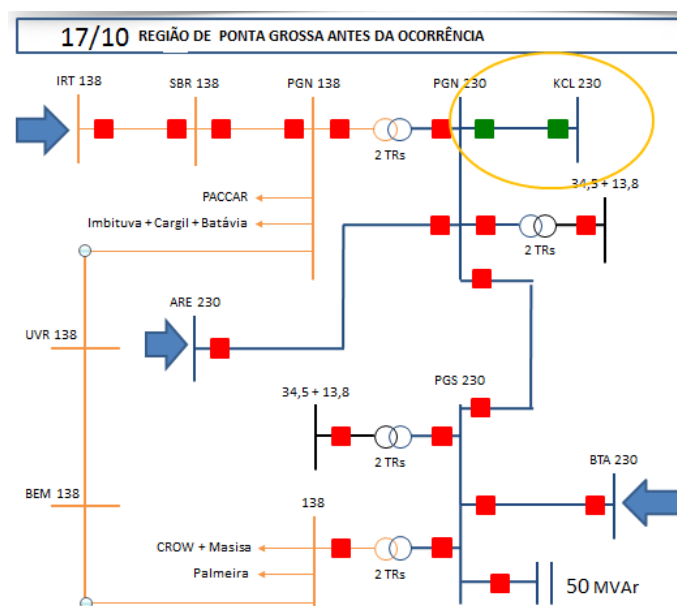
Figura 16 – Perfil de tensão registrado pela Copel (PDC) WAMS



Fonte: Krefta et al. (2018).

Em 17/10/2016 o sistema de Ponta Grossa operava sem a linha 230 kV KCL/PGN. Esta linha de transmissão estava aberta e aterrada sem possibilidade de retorno. Assim, o sistema foi sustentado pelas linhas 230 kV PGN/ARE e BTA/PGS. Além disso, sistema estava conectado ao lado da barra de 138 kV da subestação PGN. A Figura 17 mostra o diagrama operativo no momento da falta em análise.

Figura 17 – Diagrama antes do início da ocorrência



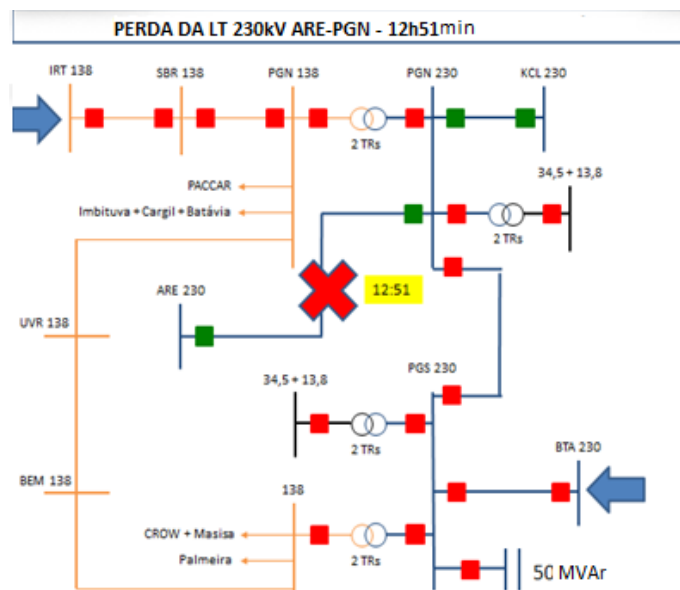
Fonte: Krefta et al. (2018).

Às 12h51min daquele dia a linha 230 kV ARE/PGN foi aberta, o que produziu uma

sobrecarga na LT BTA/PGN de 230 kV, sobrecarga essa que aumentou a flecha da linha momentaneamente, fazendo com que o cabo tocasse uma árvore próxima. As correntes máximas permitidas são de 439 A a 583 A e a corrente medida naquele momento era de 410 A. Após este evento, foram verificados problemas com este cabo, como será discutido nos tópicos seguintes.

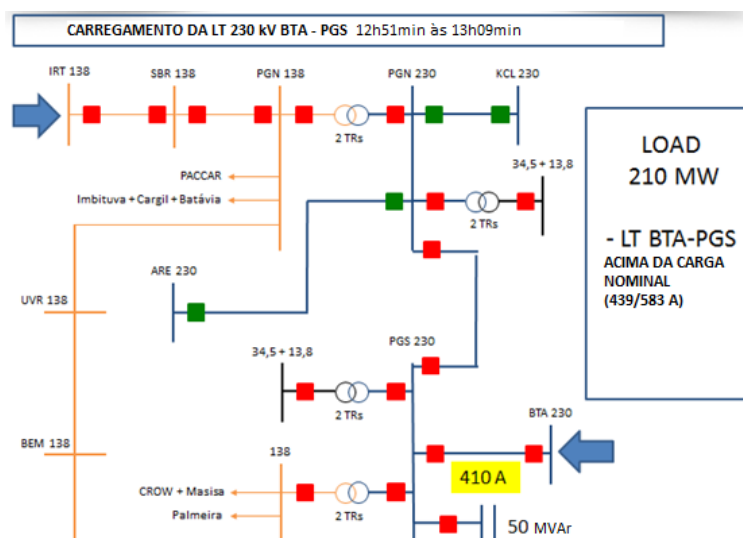
As Figuras 18 e 19 mostram o diagrama das linhas envolvidas.

Figura 18 – Perda LT ARE/PGN 230 kV as 12h51



Fonte: Krefta et al. (2018)

Figura 19 – Valores de sobrecarga da LT 230 kV BTA/PGS

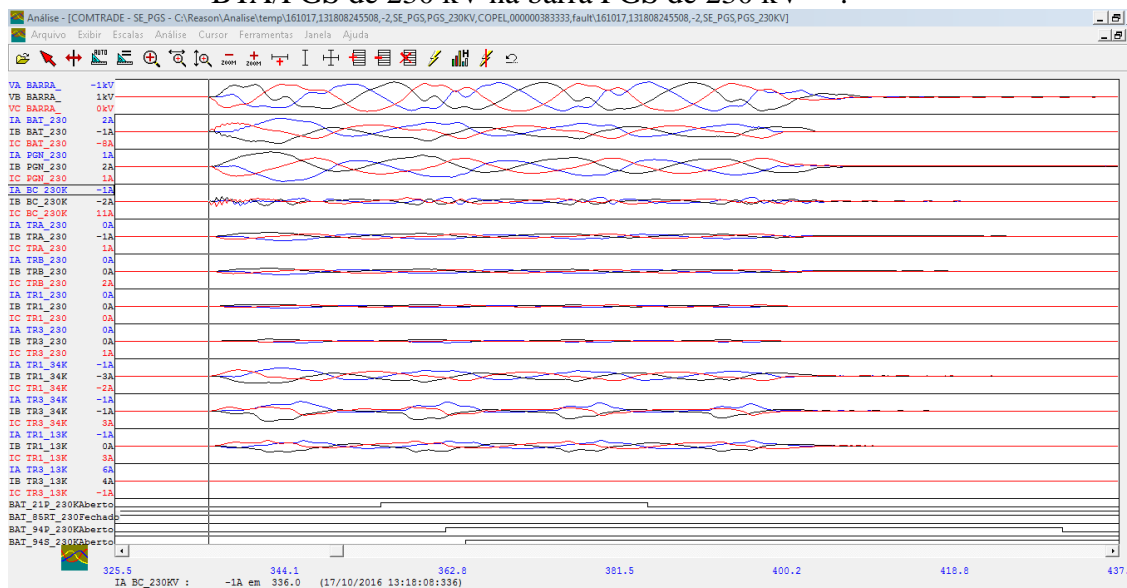


Fonte: Krefta et al. (2018).

Após a abertura de todas as linhas de transmissão de 230 kV, o sistema Ponta Grossa foi alimentado pelo sistema 138 kV conectado na barra da subestação ponta Grossa Norte. A linha 138 kV LT IRT/SBR não suportou essa contingência e abriu isolando todo o sistema de Ponta Grossa.

Um religamento automático e três tentativas manuais foram feitas para restabelecer a linha de 230 kV BTA/PGS, sem sucesso. O disjuntor do banco capacitor de 230 kV da subestação PGS não aceitou o comando de abertura e, quando o comando do circuito BTA de 230 kV da subestação PGS recebeu o comando para fechar, o relé de proteção da linha enviou um sinal de comando (*trip*) para abrir por causa da corrente de energização (*inrush*) capacitiva, como mostrado na Figura 20. Somente quando a barra 230 kV da subestação PGS foi energizada pelo lado da barra de 138 kV, o disjuntor do banco do capacitor aceitou o comando de abertura. Logo depois, foi colocado em operação o sistema 230 kV e o sistema de Ponta Grossa foi restaurado.

Figura 20 – A carga de frio capacitiva inrush durante o religamento manual do TL BTA/PGS de 230 kV na barra PGS de 230 kV .



Fonte: Krefta et al. (2018).

4.2 FALHA DO RELIGAMENTO AUTOMÁTICO (79) DO LT BTA/PGS DE 230 kV APÓS A PRIMEIRA FALTA (13h9min)

O circuito PGS de 230 kV na subestação BTA de 230 kV aceitou o comando automático para fechar, enviado pelo relé de função 79. Mas o lado na subestação PGS de 230 kV não. As

condições para religar o disjuntor automaticamente do lado da subestação PGS de 230 kV foram de acordo com a configuração do relé 79, como mostrado na Figura 21, ou seja, com ângulo entre +20 e -20 graus e tensão nominal. As condições do sistema local, como mostrado nas Figuras 17 e 18 retiradas do histórico do PDC, indicaram que o relé 79 falhou devido à diferença entre as frequências (DELTA F) foi de 57 mHz, ou seja, 0,7 mHz acima do conjunto de 50 mHz .

Uma das vantagens do sistema de alimentação do PMU é medir o ângulo real de tensão do sistema. O WAMS em operação na Copel refere-se ao ângulo medido da barra da subestação BTA de 525kV. A causa mais comum de falha atribuída ao relé 79 é a abertura angular do sistema; a verdadeira causa foi a diferença de frequência entre as barras.

Figura 21 – Configurações do Relé 79

```
651310-7 RELE,SINCRONISMO DIGITAL;MLJ1007B010H00C
UNIDADE DE VERIFICACAO DE SINCRONISMO
1-1:DELTA V.....90V
1-2:DELTA TETA.....40GRAUS
1-3:DELTA F.....50MILIHERTZ
1-4:T CONT.....4,5S
1-5:T MAN.....4,5S
2-1:SUP 27 ON-OFF.....ON (HABILITADO)
2-2:SUP 27.....30V
4-1:25 ON-OFF.....ON (HABILITADO),
```

Fonte: Krefta et al. (2018).

Com o auxílio de PMU, foi possível determinar as condições reais do sistema no momento em que o relé 79 deve ter que comandar o disjuntor para fechar.

- Condições de sincronização na subestação BTA 230 kV

$f = 60,0113$ Hz;

$V = 242,94$ kV;

$f = 2,35$ graus.

- Condições de sincronização na subestação PGS 230 kV

$f = 60,0056$ Hz;

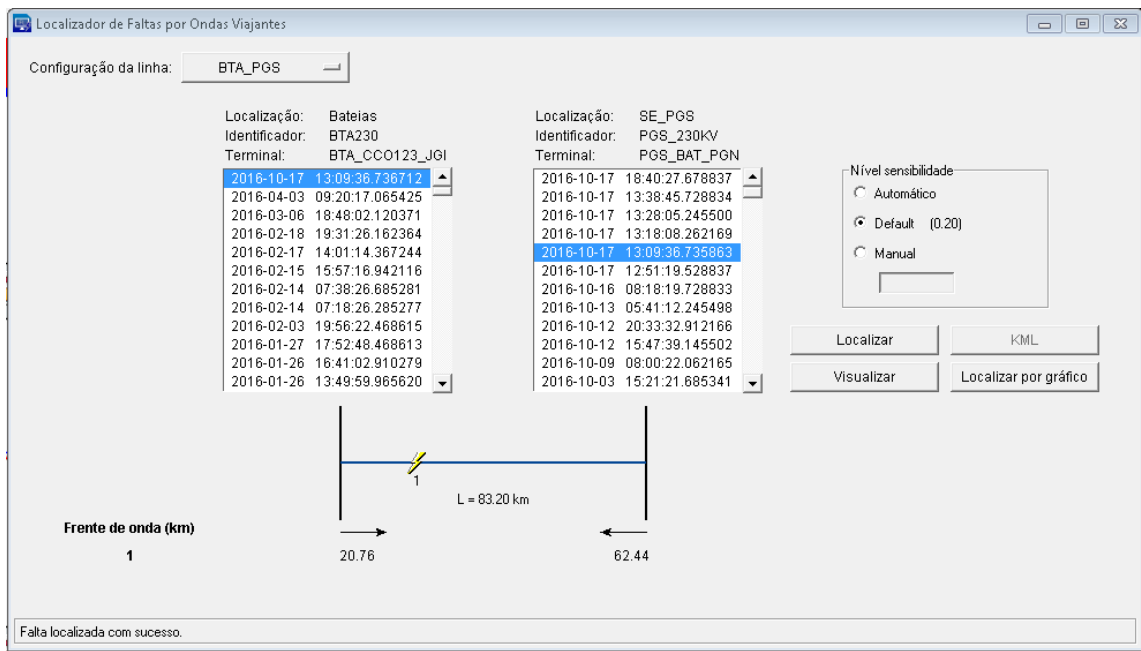
$V = 150.395$ kV;

$f = -18,26$ graus.

4.3 LOCALIZAÇÃO DO RESULTADO EM 230 kV LT BTA/PGS NA PRIMEIRA FALHA (13h09min)

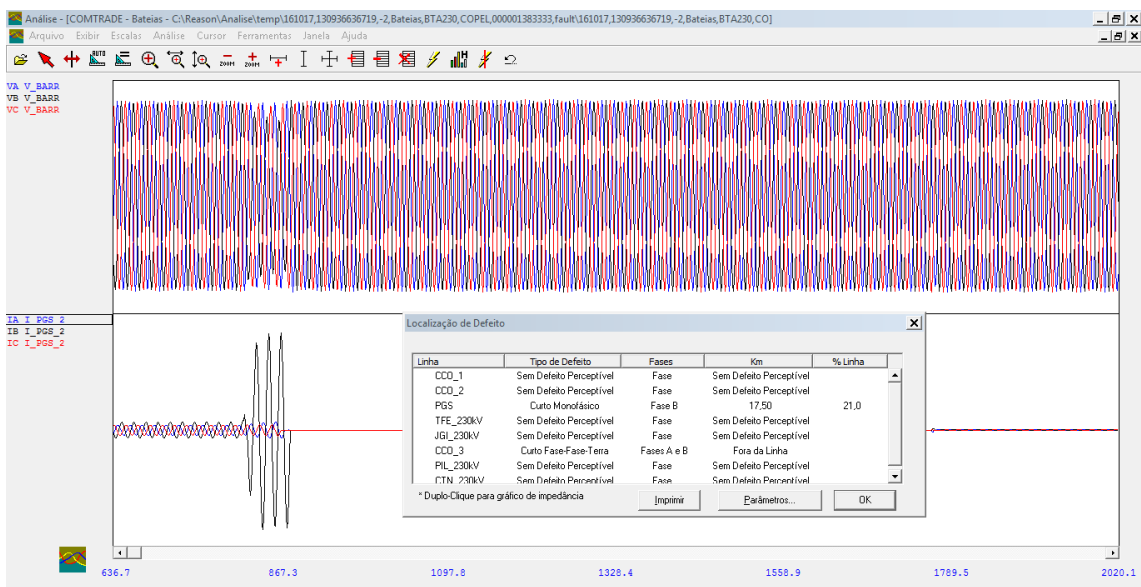
Os dados da oscilografia, como mostrado nas Figuras 22 e 23, indicam que houve uma falha de fase B na Terra na linha 230 kV BTA/PGS cuja localização foi a 17,5 km usando um método de um terminal e 20,76 km usando o método TW. A falha foi facilmente localizada a 20,34 km da subestação BTA de 230 kV e foi causada por uma árvore sob a linha de transmissão.

Figura 22 – Localização de faltas pelo método de TW



Fonte: Krefta et al. (2018).

Figura 23 – Localização de faltas pelo método de um terminal



Fonte: Krefta et al. (2018).

Segundo relatório apresentado na Figura 24 do Instituto de Meteorologia do Paraná Simepar, as condições atmosféricas não influenciaram o desligamento da linha BTA/PGS de 230 kV.

Figura 24 – Relatório SIMEPAR



Curitiba, 21 de outubro de 2016

LT 096/16

LAUDO METEOROLÓGICO

Solicitante: COPEL/GET/Centro de Operação da Geração e Transmissão

Em consulta ao banco de dados do Sistema Meteorológico do Paraná, foi constatado que no final da tarde e noite do dia 17 de outubro de 2016 áreas de instabilidade, associadas ao tempo abafado, provocaram pancadas de chuva e descargas atmosféricas entre a região de Ponta Grossa e Campo Largo, no centro-leste do Paraná.

As estações meteorológicas e pluviométricas mais próximas da região (Ponta Grossa e Balsa Nova) registraram pouca chuva no referido dia (3,4 mm de chuva em Balsa Nova durante a noite). As rajadas de vento, em Ponta Grossa, alcançaram os 49,3 km/h entre as 22 e 23 horas. No início da tarde as rajadas de vento foram moderadas, com valores entre 31,3 km/h e 39,6 km/h (entre as 12 e 14 horas).

Já com base nas informações do radar meteorológico do Simepar, foram registradas pancadas de chuva mais fortes, com ventos estimados de até 66,6 km/h, no município de Campo Largo (Bateias) entre as 19 e 20 horas do dia 17/10/2016 (Figura 1).

Já o Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas (SDDA) registrou a ocorrência de vários eventos (descargas atmosféricas) entre a região de Ponta Grossa e Campo Largo, mas todos ocorridos na noite do dia 17/10/2016 (Figura 2).

Atenciosamente,

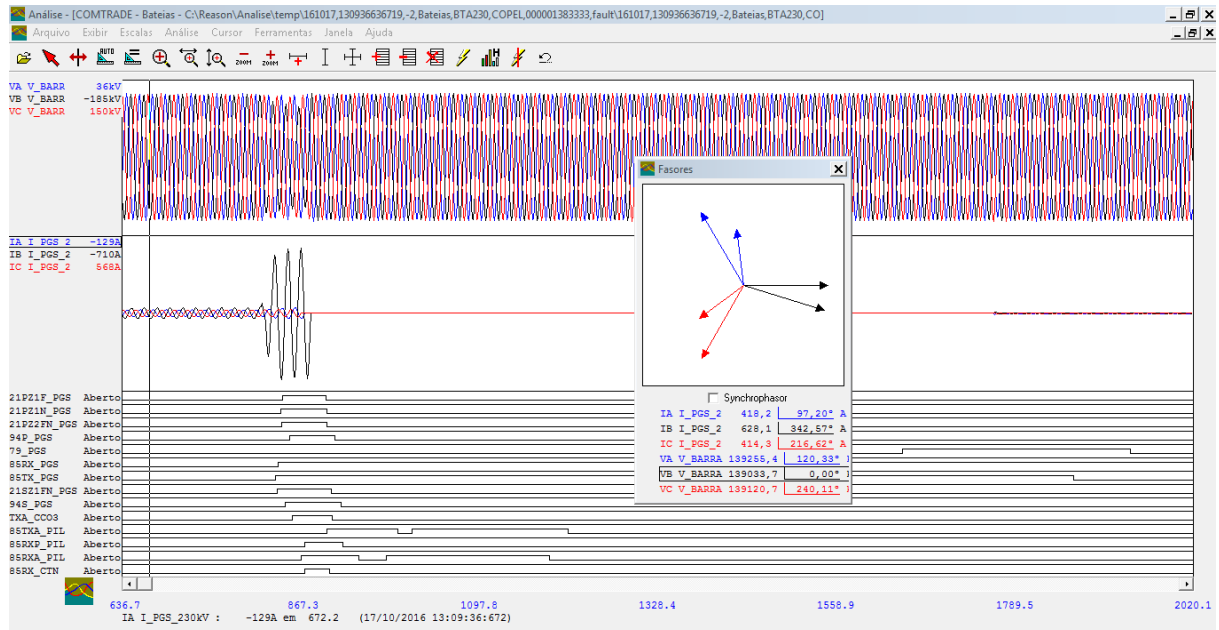
Samuel Braun
Meteorologista SIMEPAR
CREA RS-69335/D

Fonte: Krefta et al. (2018).

Na oscilografia (Figura 25) verificou-se que a corrente da fase B antes da falha, é desequilibrada, ou seja, com desequilíbrio maior que 100 A, e as outras fases são 418 A. Como a temperatura de funcionamento normal a 55 °C permite uma corrente de até 439 A e em uma emergência a 75 °C permite uma corrente de 583 A, o limite de operação teórico não foi violado. Esta linha de transmissão está em operação desde 23/10/1965 (CAR 666-611900),

estando comprometida em estado de *creeping*². Assim, sua flecha em regime está maior que a de projeto, o que justifica o toque do cabo na árvore durante o período no qual a corrente ficou maior que em regime normal.

Figura 25 – Gravação do circuito 230 kV PGS pelo lado 230kV BTA



Fonte: Krefta et al. (2018)

A Figura 26 mostra os valores característicos de impedância dos cabos LT BTA/PGS de 230 kV medidos online pelo PDC.

Os valores calculados são:

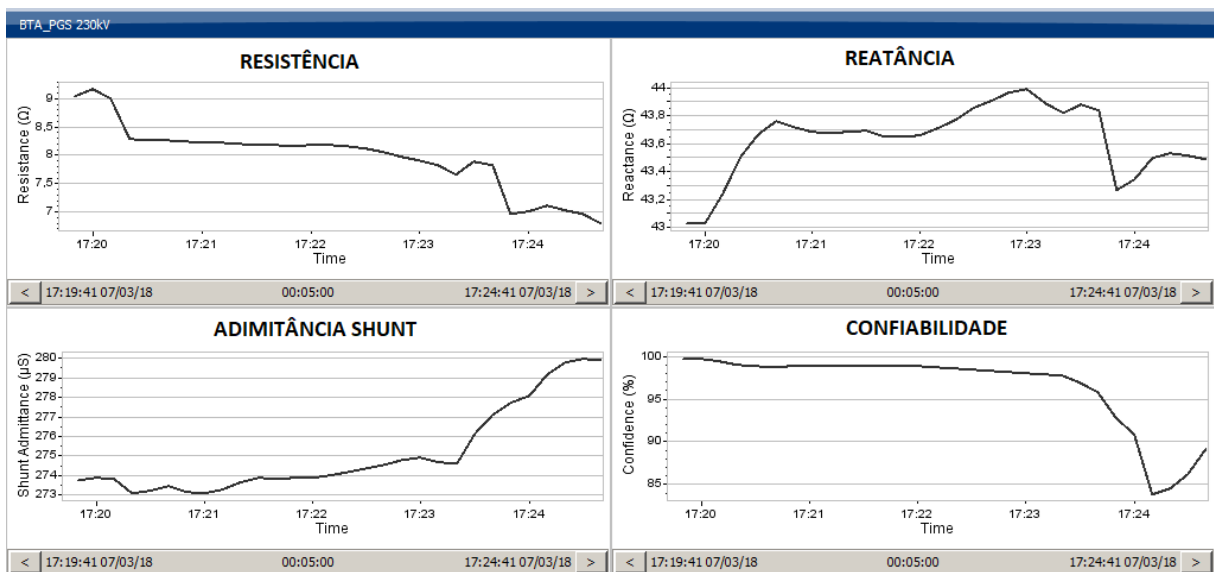
$$R1 = 8,4 \Omega;$$

$$X1 = 42,6 \Omega;$$

$$B1 = 268,6 \mu S$$

² *Creeping* é definido como o fenômeno de dilatação do cabo após o nivelamento ao longo do tempo (VILELA, 2001).

Figura 26 - Valores das características de impedância dos cabos LT 230 kV BTS / PGS medidos online pelo PDC



Fonte: Krefta et al. (2018).

Comparando os valores calculados e os medidos por sincrofasores é possível verificar se as características elétricas do cabo são as mesmas e não há erro no cálculo da ampacidade desta LT. Então fica evidente que o problema não é elétrico, é mecânico devido ao *creeping* e envelhecimento do cabo..

5 CONCLUSÃO

O aumento da complexidade dos sistemas de energia elétrica está levando as concessionárias a buscarem ferramentas e tecnologias mais aperfeiçoadas para operar de forma segura e adequada a tais sistemas. Este trabalho apresentou os conceitos e aplicações do RDP a partir de uma revisão histórica do surgimento deste equipamento e da conceituação de como este é utilizado principalmente com a função de TW para localização de faltas e por meio da análise de falhas reais no sistema da concessionária paranaense Copel utilizando as ferramentas atualmente disponíveis para operadores e engenheiros de proteção.

Cada ferramenta é mais bem direcionada para uma situação específica na operação do sistema de potência. Conforme mostrado na não conformidade da LT BTA/PGS, a qual foi identificada por meio da detecção de faltas por TW, a ocorrência de *creeping*, para localização rápida e precisa de uma falta, pode-se usar um localizador de falta de onda viajante que retornará à localização correta da falta com grande precisão, normalmente centenas de metros ou menos, e confiabilidade em comparação com métodos baseados na impedância de registros de um RDP.

Assim, pode-se entender que, quanto mais uma determinada concessionária utilizar as diferentes ferramentas atuais disponíveis para garantir o desempenho do sistema, mais eficaz será o trabalho do engenheiro de proteção e mais protegidos estarão os sistemas de suprimento de energia elétrica.

Diante do tema pesquisado, foi constatada que a solução que utiliza registradores digitais de perturbações com TW proporcionam maior confiabilidade ao sistema de transmissão de energia, além de que, devido a redução do tempo de indisponibilidade do sistema de transmissão, há a diminuição dos altos valores pagos em multas dadas pela indisponibilidade do sistema e faz com que de forma rápida haja o retorno do investimento.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Resolução normativa ANEEL nº 115**. Brasil, de 29 de novembro de 2004. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-normativa-115-2004_100415.html. Acesso em: 18 nov. 2020.
- BARRETO, E. O. **Avaliação de algoritmos para localização de faltas em redes elétricas**. Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003. Disponível em: https://attena.ufpe.br/bitstream/123456789/5585/1/arquivo7020_1.pdf. Acesso em: 18 nov. 2020.
- Blackburn, J.L., & Domin, T.J. **Protective relaying: principles and applications**. 3. ed. CRC Press. Boca Raton, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781420017847>. Acesso em: 05 jun 2021.
- BRASIL. **Lei nº 10.848**, de 15 de março de 2004. Diário Oficial da União. Brasil, 2004.
- BRITO, C. **Revitalização do sistema de oscilografia de proteção da UHE Tucuruí**. UFPA, 2016. Disponível em: https://silo.tips/queue/catalogo-de-trabalhos-de-conclusao-de-curso-camtuc-ufpa?&queue_id=-1&v=1651543456&u=MjgwND03ZjA6YmQ0MDplNGI3OmYwNjc6NzM1YzpkZDJhOmU2ZDE=. Acesso em: 18 nov. 2020.
- COSTA, E. **Desenvolvimento de um registrador de perturbação nos sistemas elétricos**. Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, Brasil 1991. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4100>. Acesso em: 05 jun 2021.
- COSTA, E. *et al.* **Desenvolvimento de um registrador digital de perturbação nos sistemas elétricos**. 8º Congresso Brasileiro de Automática, setembro, pp 902-907, 1990
- COSTA, F. B. **Uma técnica de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios baseada na transformada *Wavelet* para uso em registradores digitais de perturbação**. Campina Grande, 2010.
- GREENWOOD, A. **Electrical transients in power systems**. Wiley-Interscience: New York, 1971.
- HEDMAN, D. E. **Teoria das linhas de transmissão II**. Tradução FARRET, F.A., Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1978.
- JENSEN R.; GALE P. **Locate faults by recording traveling waves**. Electrical World, 1996.
- KREFTA, G. F. (comunicação pessoa, 23 abr. 2021).
- KREFTA, G. F. *et al.* **Fault investigation using data from PMU, DFR and Traveling-Wave fault locators: experiences from Companhia Paranaense de Energia (COPEL) on combining these tools for optimal fault analysis**. COPEL: Brasil, 2018.

MAHESWARI, M. *et al.* **Wide-area measurement systems and phasor measurement units**. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-54275-7_4. Acesso em: 05 jun 2021.

MARKETSANDMARKETS. **Digital fault recorder market by type (dedicated and multifunctional), installation (generation, transmission, and distribution), station (nonautomated and automated), voltage (less than 66 kv, 66–220 kv, and above 220 kv): global forecast to 2023**. 2017. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-fault-recorder-market-49842728.html>. Acesso em: 21 mar. 2021.

MORDOR INTELLIGENCE. **Digital Fault Recorder Market: growth, trends, covid-19 impact, and forecasts (2021 - 2026)**. 2020. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/digital-fault-recorder-market>. Acesso em: 21 mar. 2021.

MORETO, M.; ROLIM, J. G. **Análise automática de oscilografias em sistemas elétricos de potência**. São Paulo: Revista Controle & Automação, v.21, n.4. 2010.

ONS. **Procedimentos de Rede**. Brasil, 17 de junho de 2009 Disponível em: http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2011%2FSubm%C3%B3dulo%2011.6%2FSubm%C3%B3dulo%2011.6_Rev_1.0.pdf. Acesso em: 18 nov. 2020.

ONS. **Submódulo 11.6 oscilografia de curta e longa duração**. Brasil, 25 de março de 2002. Disponível em: http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2011%2FSubm%C3%B3dulo%2011.6%2FSubm%C3%B3dulo%2011.6_Rev_0.0.pdf. Acesso em: 09 fev. 2021.

PEREIRA, I. H. **Localização automática de faltas em linhas de transmissão com informações dos dois terminais**. Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia Elétrica–UFMG, Belo Horizonte, 2004.

RODRIGUES, M. A. M. *et al.* **Ferramentas computacionais tradicionais e inteligentes para a análise de perturbações me sistemas de potência**. *In*: XIV Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, Belém, 1997.

SANTOS, V. G. **Segmentação automática de registros de oscilografia fasorial com ênfase em sistemas de geração**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/14996/3/PB_COELT_2014_2_09.pdf. Acesso em: 09 fev. 2021.

SAVIATO, J. **Análise comparativa de localizadores de faltas por ondas viajantes utilizando dados provenientes de um ou dois terminais de uma linha de transmissão**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

SIEMENS. **Phasor measurement unit (PMU)**. Disponível em: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control/general-protection/phasor-measurement-unit-pmu.html>. Acesso em: 05 jun. 2021.

SILVA, S. S. B. **Substituição de oscilógrafos convencionais por registradores digitais de**

perturbação – Dificuldades e soluções. A experiência da CHESF, SNPTEE. CGTI – Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação, 2001. Disponível em: <http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/02/SUBSTITUIC%CC%A7A%CC%83O-DE-OSCILO%CC%81GRAFOS-CONVENCIONAIS-POR-REGISTRADORES-DIGITAIS-DE-PERTURBAC%CC%A7A%CC%83O-%E2%80%93-DIFICULDADES-E-SOLUC%CC%A7O%CC%83ES-%E2%80%93-A-EXPERIE%CC%82NCIA-DA-CHESF.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2021.

SILVEIRA, E. G. da. **Localização de faltas em linhas de transmissão**: desenvolvimento de novos algoritmos e implementação de sistema computacional para aplicações práticas. Dissertação de Pós-Graduação – UFMG, Belo Horizonte, 2007.

TANG, Y.; WANG H. F.; AGGARWAL, R. K.; JOHNS A. T. **Fault location in transmission and distribution systems**: proceedings of electric utility deregulation and restructuring and power technologies. IEEEExplore, 2000. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/855670>. Acesso em: 05 jun. 2021.

VILELA, R. **Identificação de perigos na recapitação de linhas de transmissão**. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5722/1/arquivo7314_1.pdf Acesso em: 14 set. 2021.

ZAHRA, F. JEYASURYA, B.; QUAICOE, J. E. **High-speed transmission line relaying using artificial neural networks** – Electric power systems research. ScienceDirect, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779699000589>. Acesso em: 09 fev. 2021.

ZAMBONI, L. **Fault detection and location in power distribution systems using intelligent approach based in spectral signal analysis**. Thesis PhD – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2013.