



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RYAN NORIYUKI FERREIRA MENDORI

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MURRAY NA PRÉ-LOCALIZAÇÃO DE FALHAS
EM CABOS ISOLADOS EM REDES DE MÉDIA TENSÃO**

NATAL/RN

Julho de 2025

RYAN NORIYUKI FERREIRA MENDORI

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MURRAY NA PRÉ-LOCALIZAÇÃO DE FALHAS
EM CABOS ISOLADOS EM REDES DE MÉDIA TENSÃO**

Monografia apresentada ao Curso de graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Natal, Julho de 2025

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Mendori, Ryan Noriyuki Ferreira.

Aplicação do método de Murray na pré-localização de falhas em cabos isolados em Redes de Média Tensão / Ryan Noriyuki Ferreira Mendori. - 2025.

45 f.: il.

Monografia (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Natal, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Arrhenius Vinicius da Costa Oliveira.

1. Cabos isolados - Monografia. 2. Pré-localização de falha - Monografia. 3. Média tensão - Monografia. 4. Ponte de Murray - Monografia. I. Oliveira, Arrhenius Vinicius da Costa. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.3

Elaborado por Jackeline dos Santos Pinheiro da Silva Maia
Cavalcanti - CRB-15/317

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

RYAN NORIYUKI FERREIRA MENDORI

Esta Monografia foi julgada adequada para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, sendo aprovada em sua forma final pela banca examinadora:

Prof. Arrhenius Vinicius da Costa Oliveira, Dr.
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Presidente da Banca Examinadora

Prof.^a Crisluci Karina Souza Santos Candido, Dra.
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Examinadora

Prof. José Luiz Da Silva Junior, Dr.
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Examinador

Natal, Julho de 2025

Dedico este trabalho à minha família e à minha esposa, Luara.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a meus pais, por me darem todo o suporte durante minha vida para que eu pudesse chegar a esse momento.

Agradeço também a minha esposa Luara, por me apoiar no decorrer do curso de Engenharia Elétrica e seus altos e baixos, além de me incentivar a me tornar uma pessoa com um pensamento mais crítico e criativo.

Agradeço o meu professor orientador, Arrhenius de Oliveira, por me orientar nessa última etapa importantíssima do curso.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos que também me apoiaram durante o curso, onde estudamos e nos esforçamos juntos.

RESUMO

Aplicação do Método de Murray na Pré-Localização de Falhas em Cabos Isolados em Redes de Média Tensão

Com o aumento do número de parques solares e eólicos, ocorreu também uma elevação da infraestrutura que os compõem, como a rede de média tensão subterrânea. Devido a maior confiabilidade desse tipo de rede e a natureza do parque, se torna inviável a instalação de redes aéreas, pois estas acarretariam na diminuição de produção do parque. No entanto, as redes subterrâneas apresentam suas próprias dificuldades, uma vez que a localização de falhas no seu percurso é significativamente mais difícil.

Em uso por mais de um século, o método da ponte de Murray é um dos métodos mais difundidos para localização de falhas em trechos subterrâneos. Porém, novos métodos modernos surgiram nas últimas décadas, explicitando as limitações do método de Murray.

Para realizar uma análise comparativa, a metodologia utilizada consistiu em uma revisão da constituição dos cabos isolados e das normas técnicas vigentes. Em seguida, foi realizada uma análise crítica do método de Murray, comparando-o com métodos modernos para verificar sua relevância no cenário atual. Além disso, foi demonstrada a precisão do método através de um exemplo prático.

Ao final do trabalho, conclui-se que, apesar de suas limitações clássicas, as modernizações tecnológicas garantem que o método de Murray permanece uma ferramenta relevante e segura no arsenal de localização de falhas para sistemas de energia.

Palavras-chave: cabos isolados; pré-localização de falha; média tensão; ponte de Murray.

ABSTRACT

Application of the Murray Method in the Pre-location of Faults in Insulated Cables in Medium Voltage Grids

With the increase in the number of solar and wind farms, there has also been an increase in their constituent infrastructure, such as the underground medium-voltage grid. Due to the higher reliability of this type of network and the nature of the farm, the installation of overhead lines becomes unfeasible, as they would lead to a decrease in the farm's production. However, underground grids present their own challenges, as locating faults along their path is significantly more difficult.

In use for over a century, the Murray bridge method is one of the most widespread methods for locating faults in underground sections. However, new modern methods have emerged in recent decades, highlighting the limitations of the Murray method.

To perform a comparative analysis, the methodology used consisted of a review of the constitution of insulated cables and the current technical standards. Following this, a critical analysis of the Murray method was conducted, comparing it to modern methods to verify its relevance in the current scenario. Additionally, the accuracy of the method was demonstrated through a practical example.

At the end of the thesis, it is concluded that, despite its classic limitations, technological modernizations ensure that the Murray method remains a relevant and safe tool in the arsenal of fault location for power systems.

Keywords: insulated cables; fault pre-location; medium voltage; Murray bridge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cabos isolados no solo.....	13
Figura 2: Composição típica de um cabo isolado.....	16
Figura 3: Cabos isolados com falha aparente.....	18
Figura 4: Diagrama da ponte de Wheatstone.....	21
Figura 5: Esquema de interligação para o método da ponte de Murray.....	24
Figura 6: Equipamento BAUR Shirla.....	24
Figura 7: Diagrama do TDR.....	26
Figura 8: Diagrama do ARM.....	27
Figura 9: Diagrama do ICM.....	28
Figura 10: Diagrama do método do decaimento.....	28
Figura 11: Trecho da RMT subterrânea com falha.....	35
Figura 12: Arquivo gerado pelo BAUR Shirla na etapa de identificação de falha.....	36
Figura 13: Arquivo 1 gerado pelo BAUR Shirla na etapa de pré-localização.....	37
Figura 14: Arquivo 2 gerado pelo BAUR Shirla na etapa de pré-localização.....	38
Figura 15: Display demonstrando diferença de potencial.....	39
Figura 16: Falha localizada no trecho.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análise de fatores de influência na precisão da ponte de Murray.....	32
Tabela 2: Comparativo de métodos de pré-localização.....	33
Tabela 3: Distância do ponto de medição à falha medida pelo BAUR Shirla.....	38
Tabela 4: Distância do ponto de medição à falha medida pelo BAUR Shirla.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TDR reflectometria no domínio do tempo

ARM método de reflexão de arco

ICM método de corrente de impulso

CA corrente alternada

CC corrente contínua

RMT redes de média tensão

XLPE polietileno reticulado

EPR borracha de etileno-propileno

PILC papel isolado e impregnado a óleo

IEEE instituto dos engenheiros eletricitistas e eletrônicos

LPF filtros passa-baixa

DSP processamento digital de sinais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVO.....	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE CABOS ELÉTRICOS E FALHAS.....	16
2.1 CONCEITOS GERAIS DE CABOS ELÉTRICOS.....	16
2.2 TIPOS DE FALHAS EM CABOS ISOLADOS.....	17
2.3 A IMPORTÂNCIA DA PRÉ-LOCALIZAÇÃO DE FALHAS.....	19
3 O MÉTODO DA PONTE DE MURRAY E OUTROS.....	21
3.1 PRINCÍPIO DA PONTE DE WHEATSTONE.....	21
3.2 MÉTODO DA PONTE DE MURRAY.....	22
3.2.1 Princípio de Funcionamento.....	22
3.2.2 Procedimento de Medição.....	23
3.2.3 Cálculo da Distância da Falha.....	25
3.3 REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	26
3.4 MÉTODO DE REFLEXÃO DE ARCO.....	26
3.5 MÉTODO DE CORRENTE DE IMPULSO (ICM).....	27
3.6 MÉTODO DE DECAIMENTO.....	28
4 ANÁLISE DO MÉTODO DE MURRAY.....	30
4.1 VANTAGENS DO MÉTODO DE MURRAY.....	30
4.2 DESVANTAGENS E LIMITAÇÕES.....	30
4.3 COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS.....	32
5 EXEMPLO PRÁTICO DO MÉTODO DE MURRAY.....	35
6 CONSIDERAÇÕES SOBRE NORMAS E SEGURANÇA.....	41
6.1 PROCEDIMENTOS DE SEGURANÇA.....	42
7 CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

A transição energética para energias mais sustentáveis tem impulsionado uma expansão de parques de geração de energia renovável, em especial eólicos e fotovoltaicos. Uma característica particular dessas instalações é a sua rede de cabos subterrâneos de média tensão, essenciais para a coleta e transporte da energia gerada a partir das turbinas e/ou módulos fotovoltaicos que os compõem. A preferência por redes subterrâneas em detrimento das aéreas fundamenta-se, primeiramente, na natureza desses parques, uma vez que redes aéreas atrapalham sua geração de energia. Além disso, redes subterrâneas apresentam maior confiabilidade ao proteger a infraestrutura contra os elementos, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1: Cabos isolados no solo



FONTE: (PRÓPRIA, 2024).

Apesar de sua posição abrigada, a rede de cabos não está imune a falhas. Defeitos podem ser introduzidos desde o processo de fabricação, como impurezas no material isolante, ou podem surgir devido a danos mecânicos durante o seu lançamento e ao envelhecimento natural dos materiais em serviço (THUE, 1999). A ocorrência de uma falha em um desses cabos pode paralisar a produção de uma ou mais unidades geradoras, resultando em perdas econômicas significativas. Portanto, a capacidade de localizar essas falhas de forma rápida e precisa é uma competência operacional crítica para minimizar o tempo de inatividade e maximizar a eficiência dos parques geradores.

Neste contexto, a maior vantagem das redes subterrâneas torna-se seu maior empecilho. A própria arquitetura de projetos subterrâneos impossibilita uma averiguação fácil da localização das falhas, quando comparado às redes aéreas. Para contornar esse problema, são utilizadas técnicas de localização de falhas, sendo uma delas o método da ponte de Murray, criada há mais de um século atrás.

Inicialmente desenvolvida para localizar falhas em cabos de redes telegráficas, ela também apresenta eficácia em cabos de redes elétricas. Utilizando-se dois cabos, um contendo a falha e outro em condições normais de operação, determina-se uma distância aproximada da falha. No entanto, múltiplos circuitos de cabos instalados em traçados paralelos e próximos para otimizar a coleta de energia criam um cenário adverso para a aplicação da ponte de Murray. Pesquisas demonstram que uma das principais fontes de erro para este método é a tensão de corrente alternada (CA) induzida por circuitos adjacentes que permanecem energizados. Esta tese também explora se as evoluções tecnológicas incorporadas aos equipamentos mais recentes configurados com o método da ponte de Murray são suficientes para superar este desafio intrínseco, permitindo que o método mantenha sua relevância em um dos setores energéticos que mais apresentam crescimento no Brasil.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho dedica-se à análise de um dos métodos clássicos para a pré-localização de falhas: o método da ponte de Murray. O objetivo principal é avaliar sua precisão e relevância no contexto contemporâneo das Redes de Média Tensão (RMT), com um foco particular nos parques de energia renovável. Será investigado se este método ainda se constitui como uma ferramenta viável e eficaz para os engenheiros e técnicos de campo.

A análise seguirá a seguinte estrutura: inicialmente serão detalhados fundamentos teóricos dos cabos e as principais falhas; após isso, será abordado o método de Murray; em seguida ele será comparado com técnicas mais modernas; com os conceitos estabelecidos, será realizada uma análise crítica de suas capacidades e limitações; e, por fim, será feita uma consideração acerca das normas vigentes no Brasil e as normas internacionais que regem a área.

1.2 JUSTIFICATIVA

A presente trabalho parte da necessidade de uma melhor compreensão acerca da localização de falhas em cabos isolados em parques eólicos e solares, uma vez que tais falhas

podem comprometer o escoamento da energia produzida, impactando dessa forma todo o setor energético regional e nacional.

Tais falhas, tão comuns de ocorrerem, apresentam grande dificuldade para os responsáveis pela manutenção do parque em localizá-las, uma vez que, diferentemente das RMT aéreas que passam por postes, cabos isolados são subterrâneos, dificultando uma averiguação visual do problema. Devido a isso, foram desenvolvidos métodos de localização de falhas, como o método da ponte de Murray, que apesar de ter sido desenvolvido há mais de um século, ainda é amplamente utilizado. Dessa forma, busca-se entender se esse método ainda apresenta relevância no panorama atual. Observa-se que artigos referentes ao uso desse método são esparsos na literatura brasileira, dificultando uma difusão maior entre graduandos nas universidades nacionais.

A pesquisa se justifica, portanto, na noção de que a localização dessas falhas tem alto valor acadêmico e econômico, e que a compreensão do método utilizado é essencial para o desenvolvimento de qualquer engenheiro que busque se especializar na área, uma vez que a produção de energia de usinas renováveis depende primordialmente da função de cabos para sua transmissão, fazendo com que a localização de falhas que comprometam tal tarefa seja essencial.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em setecapítulos:

- O Capítulo 1 introduz o tema e os objetivos;
- O Capítulo 2 aborda os fundamentos teóricos sobre cabos utilizados em RMT subterrâneas e a classificação das principais falhas;
- O Capítulo 3 detalha o método da ponte de Murray e outros métodos modernos de localização de falhas;
- O Capítulo 4 apresenta uma análise crítica e comparativa do método de Murray em relação a outros métodos modernos;
- O Capítulo 5 traz um exemplo prático do método da ponte de Murray;
- O Capítulo 6 discute as normas vigentes, tanto nacionais quanto internacionais, e as orientações de segurança definidas;
- Por fim, o Capítulo 7 apresenta a conclusão do trabalho.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE CABOS ELÉTRICOS E FALHAS

A eficácia de qualquer método de localização de falhas depende de uma compreensão da constituição dos cabos sob teste e da natureza da falha a ser localizada. Este capítulo detalha a estrutura dos cabos isolados empregados em RMTs subterrâneas e classifica os tipos de falhas com base em suas características.

2.1 CONCEITOS GERAIS DE CABOS ELÉTRICOS

Um cabo isolado de média tensão é uma estrutura de várias camadas, onde cada componente desempenha uma função crítica para seu funcionamento. A constituição típica é detalhada em diversas normas, livros e publicações técnicas. Segundo (THUE, 1999), um cabo isolado pode ser composto pelas seguintes camadas, conforme pode ser observado na Figura 2:

Figura 2: Composição típica de um cabo isolado



FONTE: (MONTEIRO, 2021).

1. Condutor: é o núcleo do cabo, responsável pela condução da corrente elétrica. Pode ser de cobre ou alumínio, porém o alumínio é hoje o mais amplamente utilizado por seu menor custo. Para flexibilidade, especialmente em seções maiores, são

- empregados condutores multifilares (compostos por vários fios entrelaçados) em vez de condutores maciços;
2. Blindagem do condutor: Trata-se de uma camada de material semicondutor extrudado diretamente sobre a alma condutora. Sua função é criar uma superfície eletricamente lisa, eliminando as irregularidades da superfície do condutor trançado e melhorando o contato com a isolação, não deixando vãos que poderiam armazenar umidade e impurezas. Isso uniformiza o campo elétrico na interface com a isolação, prevenindo a concentração de estresse elétrico causado pelas altas tensões de operação em pontos que poderiam iniciar uma falha;
 3. Isolação: é a barreira dielétrica projetada para suportar a tensão de operação do cabo. Nos cabos modernos, materiais poliméricos como o polietileno reticulado (XLPE) e a borracha de etileno-propileno (EPR) são predominantes. Eles oferecem características térmicas e de manuseio superiores em comparação com os antigos cabos de papel isolado e impregnado a óleo (PILC), que eram mais utilizados no começo do século XX. A norma ABNT NBR 7287 é a norma nacional que estabelece os requisitos de desempenho para cabos com isolação XLPE;
 4. Blindagem da isolação: esta camada é composta por duas partes: uma não metálica e uma metálica. A camada não metálica, também semicondutora, é extrudada sobre a isolação para garantir uma transição suave do campo elétrico para a blindagem metálica, evitando estresses elétricos tal qual a blindagem do condutor. A blindagem metálica, normalmente constituída por fitas ou fios de cobre concêntricos, apresenta as seguintes funções: a de confinar o campo elétrico dentro do cabo, atenuando as influências do cabo em questão em outros condutores próximos; fornecer um caminho de retorno para correntes de carga capacitiva e correntes de curto-circuito; e garantir a segurança ao manter a superfície externa do cabo em potencial de terra;
 5. Cobertura exterior: é a camada externa que oferece proteção mecânica contra abrasão e impacto, proteção química contra agentes no solo e proteção contra a penetração de umidade, garantindo a integridade do cabo ao longo de sua vida útil.

2.2 TIPOS DE FALHAS EM CABOS ISOLADOS

As falhas podem ser causadas durante a produção, transporte, armazenamento, lançamento e operação dos cabos isolados, porém, a maioria das falhas ocorrem durante a penúltima etapa, responsável por até 83% das falhas, consoante (PROBST, 2025). Isso ocorre

devido ao eventual manuseio inadequado em campo e pelo atrito constante com o solo. Um exemplo de falha em cabos isolados pode ser observado na Figura 3.

Figura 3: Cabos isolados com falha aparente.



FONTE: (PRÓPRIA, 2025).

No entanto, tais falhas só são identificadas após a instalação completa. Para realizar o diagnóstico inicial das falhas, a norma IEEE (instituto dos engenheiros eletricitas e eletrônicos) Std 1234-2019 recomenda o uso de um megômetro para medir a resistência da isolação do cabo, de forma que seja possível caracterizar o tipo de falha do cabo. A escolha do método de pré-localização mais adequado começa com a caracterização da falha.

A norma IEEE Std 1234-2019 oferece uma classificação baseada nas características elétricas do defeito:

- Falhas de baixa resistência: caracterizam-se por um caminho de baixa impedância, tipicamente com resistência entre 100Ω e $10 M\Omega$, entre o condutor e a blindagem metálica. Podem ser causadas por danos mecânicos severos ou resultante de descargas elétricas anteriores. Esse tipo de falha pode ser localizada por métodos como a reflectometria no domínio do tempo (TDR), que será detalhada posteriormente, e a ponte de Murray;
- Falhas de alta resistência: representam a maioria dos defeitos em cabos de isolação extrudada. A resistência da falha pode superar $10 M\Omega$. Em baixas tensões, como as de um multímetro ou megômetro, o cabo aparenta ser saudável. A falha só se manifesta como um arco elétrico (*flashover*) quando uma tensão suficientemente alta é aplicada. A ponte de Murray convencional apresenta-se como uma alternativa ineficaz para a localização desse tipo falha, a menos que a resistência possa ser reduzida por um

processo de "condicionamento" ou "queima" do cabo, que será explicada posteriormente;

- Falhas de circuito aberto: resultam da interrupção física da continuidade do condutor ou de uma emenda, seja por dano mecânico ou elétrico;
- Falhas de revestimento: ocorrem quando há um dano na cobertura externa, permitindo que a blindagem metálica do cabo entre em contato direto com o solo. O método TDR é geralmente ineficaz para localizar este tipo de falha, pois o pulso de teste não possui um caminho de retorno definido dentro da estrutura do cabo. A ponte de Murray, por sua vez, é adequada para esta situação, pois a corrente de medição pode usar a terra como caminho de retorno, permitindo a localização do defeito.

2.3 A IMPORTÂNCIA DA PRÉ-LOCALIZAÇÃO DE FALHAS

Nas décadas finais do século XX, a transição de cabos com isolamento em PILC para isolamento de XLPE e EPR representou uma grande evolução na indústria, simplificando a instalação e a manutenção, devido, por exemplo, à facilidade de instalar caixas de emendas e substituir seções defeituosas do circuito.

No entanto, essa mudança também introduziu novas falhas, sendo a mais notória as “*water trees*”, ou arborescências de água. Estas degradações se formam e crescem nos vãos da isolamento polimérica na presença simultânea de umidade e estresse elétrico ao decorrer da vida útil do cabo. As arborescências de água manifestam-se como falhas de alta resistência, um tipo de defeito que desafia os métodos de localização tradicionais, como o método da ponte de Murray.

Outro defeito notório são as arborescências elétricas, causadas por descargas parciais geradas por sobretensões em regiões com impurezas nos materiais que compõem o cabo, presença de vãos no material, ou arborescências de água presentes previamente. Diferente das “*water trees*”, esse tipo de falha se manifesta e evolui rapidamente.

Este fato introduz um dilema para a localização de falhas. Por um lado, a natureza de alta resistência das falhas mais comuns em cabos modernos torna métodos como a ponte de Murray inadequados. Por outro lado, a isolamento degradada por “*water trees*” é vulnerável a danos por testes de alta tensão, como os pulsos de alta energia usados no Método de Reflexão de Arco (ARM). A aplicação de alta tensão em Corrente Contínua (CC), na escala de até mesmo 3 vezes a tensão nominal que passa pelo cabo, conforme dita a norma IEEE 400 de

2024, pode ser extremamente prejudicial, potencialmente convertendo uma degradação em uma falha, devido ao acúmulo indevido de cargas nesses pontos. Nesse cenário, a abordagem de baixa energia da ponte de Murray, que opera com tensões de instrumentação até 10 kV para condicionar a falha, pode representar uma alternativa mais segura, mesmo que menos eficaz para localizar a falha inicialmente.

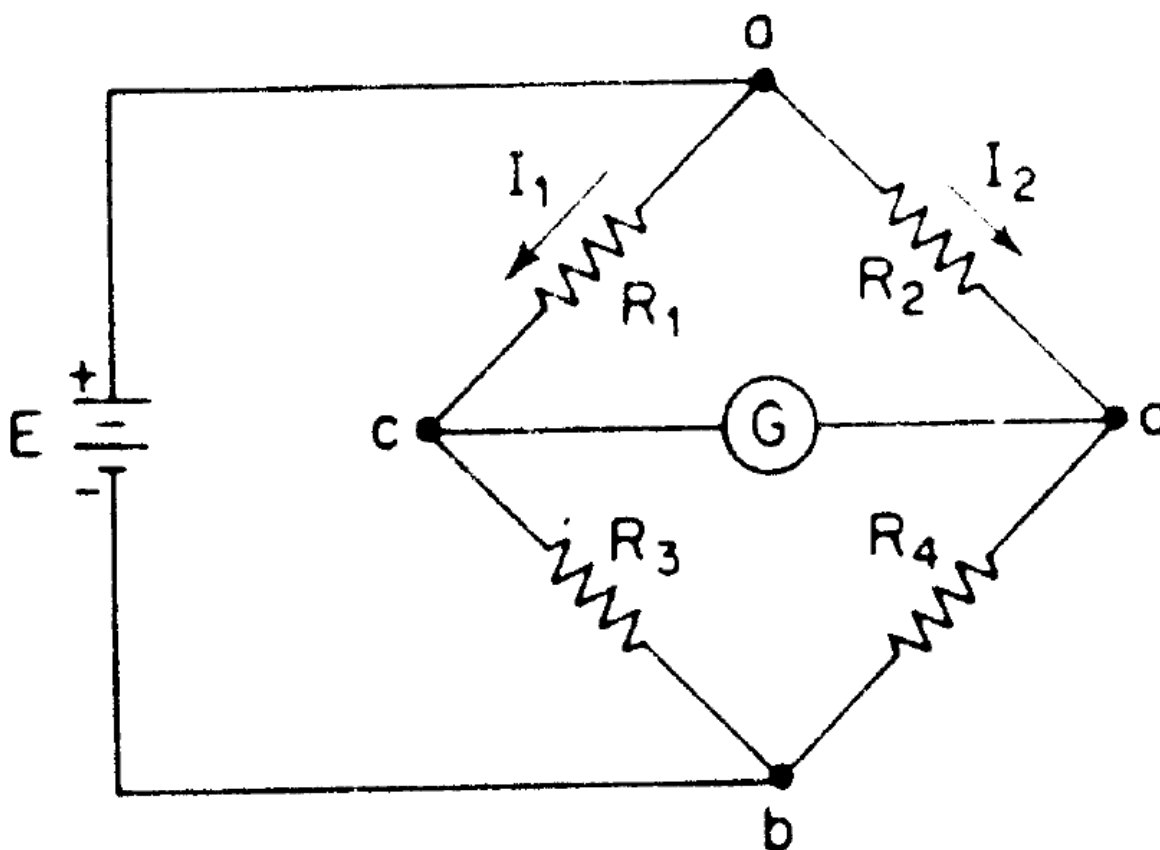
3 O MÉTODO DA PONTE DE MURRAY E OUTROS

A pré-localização é a primeira etapa no processo de reparo de um cabo, visando determinar a distância aproximada da falha a partir do terminal de medição. Este capítulo detalha o método da ponte de Murray e outras técnicas modernas.

3.1 PRINCÍPIO DA PONTE DE WHEATSTONE

Antes de detalhar o método de Murray, é essencial compreender seu fundamento: a ponte de Wheatstone. Este circuito é um dos instrumentos mais fundamentais e duradouros para a medição precisa de resistências (HELFRICK; COOPER, 1994). A configuração clássica consiste em quatro braços resistivos (R_1 , R_2 , R_3 , R_4), uma fonte de tensão em CC e um detector de nulidade, normalmente um galvanômetro sensível, conectado entre as junções dos braços. A configuração pode ser observada na Figura 4.

Figura 4: Diagrama da ponte de Wheatstone



FONTE: (HELFRICK; COOPER, 1994).

A ponte é dita em "equilíbrio" quando a diferença de potencial entre os pontos de conexão do galvanômetro é zero. Nesta condição, nenhuma corrente flui através do detector. O equilíbrio é alcançado quando a relação das resistências nos braços paralelos é igual. Matematicamente, a condição de equilíbrio é expressa pela Equação (1) (HELFRICK; COOPER, 1994):

$$R1 \cdot R4 = R2 \cdot R3 \quad (1)$$

Ou, de outra forma equivalente, à Equação (2):

$$\frac{R1}{R3} = \frac{R2}{R4} \quad (2)$$

Na configuração de medição, um dos braços da ponte é a resistência desconhecida (R_x), enquanto os outros três apresentam resistência de valor conhecido. Dentre estes, dois resistores ($R1$ e $R2$) atuam como braços de razão fixos que determinam a extensão de escala da ponte, e o terceiro ($R3$) é a resistência de referência que é ajustada até ser obtido o equilíbrio da ponte. Ao ajustar a resistência de referência até que o galvanômetro indique zero, o valor da resistência desconhecida pode ser calculado com alta precisão pela Equação (3) (HELFRICK; COOPER, 1994):

$$R_x = R3 \cdot \left(\frac{R2}{R1}\right) \quad (3)$$

A precisão da medição depende da sensibilidade do detector de nulidade e da exatidão dos resistores de referência. É essa capacidade de comparar uma resistência desconhecida com outras conhecidas que confere à ponte de Wheatstone sua precisão e a torna a base para outros métodos de medição, como a ponte de Murray (HELFRICK; COOPER, 1994).

3.2 MÉTODO DA PONTE DE MURRAY

3.2.1 *Princípio de Funcionamento*

O método da ponte de Murray é uma aplicação do circuito de ponte de Wheatstone, adaptado para a geometria de um cabo elétrico. Seu princípio envolve a criação de um laço de medição. Este laço é formado conectando-se a extremidade distante de um condutor com

falha a um condutor adjacente saudável, que deve ter, idealmente, a mesma seção transversal e comprimento. Este laço completo, com o comprimento total dos dois cabos, constitui dois dos quatro braços da ponte de Wheatstone. Os outros dois braços, R1 e R2, são resistores de precisão variáveis localizados dentro do equipamento. Uma fonte de tensão em CC é aplicada ao circuito, e os resistores R1 e R2 são ajustados até que um detector de nulidade, podendo ser um galvanômetro ou circuito eletrônico sensível em equipamentos mais modernos, indique um valor zero. Esta condição, conhecida como equilíbrio da ponte, significa que não há diferença de potencial entre os pontos de conexão do detector (BAUR PRÜF- UND MESSTECHNIK, 2013).

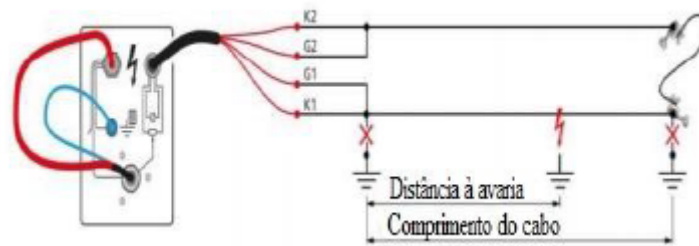
No entanto, devido à natureza do método, caso o cabo sob teste apresente duas ou mais falhas, não poderá ser feita uma pré-localização precisa. Neste caso o “ponto de falha” identificado ficará entre as falhas, sendo mais próximo ao ponto com maior corrente de fuga.

3.2.2 Procedimento de Medição

A aplicação prática do método exige um procedimento metódico. O primeiro passo é garantir que a rede esteja completamente desenergizada. Os procedimentos de segurança estipulados pela norma ABNT NBR 14039 devem ser seguidos, como a verificação de ausência de tensão, a instalação de aterramento temporário em todos os pontos de seccionamento e o bloqueio mecânico e sinalização dos dispositivos de manobra para impedir uma religação acidental.

O equipamento é conectado ao cabo com a falha e ao condutor saudável. Uma precaução técnica é a utilização de uma conexão de quatro fios (tipo *Kelvin*). Os cabos que fornecem a corrente de medição (K1 e K2) devem ser separados dos cabos que medem a tensão para o detector de nulidade (G1 e G2). As conexões do detector (G1,G2) devem ser feitas "atrás" das conexões da fonte de corrente (K1,K2). O esquema de interligação utilizado pode ser observado na Figura 5.

Figura 5: Esquema de interligação para o método da ponte de Murray



FONTE: (MONTEIRO, 2021).

Esta configuração garante que a resistência dos cabos de teste e das conexões não seja somada à resistência do laço do cabo, que é o objeto da medição, evitando assim erros significativos, especialmente em cabos com baixa resistência. Esse método encontra-se presente em diversos equipamentos conceituados no mercado, como o BAUR *Shirla*, representado pela Figura 6 (BAUR PRÜF- UND MESSTECHNIK, 2013).

Figura 6: Equipamento BAUR *Shirla*



FONTE: (BAUR, 2025).

O operador insere os parâmetros do cabo no equipamento, como o comprimento total do cabo, a seção transversal e o material do condutor (cobre ou alumínio). O equipamento então realiza o ajuste de zero para calibrar o circuito interno. Após a calibração, a tensão de medição é aplicada, e o instrumento ajusta os braços da ponte (resistores R1 e R2) até que o equilíbrio seja alcançado

Nos equipamentos mais modernos, é possível acrescentar seções durante essa etapa da configuração, como por exemplo uma seção inicial de alumínio de 500 metros e seção transversal de 150 mm² conectada a uma seção de cobre de 200 metros e seção transversal de 50 mm². O equipamento irá calcular a resistência de cada seção e fornecerá a distância da localização da falha considerando as duas seções. No entanto, é necessário que outro condutor similar seja utilizado.

3.2.3 Cálculo da Distância da Falha

Na condição de equilíbrio da ponte de Wheatstone, a relação das resistências dos braços opostos é igual. Para a configuração da ponte de Murray, esta relação é expressa pela Equação (4):

$$\frac{R1}{2 \cdot R1 - Rx} = \frac{R2}{Rx} \quad (4)$$

Onde R1 e R2 são as resistências dos braços internos do equipamento, Rx é a resistência do condutor desde o ponto de medição até a falha, e Rl é a resistência de um único condutor de comprimento L. Assumindo que o cabo é de mesmo material e seção transversal ao longo de todo o seu comprimento, a resistência é diretamente proporcional ao comprimento. Portanto, a Equação (4) pode ser reescrita em termos de distância, dx, conforme a Equação (5):

$$\frac{R1}{2 \cdot L - dx} = \frac{R2}{dx} \quad (5)$$

Resolvendo para dx, obtém-se a Equação (6) de cálculo da distância da falha:

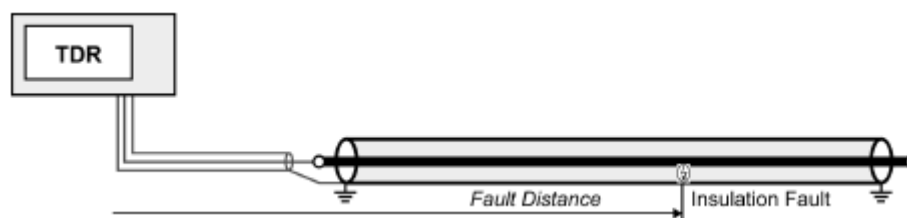
$$dx = 2L \cdot \frac{R2}{(R1+R2)} \quad (6)$$

Instrumentos modernos, como o BAUR *Shirla*, automatizam completamente este processo. Após o operador inserir os parâmetros do cabo, o dispositivo realiza o balanceamento e o cálculo, exibindo a distância até a falha diretamente em metros ou como uma porcentagem do comprimento total do cabo (BAUR PRÜF- UND MESSTECHNIK, 2013).

3.3 REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO

O TDR (do inglês *Time Domain Reflectometry*), também conhecido como método de reflexão de impulsos, opera enviando um pulso de baixa tensão e alta frequência pelo cabo e analisando as reflexões que retornam. As reflexões são geradas em qualquer ponto onde a impedância característica do cabo mude, como emendas, derivações, o final do cabo e, principalmente, em falhas. Após o envio do impulso inicial, o equipamento registra os impulsos que retornam a ele, estimando sua distância através da velocidade que o pulso consegue se mover no cabo. Caso uma falha gere uma reflexão perceptível, um gráfico gerado pelo equipamento irá demonstrá-la. A conexão do equipamento ao cabo para realizar os testes de localização podem ser vistos da Figura 7.

Figura 7: Diagrama do TDR



FONTE: (IEEE, 2019).

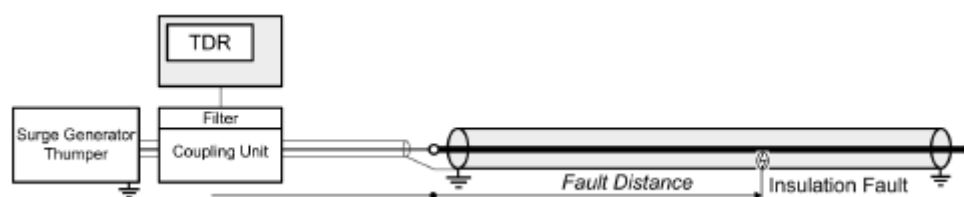
Este método é eficaz para localizar curtos-circuitos e circuitos abertos. No entanto, sua principal limitação em parques renováveis, que frequentemente utilizam cabos longos, é a atenuação do sinal, que pode mascarar reflexões de falhas distantes. Além disso, o TDR também apresenta dificuldade em detectar falhas de alta resistência, pois a mudança de impedância causada por elas é muito pequena para gerar uma reflexão notável.

3.4 MÉTODO DE REFLEXÃO DE ARCO

O ARM (do inglês *Arc Reflection Method*) é uma evolução do TDR projetada especificamente para superar sua limitação com falhas de alta resistência. A técnica utiliza um

gerador de surtos de alta tensão ("*thumper*") para aplicar um pulso de alta energia no cabo. Este pulso provoca um arco elétrico no ponto da falha, criando um curto-circuito. Um TDR, sincronizado com o gerador de surtos, captura a reflexão deste arco, permitindo a localização precisa da falha de alta resistência. Observa-se a conexão do equipamento ao cabo na Figura 8.

Figura 8: Diagrama do ARM



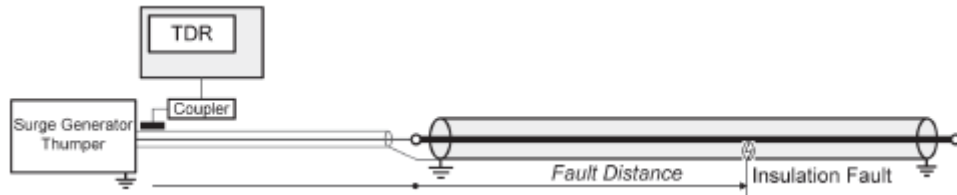
FONTE: (IEEE, 2019).

É considerado um dos métodos mais eficientes e versáteis. A sua principal desvantagem, no entanto, é a aplicação de surtos de alta energia, que representam um risco para a isolação de cabos envelhecidos, especialmente aqueles com degradação por arborescências de água, podendo causar danos adicionais ou levar a uma falha completa durante o teste.

3.5 MÉTODO DE CORRENTE DE IMPULSO (ICM)

O ICM (do inglês *Impulse Current Method*) é uma técnica de pré-localização particularmente indicada para cabos de grande comprimento, onde a atenuação do sinal em outros métodos se torna um fator limitante, como no método TDR (MONTEIRO, 2021). O princípio consiste em aplicar um pulso de alta tensão no cabo defeituoso através de um gerador de surtos. Este pulso provoca um arco no ponto da falha, e a corrente de pulso é refletida, oscilando repetidamente entre o ponto de falha e o ponto de medição, onde o capacitor do gerador de surto, ao se comportar como uma fonte de baixa impedância para pulsos rápidos, provoca uma nova reflexão de volta ao cabo. O esquema de interligação entre equipamentos e cabo pode ser visto na Figura 9.

Figura 9: Diagrama do ICM



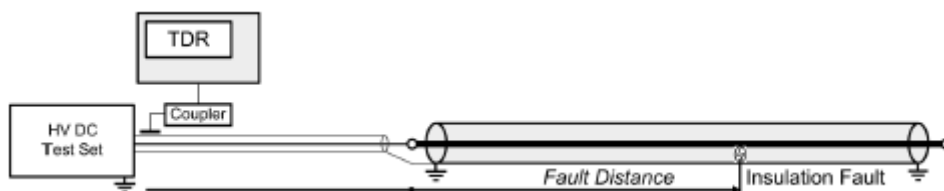
FONTE: (IEEE, 2019).

Um instrumento de monitoramento, como um osciloscópio, acoplado ao cabo, captura essa sequência de reflexões. A distância até a falha é então calculada com base no intervalo de tempo constante entre os picos dos impulsos refletidos. O ICM é recomendado como um método de apoio ao método de reflexão de arco, sendo especialmente útil em falhas onde um arco estável entre o condutor e a blindagem não pode ser estabelecido, como em falhas de emendas para a terra, e em cabos longos com alta atenuação onde um pulso TDR convencional não teria energia suficiente para gerar uma reflexão. Sua principal limitação é a ineficácia em cabos curtos, pois a alta energia do impulso pode gerar múltiplas reflexões sobrepostas, dificultando a interpretação (MONTEIRO, 2021).

3.6 MÉTODO DE DECAIMENTO

O método de decaimento é projetado para falhas de alta resistência ou intermitentes, especialmente em cenários onde a tensão de ruptura da falha excede a capacidade máxima do gerador de surtos, ou quando a capacitância do cabo é muito elevada para um "thumper" convencional, como em cabos submarinos muito longos. A Figura 10 ilustra o esquema de conexão para utilizar o método.

Figura 10: Diagrama do método do decaimento



FONTE: (IEEE, 2019).

Nesta técnica, um equipamento de teste de alta tensão CC carrega continuamente o cabo defeituoso. A tensão aumenta até atingir o ponto de ruptura da falha, momento em que ocorre uma descarga disruptiva. Essa descarga gera uma onda de tensão que viaja do ponto da falha em direção à extremidade de medição. Um acoplador detecta a chegada dessa onda e um osciloscópio registra o tempo de percurso. A distância até a falha é calculada a partir deste tempo de viagem. Uma vantagem significativa é que, se a energia liberada na descarga for suficientemente alta, o som do arco pode ser usado para a localização exata (*pinpointing*) através do método acústico, que consiste em “seguir” as ondas sonoras até encontrar a posição exata da falha.

4 ANÁLISE DO MÉTODO DE MURRAY

Uma avaliação do método da ponte de Murray exige uma análise de suas vantagens, desvantagens e dos fatores que influenciam sua precisão. Este capítulo detalha esses pontos e faz uma comparação do método com as outras técnicas citadas anteriormente.

4.1 VANTAGENS DO MÉTODO DE MURRAY

O método de Murray persiste no campo de localização de falhas por uma combinação de características vantajosas, como:

- Simplicidade e custo de operação: equipamentos configurados com o método da ponte de Murray são mais simples e apresentam menor custo em comparação com sistemas avançados de TDR e ARM, os quais requerem um sensor ou osciloscópio para registrar os pulsos que retornam;
- Precisão: Em condições ideais, como falha de baixa resistência, ausência de interferência de outros cabos energizados e parâmetros do cabo conhecidos com exatidão, o método pode alcançar uma precisão notável, com erros de localização da ordem de 1% a 3% do comprimento total do cabo (PARK et al., 2011);
- Versatilidade para falhas de revestimento: esta é talvez sua vantagem mais distinta quando comparado aos outros métodos. A ponte de Murray é extremamente eficaz para localização de falhas de revestimento (contato da blindagem com a terra), um cenário onde o TDR não se aplica.

4.2 DESVANTAGENS E LIMITAÇÕES

Apesar das vantagens listadas anteriormente, o método da ponte de Murray apresenta sérias desvantagens quando comparado a métodos modernos, sendo elas:

- Requisito do condutor saudável: sendo a característica mais marcante do método, sua necessidade de formar um laço com um condutor sem falhas é sua maior limitação prática. Em situações de danos mecânicos severos que afetam todos os condutores de um cabo, ou em cabos sem um par adjacente disponível, o método torna-se inviável;
- Limitação da resistência de falha: o método é fundamentalmente ineficaz para falhas de alta resistência, tipicamente acima de 10 MΩ. A corrente de medição que passa pela falha torna-se muito pequena, impedindo um balanceamento preciso da ponte, aumentando a taxa de erro do método;

- Processo demorado: a preparação, conexão, inserção de dados e o processo de balanceamento da ponte podem consumir mais tempo do que uma medição rápida com um TDR para uma falha de baixa resistência.

Além disso, a precisão da ponte de Murray não é absoluta e pode ter seus resultados significativamente degradados por outros cabos energizados, devido à influência das tensões induzidas por eles. Este é o fator mais crítico e desafiador, especialmente em instalações como parques de energia renovável, onde múltiplos cabos operam em paralelo. Circuitos adjacentes energizados induzem tensões de CA no laço de medição. Conforme detalhado em estudos aprofundados, esse fenômeno causa dois problemas:

1. Instabilidade do detector: a tensão CA induzida, tipicamente em 50 Hz ou 60 Hz, sobrepõe-se ao sinal CC da ponte. Isso faz com que o detector de nulidade (galvanômetro ou digital) flutue erráticamente, tornando impossível para o operador ou para o sistema automático encontrar o ponto de equilíbrio;
2. Risco ao equipamento: a tensão induzida pode gerar correntes circulantes significativas nos braços da ponte. Se essa corrente exceder a capacidade dos resistores de precisão do instrumento, pode causar superaquecimento e danos permanentes, comprometendo a calibração e o funcionamento do equipamento.

A superação desses desafios exigiu modificações do método. A ponte de Murray clássica é um circuito passivo, cuja precisão depende da pureza do sinal e da qualidade dos componentes. O ruído induzido é um fator externo que este circuito passivo não consegue rejeitar de maneira eficaz. Para sanar esse problema, filtros passa-baixa (LPF) com frequências de corte muito baixas (na escala de 0,1 Hz) foram introduzidos para atenuar a frequência induzida na rede. O principal, no entanto, veio com a incorporação do processamento digital de sinais (DSP) (ISONO et al., 2003). O sinal ruidoso é amostrado e digitalizado. Um microprocessador então executa algoritmos para extrair o sinal CC desejado. A média de amostras ao longo de um ou mais ciclos da frequência padrão cancela o componente CA induzido. Adicionalmente, a capacidade de ajustar o *offset* do amplificador do detector permite compensar e subtrair ativamente componentes CC de baixa frequência ou tensões de fuga, que também podem causar erros.

Essa evolução significa que a ponte de Murray moderna não é mais apenas uma "ponte"; é um sistema de aquisição de dados e DSP. Sua precisão não se dá mais da pureza do sinal de entrada, mas da capacidade do sistema de extrair o sinal de interesse de um ambiente

eletricamente ruidoso. É esta inovação que permite que um princípio do século XIX permaneça relevante e competitivo na engenharia do século XXI (ISONO et al., 2003). A Tabela 1 demonstra as principais dificuldades encontradas pelo método de Murray e as estratégias de mitigação utilizadas.

Tabela 1: Análise de fatores de influência na precisão da ponte de Murray

Fator de Influência	Impacto na Medição	Estratégia de Mitigação
Resistência de Falha Elevada	Reduz a corrente de medição, tornando o ponto de nulo instável e impreciso.	Condicionamento da falha (" <i>burning</i> ") para reduzir a resistência de falha. Uso de fontes de tensão de medição mais elevadas (até 10 kV).
Tensão Induzida AC	Causa flutuação no detector, impossibilitando o equilíbrio da ponte. Pode danificar os resistores da ponte.	Filtros LPF com baixa frequência de corte (0,1 Hz) ou média de amostras para cancelar ruído periódico. Algoritmos de rejeição de ruído transitório.
Tensões Parasitas CC / Baixa Frequência	Causa um desvio (<i>offset</i>) no ponto de nulo, levando a um erro sistemático.	Expansão da faixa de ajuste de <i>offset</i> do amplificador do detector para compensar o desvio. Método de inversão de polaridade (teórico, mas complexo na prática).
Resistências de Contato	Resistências nos pontos de conexão do equipamento ao cabo podem se somar à resistência do laço, introduzindo erros.	Uso de bornes de conexão adequados (4 fios, tipo Kelvin). Conectar os fios do detector independentemente dos fios da fonte de corrente.

FONTE: (ISONO et al., 2003)

4.3 COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS

A prática moderna de localização de falhas não se baseia na escolha de um único "melhor método", mas sim na aplicação de uma estratégia de diagnóstico sequencial, utilizando um arsenal de ferramentas complementares. A seleção do método mais apropriado — seja a ponte de Murray, TDR, ARM, ICM ou o método de decaimento — depende da natureza da falha, do tipo e comprimento do cabo e das condições da instalação. Conforme pôde ser observado, métodos como ARM, ICM e de decaimento demonstram melhores resultados para falhas de alta resistência, com o ICM e o método de decaimento sendo mais adequados para cabos muito longos e de atenuação de sinal significativa. A Tabela 2 ilustra os principais pontos acerca de cada método.

Tabela 2: Comparativo de métodos de pré-localização

Característica	Ponte de Murray	TDR	ARM	ICM	Método de decaimento
Princípio	Equilíbrio de ponte de Wheatstone com CC.	Análise de reflexões de pulsos de baixa tensão por mudanças de impedância.	Criação de um arco de alta tensão para gerar uma falha de baixa impedância momentânea, detectável por TDR.	Análise das reflexões de um pulso de alta tensão que oscila entre a falha e o ponto de medição.	Carga CC do cabo até a tensão de ruptura da falha e análise da onda de tensão viajante resultante.
Tipo de Falha Ideal	Baixa resistência (<10 MΩ), falhas de revestimento.	Baixa resistência (<10 MΩ), curtos-circuitos, circuitos abertos.	Alta resistência, intermitentes, disruptivas.	Alta resistência, intermitentes, falhas onde o arco não se sustenta (ex: emendas para a terra).	Altíssima resistência, intermitente, falhas com tensão de ruptura superior à do gerador de surto, cabos de alta capacitância.
Vantagens	Baixo custo, simplicidade, alta precisão para falhas adequadas, eficaz para falhas de revestimento, menor risco para isolamento envelhecida.	Rápido, não destrutivo, fornece um "mapa" do cabo através do gráfico gerado (emendas, derivações, etc.).	Muito eficaz para a maioria dos tipos de falha, incluindo as de alta resistência, com interpretação facilitada.	Eficaz em cabos longos e com alta atenuação, bom método de apoio para o ARM.	Funciona onde geradores de surto são ineficazes, permite localização acústica, ideal para cabos muito longos (submarinos).
Limitações	Requer condutor saudável, demorado, sensível a tensões induzidas, ineficaz para alta resistência sem condicionamento.	Ineficaz para falhas de alta resistência e de revestimento, atenuação do sinal em cabos muito longos.	Requer equipamento de alta tensão ("thumper"), risco de dano à isolamento envelhecida, limitado pelo comprimento e capacitância do cabo.	Ineficaz em cabos curtos (sobreposição de reflexões), requer gerador de surto.	Requer equipamento de teste CC de alta tensão, pode ser destrutivo se a energia armazenada for alta.

FONTE: (MONTEIRO, 2021)

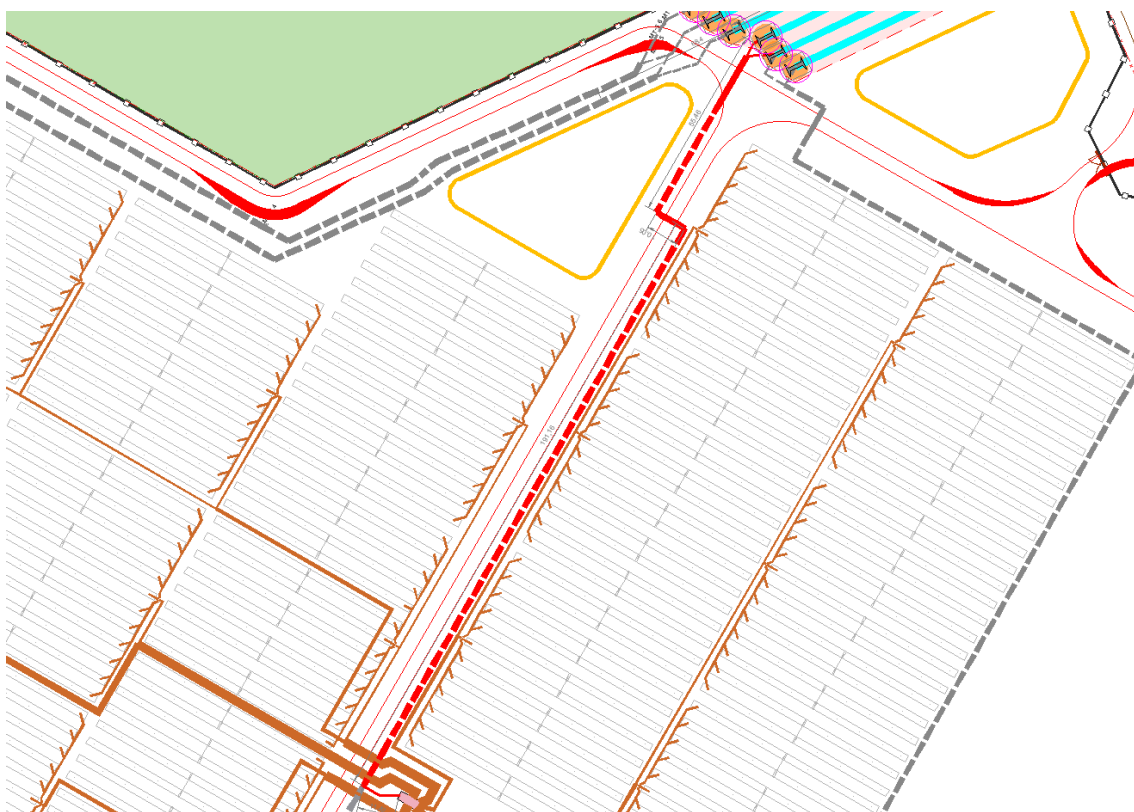
A ponte de Murray ocupa um espaço nesse cenário, destacando-se como a ferramenta ideal para falhas de revestimento e uma alternativa de baixo risco para falhas de baixa resistência, e uma opção segura a ser considerada antes de escalar para métodos de alta energia mais destrutivos aos cabos, como a reflexão de arco, especialmente quando a integridade da isolação do cabo é uma preocupação.

5 EXEMPLO PRÁTICO DO MÉTODO DE MURRAY

Apesar da teoria afirmar a eficácia dos métodos de localização de falhas, muitas vezes a experiência prática apresenta resultados destoantes devido a diversos fatores como a resistência de contato, a resistência da própria falha e as tensões induzidas por circuitos adjacentes. Este capítulo apresenta alguns resultados do uso do equipamento BAUR *Shirla* configurado com o método da ponte de Murray. Serão analisadas as distâncias estimadas do ponto de medição à falha e a distância real da falha, calculando o grau do erro cometido pelo equipamento.

Será utilizado como exemplo prático a localização de falha em um trecho de cabo isolado da RMT subterrânea, com 268 metros de comprimento e tensão nominal de operação de 34,5 kV. O circuito em questão tem sua origem no eletrocentro de uma usina fotovoltaica e termina em um poste, ponto no qual ocorre a transição para a RMT aérea, que por sua vez interliga o sistema à subestação de transmissão. A Figura 11 representa o trecho em questão pontilhado em vermelho.

Figura 11: Trecho da RMT subterrânea com falha



FONTE: (PRÓPRIA, 2023).

Neste traçado, o círculo pontilhado em vermelho representa o trecho com falhas, que vai desde o eletrocentro até o poste.

5.1 IDENTIFICAÇÃO DA FALHA

Inicialmente, o BAUR *Shirla* identifica a presença de uma falha no cabo pela resistência entre condutor e blindagem. A Figura 12 representa o arquivo gerado pelo equipamento.

Figura 12: Arquivo gerado pelo BAUR *Shirla* na etapa de identificação de falha

```
TEST REPORT
SHIRLA V0.7.9
FILENAME: SH-I_024.TXT
2023-11-08 08:13
-----

Test Voltage: 1.89 kV
Leakage Current: 13.437 mA
Resistance: 0.14 MOHM
Duration of test: 2 min

Voltage adjust: 0 min 12 s 1.500 kV
Voltage adjust: 0 min 15 s 1.500 kV
Voltage adjust: 0 min 28 s 3.000 kV
Voltage adjust: 0 min 46 s 4.000 kV

TEST BERICHT
SHIRLA V0.7.9
DATEINAME: SH-I_024.TXT
08-11-2023 08:13
-----
```

FONTE: (PRÓPRIA, 2023).

Conforme pode ser observado, o BAUR *Shirla* identificou uma resistência baixa presente nesse trecho, sinalizando uma falha. A partir disso, prossegue-se a etapa de pré-localização.

5.2 PRÉ-LOCALIZAÇÃO DA FALHA

Na etapa de pré-localização, inserem-se as informações do trecho analisado no equipamento, como comprimento do cabo, seção da bitola e material que o compõem. Após a conexão do equipamento com o cabo e as informações terem sido inseridas, inicia-se a pré-localização através do método de Murray.

No caso do trecho anterior, que apresenta 268 metros de comprimento e é composto por um cabo de alumínio de seção de bitola de 300 mm², foram realizadas duas medições, sendo elas representadas pela Figura 13 e pela Figura 14.

Figura 13: Arquivo 1 gerado pelo BAUR *Shirla* na etapa de pré-localização

```
FAULT LOCATION REPORT
SHIRLA V0.7.9
FILENAME: SH-L_001.TXT
2023-11-08 14:22
-----

Selected Method: MURRAY

Applied Test Voltage: 1.15 kV
Measuring Current: 6.87 mA

Fault Distance: 60.0m (22.4%)

Cable Sections:
1: 134 m 300.00 mm2 AL
2: 134 m 300.00 mm2 AL

FEHLERORTUNGSBERICHT
SHIRLA V0.7.9
DATEINAME: SH-L_001.TXT
08-11-2023 14:22
-----
```

FONTE: (PRÓPRIA, 2023).

Figura 14: Arquivo 2 gerado pelo BAUR *Shirla* na etapa de pré-localização

```

FAULT LOCATION REPORT
SHIRLA V0.7.9
FILENAME: SH-L_002.TXT
2023-11-08 14:24
-----

Selected Method: MURRAY

Applied Test Voltage: 1.97 kV
Measuring Current: 6.81 mA

Fault Distance: 62.9m (23.5%)

Cable Sections:
1: 134 m 300.00 mm2 AL
2: 134 m 300.00 mm2 AL

FEHLERORTUNGSBERICHT
SHIRLA V0.7.9
DATEINAME: SH-L_002.TXT
08-11-2023 14:24
-----

```

FONTE: (PRÓPRIA, 2023).

Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3: Distância do ponto de medição à falha medida pelo BAUR *Shirla*

Ensaio	Distância do ponto de medição à falha	Porcentagem da distância da falha em relação ao trecho completo
1	60,0 m	22,4%
2	62,9 m	23,5%

FONTE: (PRÓPRIA, 2025)

Com essas informações, passa-se para a etapa de localização exata da falha.

5.3 LOCALIZAÇÃO EXATA

O equipamento BAUR *Shirla* apresenta uma função em que é possível enviar pulsos através do cabo. Com isso, outro equipamento que identifica a diferença de potencial no solo próximo à falha capta estes pulsos. Ao identificar um ponto onde o equipamento não capta nenhuma diferença de potencial, o operador encontra a posição exata da falha. A Figura 15 demonstra esse processo.

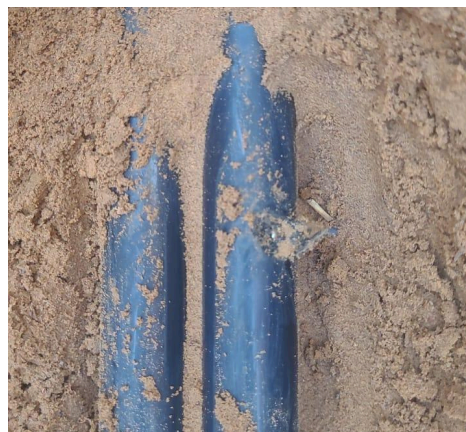
Figura 15: *Display* demonstrando diferença de potencial



FONTE: (BAUR, 2024).

No caso do trecho defeituoso anterior, a falha, demonstrada pela Figura 16, foi localizada a aproximadamente 63,7 metros de distância do ponto de localização.

Figura 16: Falha localizada no trecho



FONTE: (PRÓPRIA, 2023).

A Tabela 4 demonstra o erro de cada ensaio.

Tabela 4: Distância do ponto de medição à falha medida pelo BAUR *Shirla*

Ensaio	Distância real do ponto de medição à falha	Erro da distância calculada
1	63,7 m	5,8%
2		1,2%

FONTE: (PRÓPRIA, 2025)

A partir dos resultados anteriores, nota-se que o método da ponte de Murray mantém um excelente grau de precisão. A diferença entre os ensaios pode ser atribuída à estabilização do contato no ponto da falha após a primeira injeção de corrente ou a uma melhor compensação de ruídos pelo equipamento na segunda tentativa.

Os resultados validam o método da ponte de Murray como uma ferramenta de pré-localização altamente eficaz e precisa, especialmente quando se utilizam equipamentos digitais modernos capazes de compensar as variáveis de campo. A precisão alcançada, inferior a 2% no segundo ensaio, é fundamental para reduzir o tempo e o custo da etapa de localização exata, minimizando o impacto operacional da falha.

6 CONSIDERAÇÕES SOBRE NORMAS E SEGURANÇA

A aplicação de métodos de localização de falhas em campo, como a ponte de Murray, no Brasil, não é regida por uma norma técnica específica da ABNT que detalhe o procedimento de localização de falhas. Em vez disso, a prática é enquadrada por um conjunto de regulamentações de segurança, guias técnicos internacionais e manuais de fabricantes, que, juntos, garantem a execução segura e metodologicamente correta do ensaio.

Para a metodologia técnica do ensaio no Brasil, as empresas e operadores frequentemente se baseiam em guias e padrões internacionais consolidados, como o IEEE Std 1234 - "*IEEE Guide for Fault-Locating Techniques on Shielded Power Cable Systems*", sendo ele uma referência proeminente, que descreve em detalhes os princípios, requisitos e limitações de vários métodos de pré-localização, incluindo as pontes de Murray e Glaser. Este tipo de documento serve como um guia de boas práticas para a execução técnica da localização.

Adicionalmente, os próprios fabricantes de equipamentos de teste, como a BAUR, fornecem manuais de operação detalhados que funcionam como um procedimento prático para o uso de seus dispositivos. Esses manuais descrevem o passo a passo da conexão do equipamento, da configuração dos parâmetros do cabo, do processo de ajuste de zero e da execução da medição, incorporando os princípios do método de Murray e as precauções de segurança necessárias.

Complementando, a ABNT NBR 7287 especifica os requisitos de desempenho para os próprios cabos de potência com isolamento de XLPE para tensões de 1 kV a 35 kV, que se encontra como o tipo de isolamento mais comum no paradigma brasileiro. Embora esta norma não detalhe os procedimentos de localização de falhas como a ponte de Murray, sua relevância é indireta, mas fundamental. Ela define as características construtivas e os critérios de aceitação que um cabo deve atender, estabelecendo os parâmetros de qualidade que, quando violados, resultam em uma falha. A NBR 7287 prescreve uma série de ensaios de tipo e de recebimento, como o ensaio de resistência de isolamento e o ensaio de tensão elétrica, que verificam a integridade do cabo ao injetar tensões. Dessa forma, quando uma falha ocorre e um método de localização de falhas como a ponte de Murray é empregado, o objetivo é localizar o ponto onde o cabo deixou de atender às especificações de isolamento demarcadas pela NBR 7287. A norma, portanto, define o "estado saudável" do cabo, servindo como referência contra a qual a falha é diagnosticada.

6.1 PROCEDIMENTOS DE SEGURANÇA

O pilar da regulamentação para qualquer intervenção em instalações de média tensão é a ABNT NBR 14039. Esta norma estabelece as condições de segurança para trabalhos em circuitos de média tensão. Antes de qualquer medição, a NBR 14039 exige um procedimento rigoroso que inclui o seccionamento efetivo do circuito, o impedimento de reenergização por meio de bloqueios, a ausência de tensão em todas os setores que compõem o sistema, a instalação de aterramento temporário com equipotencialização dos condutores e a proteção e sinalização da zona de trabalho. Portanto, embora não detalhe o método de Murray, esta norma define o ambiente seguro obrigatório no qual o método deve ser aplicado.

Dessa forma, a normalização da aplicação do método da ponte de Murray no Brasil é um sistema composto por normas nacionais e internacionais: a segurança do trabalho é garantida pela ABNT NBR 14039, a base técnica do procedimento é apoiada por guias internacionais como os do IEEE, e a execução prática é orientada pelos manuais redigidos pelos fabricantes dos equipamentos utilizados.

7 CONCLUSÃO

No decorrer deste trabalho, foi realizada uma análise detalhada acerca da aplicação do método da ponte de Murray na pré-localização de falhas em cabos isolados de média tensão. Após analisar outros métodos mais modernos, foi possível identificar que o método de Murray ainda detém relevância, uma vez que apresenta um custo-benefício excelente, com seu uso restringido apenas a situações de falha de alta impedância e, mesmo nesses casos, técnicas modernas podem auxiliar o método.

O ponto central da investigação, e o principal *insight* compreendido, foi a análise crítica dos principais métodos utilizados para a localização de falhas. Foi estabelecido que a eficácia de qualquer método de localização de falhas está intrinsecamente ligada ao entendimento da constituição do cabo e da natureza da falha. No caso do método da ponte de Murray, foi estabelecido que uma de suas principais desvantagens eram as correntes induzidas por cabos energizados próximos ao cabo medido. O relatório demonstrou que esta limitação foi superada pela evolução tecnológica. A incorporação de DSP, com algoritmos de filtragem e promediação, transformou a ponte de Murray de um circuito passivo e sensível a ruídos em um sistema de medição ativo, capaz de extrair o sinal de interesse com alta precisão mesmo em ambientes de influências externas grandes.

Portanto, conclui-se, através da pesquisa realizada, que o método ponte de Murray ainda apresenta aplicações no contexto moderno, amparado por tecnologia de DSP e guiada por normas de segurança como a ABNT NBR 14039, representa uma abordagem sólida, de baixo risco e economicamente viável. Sua capacidade de fornecer uma pré-localização precisa sem submeter a isolação envelhecida a surtos de alta energia o torna uma escolha viável para cabos em que tais surtos poderiam vir a causar maiores danos.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro, 2021.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7287: Cabos de potência com isolamento extrudada de polietileno reticulado (XLPE) para tensões de 1 kV a 35 kV - Requisitos de desempenho. Rio de Janeiro, 2020.
3. BAUR PRÜF- UND MESSTECHNIK. Aparelho de localização de defeitos shirla: Manual de Operação. Sulz, Áustria: BAUR, 2013.
4. BAUR PRÜF- UND MESSTECHNIK. protrac - Sistema de localização exata da BAUR. Sulz, Áustria: BAUR, 2024.
5. HELFRICK, Albert D.; COOPER, William D. Instrumentação Eletrônica Moderna e Técnicas de Medição. Tradução de Antônio Carlos Inácio Moreira. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1994.
6. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 1234-2019: IEEE Guide for Fault-Locating Techniques on Shielded Power Cable Systems. New York: IEEE, 2019.
7. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 400-2023: IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems. New York: IEEE, 2023.
8. ISONO, Shigeki et al. Development of Murray Loop Bridge for High Induced Voltage. IEEJ Transactions on Power and Energy, v. 123, n. 11, p. 1411-1418, 2003.
9. MONTEIRO, Raúl Filipe Queirós. Ensaio, localização de avarias e traçados em cabos subterrâneos. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2021.
10. PARK, Jin-woo; YANG, Byeong-mo; MUN, Kyeong-hee. Analysis of Accuracy of Fault Location using Murray Loop. In: KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS (KIEE) SUMMER CONFERENCE, 2011.

11. THUE, William A. (ed.). *Electrical Power Cable Engineering*. New York: Marcel Dekker, 1999.
12. PROBST, Robert. *Megger Cable 360 Summit*, Natal, 04 de junho de 2025. Informação verbal.