

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

ELAINE CRISTINA DO CARMO

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE METODOLOGIA PARA
CÁLCULO DA POSIÇÃO DE FALHAS EM CABOS ISOLADOS POR
MEIO DA ANÁLISE DE SINAIS NA BLINDAGEM METÁLICA**

Belo Horizonte

2025

ELAINE CRISTINA DO CARMO

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE METODOLOGIA PARA
CÁLCULO DA POSIÇÃO DE FALHAS EM CABOS ISOLADOS POR
MEIO DA ANÁLISE DE SINAIS NA BLINDAGEM METÁLICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Thales Alexandre Carvalho Maia

Belo Horizonte

2025

| | |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C287d | <p>Carmo, Elaine Cristina do. Desenvolvimento e validação de metodologia para cálculo da posição de falhas em cabos isolados por meio da análise de sinais na blindagem metálica [recurso eletrônico] / Elaine Cristina do Carmo. – 2025. 1 recurso online (123 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Thales Alexandre Carvalho Maia.</p> <p>Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Cabos elétricos – Teses. 3. Cabos elétricos – Localização de falhas – Teses. 4. Blindagem (Eletricidade) – Teses. 5. Impedância (Eletricidade) – Teses. I. Maia, Thales Alexandre Carvalho. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p>CDU: 621.3(043)</p> |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

"Desenvolvimento e Validação de Metodologia Para Cálculo da Posição de Falhas em Cabos Isolados por Meio da Análise de Sinais na Blindagem Metálica"

ELAINE CRISTINA DO CARMO

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 04 de julho de 2025.

Por:

Prof. Dr. Thales Alexandre Carvalho Maia
DEE (UFMG) - Orientador

Prof. Dr. Igor Amariz Pires
DELT (UFMG)

Prof. Dr. Sidelmo Magalhães Silva
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Leonardo Adolpho Rodrigues da Silva
DETEM (UFSJ)

Prof. Dr. Gustavo Rodrigues Lacerda Silva
Enacom (Enacom)

Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder
DEPEL (UFSJ)



Documento assinado eletronicamente por **Thales Alexandre Carvalho Maia, Professor do Magistério Superior**, em 04/07/2025, às 19:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marco Aurélio de Oliveira Schroeder, Usuário Externo**, em 07/07/2025, às 09:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Amariz Pires, Professor do Magistério Superior**, em 07/07/2025, às 17:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sidelmo Magalhaes Silva, Professor do Magistério Superior**, em 07/07/2025, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Adolpho Rodrigues da Silva, Usuário Externo**, em 14/07/2025, às 10:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Rodrigues Lacerda Silva, Usuário Externo**, em 14/07/2025, às 13:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4334919** e o código CRC **071B72B5**.

*Aos meus pais Maria e José,
meu filho André, meu irmão Anderson
e meus queridos mentores.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Criador pela essência do seu infinito amor em minha vida. Pelos inúmeros milagres vividos nessa caminhada que despertam minha eterna gratidão à essa preciosa luz. Realizar esse sonho sempre foi, e continua sendo, por intermédio Dele.

Aos meus pais, Maria e José, por me presentarem com a vida e por seguirmos juntos. Sou grata pela oportunidade que me proporcionaram de crescer como pessoa, enfrentando desafios e superando momentos intensos.

Ao meu filho André Luiz, amor eterno, puro e inocente. Mesmo sendo agora um jovem e lindo rapaz, será sempre o bebê que carreguei no colo enquanto o tempo me deixou! Sei que hoje ele não gosta que eu o chame de bebê, mas no momento certo ele vai entender.

Ao meu irmão Anderson, a quem admiro pela seriedade e honestidade em tudo o que faz. Um amigo leal, sempre disposto a ajudar e de braços abertos para apoiar em todos os momentos.

Ao Professor Dr. Thales Alexandre Carvalho Maia, pelo apoio, orientação e motivação nos momentos de dúvidas e incertezas. Pelas inúmeras ideias inovadoras e incentivos que contribuíram consideravelmente para minha formação!

Agradecimentos especiais às contribuições do Professor Dr. Leonardo Adolpho Rodrigues da Silva, pela liderança técnica e discussões à luz das aplicações e análises. Sua forma de pensar e amplo conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho.

A equipe de doutores, mestres, professores e funcionários da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, pelo desempenho íntegro em suas funções e pelo relevante papel desempenhado na sociedade, refletindo no desenvolvimento intelectual e científico de nosso país. Especialmente à Arlete, que, apesar da distância e do tempo, nunca se esqueceu de mim!

Aos colegas e amigos da Gerdau e Usina de Ouro Branco, pelo despertar de ideias, apoio, parceria e compartilhamento de experiências. Especialmente agradeço ao Fernando Albert e pela constante motivação e contribuições dos profissionais Fábio Freitas, Chico e Woston, os quais possuem minha genuína admiração.

Às minhas queridas Monalisa, Ludmila, Flávia, Taise, Andréia, Bruna, Virna, Raquel, Daniele, Thamirez, Nayara e Patrícia que são parte da presença feminina em minha vida a quem muito respeito e sinto intensa gratidão!

Fica aqui meu singelo agradecimento a todos que fizeram parte dessa história!

“Você tem poder sobre sua mente: não sobre eventos externos.
Perceba isso e você encontrará a sua força.”

Marco Aurélio - Século II d.C

RESUMO

A detecção de falhas em cabos isolados pode ser realizada por meio de medições de descargas parciais, utilizando modos de operação *offline* ou *online*. Em oposição ao método *offline*, que exige a desenergização do sistema elétrico, o modo *online* permite o diagnóstico do cabo com o sistema em operação. No entanto, apesar dos avanços tecnológicos, essa abordagem apresenta limitações devido à sensibilidade dos resultados à influência de ruídos, além disso, ela não realiza a localização do ponto de falha. O método baseado em impedância, aplicado de forma *online* para localização de falhas, surge como uma alternativa para superar parte desses desafios. Contudo, sua aplicação requer medições em ambas as extremidades do condutor principal, e a variação de carga contribui para o aumento do erro nos resultados do algoritmo de localização. Este trabalho investiga o uso dos parâmetros e sinais da blindagem metálica em cabos isolados para o cálculo da posição de falhas incipientes, com base no método de localização por impedância de dois terminais. A análise mostra que a aplicação do método à blindagem metálica elimina a necessidade de medição das correntes de fase, além de melhorar os resultados em 55,86% quando comparada à aplicação do mesmo método no condutor principal. A proposta apresenta vantagens que permitem identificar a ocorrência de falhas incipientes de forma *online* e calcular sua posição antes que evoluam para falhas permanentes. Dessa forma, este trabalho contribui para a estabilidade das redes isoladas, reduzindo descontinuidades no fornecimento e melhorando a qualidade do serviço prestado aos usuários.

Palavras-chave: Blindagem metálica. Cabos isolados. Falhas incipientes. Localização de falhas. Método da impedância.

ABSTRACT

The detection of faults in insulated cables can be carried out through partial discharge measurements, using either offline or online operation modes. In contrast to the offline method, which requires system shutdown, the online mode enables cable diagnostics while the system remains energized. However, despite technological advancements, this approach presents limitations due to the sensitivity of the results to noise influence. Moreover, it does not allow for the precise localization of the fault point. The impedance-based method, applied in online mode for fault location, emerges as an alternative to overcome some of these challenges. Nevertheless, its application requires voltage and current measurements at both ends of the main conductor, and load variations increase the error in the location algorithm results. This work investigates the use of parameters and signals from the metallic sheath of insulated cables to calculate the position of incipient faults, based on the two-terminal impedance fault location method. The analysis shows that applying the method to the metallic sheath eliminates the need for measuring phase currents and improves the results by 55.86% when compared to the application of the same method to the main conductor. The proposed approach offers advantages that enable the detection of incipient faults online and the calculation of their location before they evolve into permanent failures. Thus, this work contributes to the stability of insulated networks, reducing supply discontinuities and improving the quality of service delivered to users.

Keywords: Impedance-based method. Incipient faults. Insulated cables. Fault localization. Metallic sheath.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – Evolução do consumo global de energia no mundo por tipo de fonte primária (EMBER; INSTITUTE, 2024). | 20 |
| Figura 1.2 – Exemplos de aplicações de cabos isolados em usinas de geração: a) Offshore - submarinos e b) Onshore - subterrâneos. | 21 |
| Figura 1.3 – Diagrama comparativo da evolução de falhas de isolação: cenário com detecção de falhas incipientes versus percepção convencional sem identificação dessas falhas (Adaptado de (IBRAHIM et al., 2024)). | 23 |
| Figura 1.4 – Formas de onda de corrente antes e após a ocorrência de uma falha incipiente em sistema trifásico (a) subcíclica e (b) multicíclica (SIDHU; XU, 2010). | 24 |
| Figura 2.1 – Cabo elétrico do final do século XIX que utilizava fibra de látex gutta-percha como material de isolação. | 31 |
| Figura 2.2 – Imagens de cabos isolados com dois tipos de materiais dielétricos, sendo: a) EPR e b) XLPE. | 32 |
| Figura 2.3 – Principais partes estruturais integrantes de um cabo elétrico isolado. | 33 |
| Figura 2.4 – Formatos típicos de condutores principais de cabos isolados. | 34 |
| Figura 2.5 – Modos construtivos dos cabos isolados: (a) cabo unipolar e (b) cabo tripolar (SILVA; BAK, 2013). | 34 |
| Figura 2.6 – Métodos de aterramento para as blindagens metálicas: (a) <i>single-bonded</i> sem SVL; (b) <i>single-bonded</i> com SVL e condutor de aterramento auxiliar; (c) <i>solid-bonded</i> e (d) <i>cross-bonded</i> | 38 |
| Figura 2.7 – Etapas do processo de deterioração do isolamento do cabo e seus efeitos no sistema elétrico (adaptado de (LU et al., 2022)). | 40 |
| Figura 2.8 – Exemplos de problemas que comprometem o isolamento dos cabos (Adaptado de (BINDI et al., 2023)). | 40 |
| Figura 2.9 – Imagens registradas de defeitos na isolação causados por arborescência elétrica e arborescência por água. | 41 |
| Figura 2.10 – Registro de forma de onda de corrente de uma falha incipiente autoextinguível com duração de aproximadamente 1/2 ciclo. | 41 |
| Figura 2.11 – Curva de potencial de falha ou curva PF - <i>Potential Failure</i> - (MIRSHEKALI; SANTOS; SHAKER, 2023). | 42 |
| Figura 2.12 – Esquema de montagem de equipamento para monitoramento <i>online</i> de descargas parciais (MIRSHEKALI; SANTOS; SHAKER, 2023). | 43 |
| Figura 2.13 – Conceitos de medição do fator de dissipação da isolação ou tangente δ (LI; YONG; XU, 2018). | 44 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.1 – Etapas necessárias entre a detecção de uma falha em um cabo isolado até o momento da reenergização. | 47 |
| Figura 3.2 – Resumo das principais técnicas de pré-localização e localização de falhas em cabos isolados e indicação dos valores de impedância da falha recomendados. | 48 |
| Figura 3.3 – Exemplos de gráficos de respostas do ensaio de refletometria de acordo com o tipo de falha. | 49 |
| Figura 3.4 – Princípio do método de descarga capacitiva ou <i>thumper</i> + detecção acústica para localização de falhas (BROOKE, 1985). | 50 |
| Figura 3.5 – Circuito elétrico equivalente de uma falha a terra no ponto "m" (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2014b). | 52 |
| Figura 3.6 – Distribuição quantitativa dos principais problemas de localização de falhas em cabos citados na literatura estudada (Fonte: elaborada pela autora). | 54 |
| Figura 3.7 – Modelo de localização de falha com a aplicação do método da impedância de dois terminais proposto por (QU et al., 2022). | 56 |
| Figura 3.8 – Modelo de localização de falha pelo método da impedância de dois terminais para cabos <i>cross-bonded</i> (Adaptado de (ZHU et al., 2022)). | 58 |
| Figura 3.9 – Modelo de localização de falha utilizando o cálculo de resistência descrito no trabalho de (BAAYEH; KLEEMANN, 2023). | 59 |
| Figura 4.1 – Circuito equivalente para aplicação do método da impedância de dois terminais utilizando o cálculo do valor da tensão no ponto de falha V_F | 61 |
| Figura 4.2 – Diagrama do modelo com cabos trifásicos considerando impedâncias próprias e mútuas (adaptado de (XU, 2011)). | 63 |
| Figura 4.3 – Representação modelo π do cabo isolado incluindo os parâmetros da blindagem metálica para regime permanente ou fenômenos de baixa frequência. | 71 |
| Figura 4.4 – Diagrama unifilar do circuito monitorado para análise e validação do modelo. | 72 |
| Figura 4.5 – Resultados de corrente da fonte e corrente na blindagem metálica obtidos por meio da simulação do modelo, considerando os parâmetros definidos no estudo de caso. | 73 |
| Figura 4.6 – Circuito elétrico equivalente para dedução das equações de tensão no ponto de falha V_F no condutor principal e V_x na blindagem. | 74 |
| Figura 4.7 – Diagrama elétrico do circuito trifásico implementado nas análises realizadas. | 79 |
| Figura 4.8 – Comparativo entre as variáveis necessárias para cálculo do ponto de falha pelo método da impedância considerando: (a) condutor principal e (b) blindagem metálica. | 81 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.9 – Caminho percorrido das falhas incipientes entre condutor principal e blindagem metálica no ponto de defeito x e cabo de comprimento total L . | 83 |
| Figura 4.10–Diagrama unifilar do estudo de caso, indicando as posições pré-determinadas das falhas e os pontos de medição de tensão e corrente considerados em cada extremidade do cabo. | 85 |
| Figura 4.11–Gráfico comparativo entre os erros relativos calculados para método da impedância no condutor principal e na blindagem metálica. | 86 |
| Figura 4.12–Gráficos das formas de onda de tensão e corrente nas fases e dos resultados das raízes calculadas na ocorrência de uma falha incipiente no instante de tempo 4,2 ms e posição igual a 40% do comprimento do circuito (ou 400 metros). | 87 |
| Figura 4.13–Alterações na corrente e tensão de sequência zero na blindagem metálica. | 88 |
| Figura 4.14–Gráfico de resultados dos cálculos das raízes pelo algoritmo antes, durante e após uma falha incipiente no intervalo de 4,2 ms a 8,4 ms. | 88 |
| Figura 4.15–Gráficos de tensões e correntes de sequência zero durante a presença de falha incipiente. | 89 |
| Figura 4.16–Resposta das raízes indicando falso positivo antes da ocorrência da falha, considerando sistemas desequilibrados. | 90 |
| Figura 4.17–Imagens de cabos tripolares sendo: (a) sem blindagem metálica e (b) com blindagem metálica. | 92 |
| Figura 4.18–Fluxograma do passo a passo para realização dos cálculos das raízes e resultados da posição da falha estimada. | 93 |
| Figura 5.1 – Representação do circuito elétrico de modelagem do arco elétrico ou arborescência e as formas de onda associadas. | 97 |
| Figura 5.2 – Representação do circuito utilizado para simulação de falhas incipientes, destacando o arranjo com diodos em antiparalelo. | 98 |
| Figura 5.3 – Representação do arranjo utilizado para o experimento de falha incipiente com a inserção da resistência de falha R_F . | 99 |
| Figura 5.4 – Análise comparativa entre os sinais de corrente e tensão na blindagem metálica: (a) valores obtidos experimentalmente; (b) comparação entre os sinais medidos e os resultados das simulações. | 101 |
| Figura 5.5 – Fluxograma para verificação do instante de alteração das raízes das equações no período de início e duração da falha. | 102 |
| Figura 5.6 – Exemplo de resultado de localização das falha incipientes do experimento considerando distância de 70%. | 103 |
| Figura 5.7 – Gráficos de resultados dos cálculos de estimativa de posição das falhas incipientes em todos os pontos coletados do experimento. | 104 |
| Figura A.1–Campo elétrico em um condutor isolado (Electric Power Research Institute (EPRI), 2006). | 117 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura A.2–Métodos de instalação básicos sendo (a) plana ou <i>flat</i> e (b) trifólio (ARGAUT, 2021). | 119 |
| Figura A.3–Esquema básico da montagem para coleta de dados e processamento dos cálculos da posição de falhas. | 120 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1.1 – Comparativo entre abordagens adotadas na literatura e proposta deste trabalho. | 27 |
| Tabela 2.1 – Características comparativas entre cabos tripolares e monopolares. . . | 35 |
| Tabela 2.2 – Resumo das principais características dos materiais isolantes de cabos. | 36 |
| Tabela 2.3 – Análise comparativa entre os métodos de aterramento para blindagem metálica. | 39 |
| Tabela 2.4 – Características das principais técnicas de diagnóstico em cabos isolados. | 45 |
| Tabela 4.1 – Principais parâmetros do circuito do alimentador industrial de 13,8 kV em estudo. | 73 |
| Tabela 4.2 – Termos dos coeficientes da equação do método da impedância no condutor principal. | 82 |
| Tabela 4.3 – Termos dos coeficientes da equação do método da impedância na blindagem metálica. | 82 |
| Tabela 4.4 – Valores de referência para resistências de falha citadas nas literaturas correspondentes. | 83 |
| Tabela 4.5 – Resultados dos cálculos da posição da falha para diferentes valores de resistência de defeito, simulados com a falha posicionada a 100 metros da fonte, correspondente a 10% do comprimento total do cabo. | 84 |
| Tabela 4.6 – Resultados calculados para a localização da falha considerando diferentes tipos de carga conectadas, com a falha posicionada a 100 metros da fonte (ou 10% do comprimento total do circuito). | 90 |
| Tabela 4.7 – Resumo estatístico da simulação Monte Carlo para uma amostragem com 1000 execuções. | 95 |
| Tabela 5.1 – Posições de falhas pré-determinadas e seus correspondentes percentuais do comprimento total do cabo. | 100 |
| Tabela 5.2 – Comparativo entre distâncias reais e calculadas para diferentes pontos de falha, assim como os erros percentuais relativos. | 105 |
| Tabela A.1 – Quantitativos previstos para a montagem de protótipo. | 120 |
| Tabela B.1 – Principais parâmetros do circuito do alimentador industrial de 13,8 kV do estudo de caso. | 121 |
| Tabela B.2 – Propriedades dos Cabos de Cobre EPR 8.7/15kV - Seção nominal 240 mm ² | 122 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| NBR | Normas Brasileiras |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> |
| IEC | <i>International Electrotechnical Commission</i> |
| EPR | <i>Ethylen Propylene Rubber</i> - Borracha Etileno-Propileno |
| XLPE | <i>Cross-linked Polyethylen</i> - Polietileno Reticulado |
| PVC | Policloreto de Vinila |
| TDR | <i>Time Domain Reflectometry</i> (Refletometria no Domínio do Tempo) |
| FDR | <i>Frequency Domain Reflectometry</i> (Refletometria no Domínio da Frequência) |
| PQM | <i>Power Quality Monitor</i> - Monitoramento de Qualidade de Energia |
| IACS | <i>International Annealed Copper Standard</i> - Padrão Internacional de Cobre Recozido |
| DP | Descargas Parciais |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| DC | <i>Direct Current</i> |
| RP | Regime Permanente |
| FI | Falhas Incipientes |
| HV | <i>High Voltage</i> - Alta Tensão |
| EHV | <i>Extra High Voltage</i> - Extra Alta Tensão |
| SLG | <i>Single-Line to Ground</i> (Falta fase-terra) |
| SVL | <i>Sheath Voltage Limiter</i> (Limitador de Tensão da Blindagem) |
| IED | <i>Intelligent Electronic Device</i> |
| Ab | Área transversal da blindagem metálica, [m ²] |

| | |
|-----|------------------------------------------------------------|
| dc | Diâmetro do condutor, [mm] |
| db | Diâmetro interno da blindagem metálica, [mm] |
| f | Frequência, [Hz] |
| Lb | Indutância da blindagem, [H/m] |
| Rb | Resistência da blindagem, [Ω /m] |
| S | Distância concêntrica dos condutores, [mm] |
| Eb | Espessura da camada da blindagem metálica, [mm] |
| Er | Erro relativo, [%] |
| Xm | Reatância mútua entre condutor e blindagem, [Ω /m] |
| Xb | Reatância da blindagem, [Ω /m] |
| Vb | Tensão na blindagem, [V] |
| Is | Corrente da fonte, [A] |
| Ib | Corrente da blindagem metálica, [A] |
| Vs | Tensão fase-terra da fonte, [V] |
| R | Resistência, [Ω] |
| L | Indutância, [H] |
| C | Capacitância, [F] |
| Z | Impedância do condutor principal, [Ω] |
| Zb | Impedância da blindagem metálica, [Ω /m] |
| Vb | Tensão na blindagem metálica (lado não aterrado), [V] |
| Vx | Tensão na blindagem metálica no ponto de falha, [V] |
| VF | Tensão no ponto de falha no condutor principal, [V] |
| DMG | Distância Média Geométrica, [mm] |
| DMB | Diâmetro Médio da Blindagem, [mm] |
| Ts | Passo de Integração das Simulações, [s] |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|
| λ | Comprimento de onda, [m] |
| ε_0 | Permissividade no vácuo = $8.854187819 \times 10^{-12}$, [C^2/Nm^2] |
| ε_r | Permissividade relativa do dielétrico, Adimensional |
| θ | Temperatura de operação do condutor, [°C] |
| ρ_s | Resistividade da blindagem metálica, [$\Omega.m$] |
| ω | Frequência angular = $2\pi f$, [rad/s] |
| μ_0 | Permeabilidade no vácuo = $4\pi \times 10^{-7}$, [H/m] |
| μ_r | Permeabilidade relativa do material, Adimensional |
| δ | Ângulo do fator de dissipação do isolante, [°] |
| $\tan \delta$ | Fator de dissipação da camada isolante, [°] |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 20 |
| 1.1 | Motivação | 22 |
| 1.2 | Objetivos | 25 |
| 1.3 | Metodologia | 25 |
| 1.4 | Contribuições | 26 |
| 1.5 | Produção Intelectual | 28 |
| 1.6 | Organização do Texto | 28 |
| 2 | ESTADO DA ARTE DE CABOS ISOLADOS | 30 |
| 2.1 | Histórico dos Cabos isolados | 30 |
| 2.2 | Aspectos Construtivos Cabos Isolados | 32 |
| 2.2.1 | Condutor Principal | 34 |
| 2.2.2 | Camada Semicondutiva | 35 |
| 2.2.3 | Isolação | 36 |
| 2.2.4 | Blindagem Metálica | 37 |
| 2.2.5 | Capa Externa | 37 |
| 2.3 | Configurações de Aterramento da Blindagem Metálica | 37 |
| 2.4 | Falhas em Cabos Isolados | 39 |
| 2.4.1 | Metodologias de Avaliação do Estado da Isolação | 42 |
| 2.5 | Considerações Finais | 45 |
| 3 | LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM CABOS ISOLADOS | 47 |
| 3.1 | Técnicas de Pré-Localização e Localização | 47 |
| 3.2 | Técnicas de Localização por Impedância | 51 |
| 3.3 | Estado da Arte das Técnicas de Localização | 54 |
| 3.4 | Considerações Finais | 60 |
| 4 | METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA POSIÇÃO DE FALHAS | 61 |
| 4.1 | Fundamentos Teóricos | 61 |
| 4.2 | Modelagem de Cabos Isolados Utilizando a Blindagem Metálica | 62 |
| 4.2.1 | Cálculo dos Parâmetros | 62 |
| 4.2.2 | Representação do Cabo Isolado | 70 |
| 4.3 | Equações para o Cálculo da Posição de Falha | 73 |
| 4.3.1 | Cálculo do Ponto de Falha pelo Condutor Principal | 75 |
| 4.3.2 | Cálculo do Ponto de Falha pela Blindagem Metálica | 77 |
| 4.4 | Sistemas Trifásicos Aterrados por Resistência | 78 |
| 4.5 | Comparativo entre Aplicações do Método de Impedância | 80 |
| 4.6 | Simulações de Falhas Incipientes e Algoritmos de Cálculo | 82 |

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.6.1 | Implementação do Modelo em Simulação Computacional | 82 |
| 4.6.2 | Procedimentos das Simulações e Análises dos Resultados | 83 |
| 4.7 | Metodologia para Cálculo da Posição de Falhas | 92 |
| 4.8 | Análise de Sensibilidade do Modelo | 94 |
| 4.9 | Considerações Finais | 96 |
| 5 | ENSAIOS EXPERIMENTAIS | 97 |
| 5.1 | Circuito Elétrico para Simular Falhas Incipientes | 97 |
| 5.2 | Bancada de Ensaios | 98 |
| 5.3 | Considerações Finais | 105 |
| 6 | CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE | 106 |
| 6.1 | Propostas de Continuidade | 107 |
| | REFERÊNCIAS | 109 |
| | Apêndice A Fenômenos Eletromagnéticos | 117 |
| A.1 | Campos Elétricos e Magnéticos | 117 |
| A.2 | Efeitos Proximidade e Pelicular | 117 |
| A.3 | Métodos de Instalação | 118 |
| A.4 | Proposta de Montagem de Protótipo | 119 |
| | Apêndice B Referências de Parâmetros de Cabos Isolados | 121 |

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um dos principais impulsionadores da produtividade global e imprescindível para o progresso social, estando presente em todas as atividades industriais, comerciais e residenciais (RITCHIE; ROSADO; ROSER, 2020). Nos últimos quatro anos (2020 a 2023), o consumo global médio anual de energia alcançou aproximadamente 183.230 TWh, incentivado pelo crescimento populacional, desenvolvimento econômico, urbanização e pela crescente adoção de tecnologias intensivas em energia, como veículos elétricos e dispositivos inteligentes (EMBER; INSTITUTE, 2024).

A expansão das fontes de geração de energia em nível global é ilustrada no gráfico da Figura 1.1. Dentre as fontes renováveis, as energias solar e eólica apresentaram os maiores crescimentos, registrando aumentos de 90% e 44%, respectivamente, em um intervalo de quatro anos.

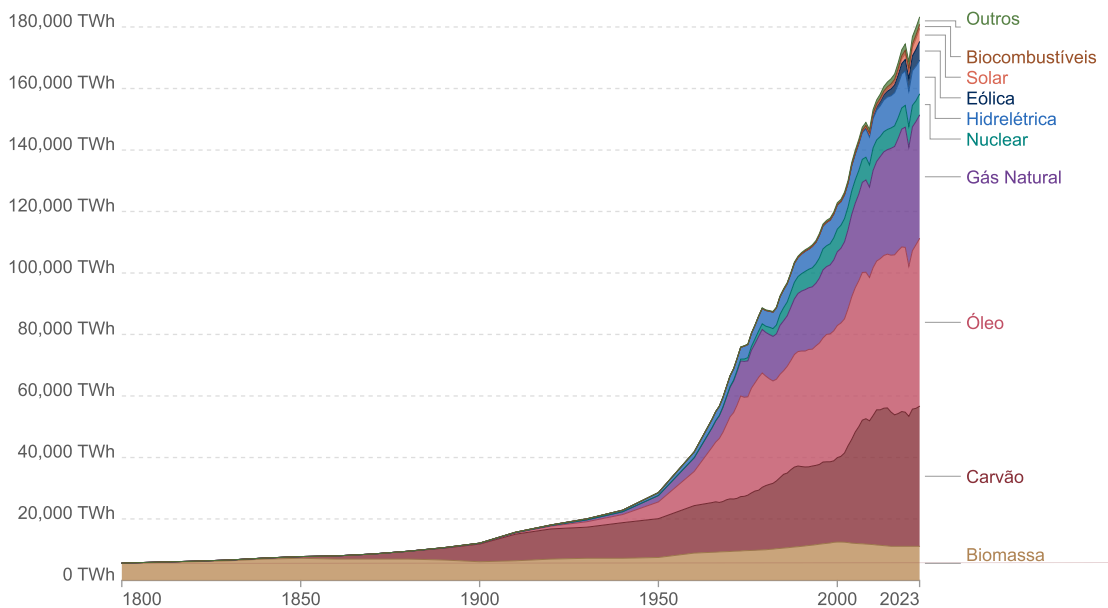


Figura 1.1 – Evolução do consumo global de energia no mundo por tipo de fonte primária (EMBER; INSTITUTE, 2024).

A transição global para fontes de energia de baixa emissão de carbono requer a implantação de usinas em diversas regiões, não se restringindo apenas aos locais próximos aos pontos de conexão (CLIFTON et al., 2022). Esses sistemas devem ser capazes de atender às restrições de espaço e distância aos pontos de consumo, maximizando a utilização das áreas disponíveis e adaptando-se às demandas em constante evolução do setor energético (EMBER; INSTITUTE, 2024). O aumento da demanda por eletricidade, aliado à crescente pressão dos consumidores, intensifica a exigência por um fornecimento

de energia com qualidade, caracterizado por um serviço contínuo e ininterrupto. Nesse cenário, a confiabilidade das redes elétricas emerge como um dos principais indicadores de desempenho para as concessionárias de distribuição de energia elétrica (LOURO; FERREIRA, 2021).

Nos últimos anos, as redes elétricas passaram por transformações para atender às demandas de modernização da infraestrutura de transmissão e distribuição. A incorporação de tecnologias de monitoramento e controle garantem a estabilidade e eficiência do sistema (PERSONAL et al., 2016). Além disso, a evolução das adequações regulatórias demandam a redução da frequência e da duração das interrupções no fornecimento de energia elétrica (LOURO; FERREIRA, 2022).

Nesse contexto, as instalações com cabos isolados são empregadas de forma estratégica devido à sua segurança operacional e elevado desempenho. A implantação de aplicações isoladas tem expandido devido à sua confiabilidade e eficiência comprovadas em diferentes cenários de operação (GOSWAMI et al., 2020; AIZENBERG et al., 2020; LOWCZOWSKI et al., 2020; AIZENBERG et al., 2020; XU et al., 2023; BAAYEH; KLEEMANN, 2023; YEGANEJOU et al., 2023; ZHANG et al., 2024). A diversidade de ambientes em que esses cabos são empregados é ilustrada na Figura 1.2.



Figura 1.2 – Exemplos de aplicações de cabos isolados em usinas de geração: a) Offshore - submarinos e b) Onshore - subterrâneos.

Os cabos isolados operam sob condições adversas, estando sujeitos a ambientes agressivos e a esforços que podem comprometer a integridade do isolamento. Em sistemas elétricos que utilizam cabos isolados, as falhas na isolação constituem uma das principais causas de interrupções (LOURO; FERREIRA, 2022). Sem sinais de alerta evidentes, o início da ocorrência dessas falhas acontece de forma contínua e silenciosa. A identificação da posição dessas falhas nas redes de transmissão e distribuição, por sua vez, demanda atenção do setor de energia e exige o desenvolvimento de técnicas que aprimorem a detecção e localização (HIGINBOTHAM; HIGINBOTHAM, 2018; XIAO et al., 2023).

A operação das redes elétricas apresenta registros de distúrbios transitórios e

intermitentes, resultando em falhas permanentes após múltiplas incidências (WISCHKA-EMPER et al., 2022; XIAO et al., 2023). Na ocorrência de falhas permanentes em cabos isolados, as intervenções de manutenção são prolongadas e de difícil execução (HIGINBOTHAM; HIGINBOTHAM, 2018). A inexistência de indícios visíveis acentua o grau de dificuldade nas intervenções (LOWCZOWSKI et al., 2020). Tal situação resulta em um tempo de reparo elevado para cabos isolados, variando entre 48 e 480 horas, o que é de 6 a 10 vezes superior ao tempo necessário para reparar linhas de transmissão aéreas (OCŁÓN et al., 2021). Ademais, os custos de manutenção dos cabos de energia isolados superam aqueles associados às linhas aéreas (AFOTEY; ALIADEH, 2020).

O monitoramento contínuo das variáveis das redes isoladas fornece subsídios importantes para o aprimoramento das técnicas de identificação de falhas em estágios iniciais (LV et al., 2023). Dessa forma, a detecção e a localização *online* das falhas permitem evitar a evolução para uma falha permanente, prevenindo interrupções não programadas no fornecimento de energia elétrica e minimizando a severidade dos danos (ASIF et al., 2020).

1.1 Motivação

Antes da ocorrência de uma falha permanente, pequenas descargas elétricas tendem a surgir em regiões da isolação dos cabos que apresentam sinais de deterioração. Essas descargas são denominadas falhas incipientes (KULKARNI; SANTOSO; SHORT, 2014; ZHANG et al., 2016; MAHMOUD et al., 2021; XU et al., 2023; CRUZ et al., 2023).

A maioria das falhas permanentes em cabos isolados evolui a partir de falhas incipientes (ZHANG et al., 2016; MAHMOUD et al., 2021; XU et al., 2023). São consideradas falhas de estágio inicial de um problema maior em desenvolvimento, acontecem de forma gradual e não são detectadas pelos sistemas de proteção convencionais (LU et al., 2022; QU et al., 2022). As falhas incipientes podem durar de 1/4 de ciclo até 4 ciclos em 60 Hz, além de serem autoextinguíveis e intermitentes (SIDHU; XU, 2010; YANG, 2018; QU et al., 2022; CHI et al., 2022).

A evolução das falhas em cabos elétricos, desde o estado de operação normal até a ocorrência de falha permanente, é ilustrada no esquema da Figura 1.3. No cenário real, a falha permanente é antecedida por eventos de falhas incipientes, que se manifestam de forma cíclica e intermitente ao longo do tempo. Na abordagem convencional, esses eventos geralmente não são considerados, pois não geram perturbações capazes de sensibilizar os sistemas de proteção no sistema elétrico de potência, dificultando sua identificação antes da ocorrência da falha permanente.

Em cabos isolados, as falhas incipientes podem evoluir para falhas permanentes ao longo de um período que pode variar de dias a meses, aumentando a frequência de



Figura 1.3 – Diagrama comparativo da evolução de falhas de isolamento: cenário com detecção de falhas incipientes versus percepção convencional sem identificação dessas falhas (Adaptado de (IBRAHIM et al., 2024)).

ocorrência próximo ao limite da interrupção (KULKARNI; SANTOSO; SHORT, 2014; BRETAS et al., 2017; PAN et al., 2020; LI et al., 2023). Essas falhas podem ser ocasionadas por vazios nas camadas isolantes dos cabos ou por defeitos em emendas e terminações. Em geral, os eventos estão associados a fenômenos de formação de arborescências (SIDHU; XU, 2009; SONG et al., 2022).

De acordo com o relatório do Subcomitê de Qualidade de Energia do IEEE (2018), as falhas incipientes são consideradas a assinatura elétrica de falhas em cabos isolados. São anomalias sem impactos operacionais imediatos, embora possam se tornar problemas maiores se não forem identificadas e corrigidas (LU et al., 2022; YEGANEJOU et al., 2023). Um exemplo de oscilografia correspondente a uma falha incipiente é mostrada na Figura 1.4 (KULKARNI; SANTOSO; SHORT, 2014) indicando um provável problema das descargas elétricas na isolação.

O envelhecimento da isolação em cabos isolados ocorre de forma gradual e não uniforme (LI; YONG; XU, 2018; CHOUDHARY et al., 2022; XU et al., 2023). Fatores como sobretensões, sobrecorrentes, defeitos mecânicos, condições ambientais, presença de umidade e contaminação química podem contribuir para o surgimento de falhas incipientes na isolação.

A avaliação isolada de critérios de vida útil e tempo de operação não é suficiente para justificar a necessidade de intervenções ou substituições dos cabos isolados (LI; YONG; XU, 2018). Nesse contexto, diversas técnicas são utilizadas para detectar e localizar falhas, entre as quais se destacam: o teste de descargas parciais, que pode ser realizado *online* ou *offline* (WU; SO, 2019); ensaio de tangente de delta que fornece uma avaliação global do isolamento (ZHU; ZHENG, 2021); o teste de medição de resistência de isolamento (AL-ONAZI et al., 2021); o método da impedância, que estima a distância até o ponto de

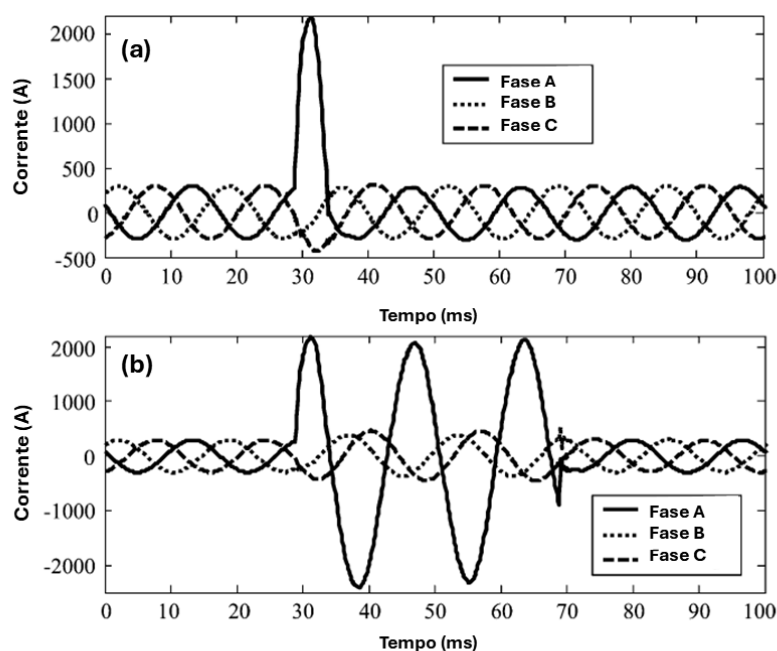


Figura 1.4 – Formas de onda de corrente antes e após a ocorrência de uma falha incipiente em sistema trifásico (a) subcíclica e (b) multicíclica (SIDHU; XU, 2010).

falha com base nas tensões e correntes medidas nas extremidades do cabo isolado (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2014b); a análise de ondas viajantes, que utiliza os tempos de propagação das ondas (TARIQ et al., 2022); a refletometria no domínio do tempo (TDR) e da frequência (FDR) (YIN; CHEN; WANG, 2024), que analisam descontinuidades no cabo; além de métodos baseados em medições de corrente de fuga na blindagem metálica (WU; ZHANG, 2022).

Dentre essas abordagens, destaca-se a utilização de sinais provenientes da blindagem metálica como fonte adicional de diagnóstico (ZHANG et al., 2016; HE et al., 2018; LV et al., 2023; ZHOU; YI; DONG, 2017). O monitoramento *online* das correntes na blindagem possibilita a identificação de falhas de aterramento durante a instalação, bem como conexões incorretas (LOWCZOWSKI; OLEJNIK, 2022).

Embora existam estudos voltados ao monitoramento da corrente na blindagem metálica para fins de diagnóstico da isolação, ainda permanecem lacunas na literatura quanto à análise de outras grandezas elétricas disponíveis nessa estrutura, as quais podem conter informações relevantes sobre a condição do isolamento. Nesse contexto, o comportamento das tensões nas blindagens metálicas de cabos isolados do tipo *single-bonded* (aterradas em apenas uma extremidade) já foi documentado em diversos estudos (CHI et al., 2020; SCHÖTT-SZYMCZAK; WALCZAK, 2020; ARUNJOTHI; THIRUMURTHY; MEENA, 2021; SUWANASRI et al., 2021; DAS; REDDY, 2022). Esses estudos fornecem uma base para o desenvolvimento de novas metodologias de monitoramento considerando a

análise adicional da tensão na blindagem, detecção e cálculo da posição de falhas incipientes em cabos isolados.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo investigar a utilização dos parâmetros e sinais elétricos da blindagem metálica no cálculo da posição de falhas incipientes em cabos isolados. A pesquisa propõe o desenvolvimento de uma metodologia de localização baseada no monitoramento e análise das grandezas medidas na blindagem de forma *online*. O método busca aprimorar o processo de estimativa da posição da falha, oferecendo resultados mais próximos da localização real quando comparados aos obtidos por abordagens baseadas nas medições do condutor principal.

Os objetivos específicos delineados como principais direcionadores para o atingimento do objetivo geral são:

- i. Investigar a tecnologia estrutural dos cabos isolados, analisando os diferentes tipos construtivos, os materiais de isolamento e suas propriedades: avaliar os métodos de instalação, os sistemas de proteção e as estratégias de manutenção, com o objetivo de compreender sua influência na confiabilidade e durabilidade dos cabos durante a operação.
- ii. Revisar e sistematizar os fenômenos associados às falhas incipientes em cabos isolados: analisar o processo de deterioração da isolamento, sua evolução e os fatores que a influenciam. Examinar as definições e os mecanismos associados a essas falhas, identificando suas características a partir da resposta dos sinais elétricos no condutor principal e na blindagem metálica.
- iii. Identificar e avaliar as principais técnicas e modelos de localização de falhas incipientes: analisar aplicações, vantagens, limitações e os resultados obtidos, a fim de compreender o estado da arte e mapear as lacunas de pesquisa.
- iv. Analisar as influências das falhas incipientes nas variações dos parâmetros e sinais na blindagem metálica e como estes podem ser utilizados para proporcionar o cálculo da posição de falhas.

1.3 Metodologia

Para atingir o objetivo desta pesquisa, o trabalho foi organizado a partir do desenvolvimento das seguintes etapas:

- Levantamento do referencial teórico sobre o tema: procurou-se revisar e compreender as teorias, pesquisas, trabalhos, fenômenos e métodos que estão sendo desenvolvidos no campo científico recente, buscando avaliar a abrangência e aplicação do tema, além de verificar os resultados conhecidos e alcançados, assim como as limitações e lacunas de pesquisa.
- Seleção de método a ser aplicado para localização de falhas em cabos elétricos: método de impedâncias de dois terminais ao condutor principal e à blindagem metálica e análises comparativas entre as duas abordagens.
- Realização de um estudo de caso com medições em campo das correntes e tensões no condutor principal, além da corrente na blindagem metálica, com o objetivo de validar os resultados das simulações em regime permanente, garantindo a aderência do modelo à resposta real do sistema.
- Simulações computacionais de pontos de falhas em circuito trifásico: aplicação do modelo e simulação de falhas incipientes em diferentes seções previamente definidas do cabo, com o objetivo de calcular a localização do ponto de falha. O estudo inclui a avaliação da sensibilidade dos parâmetros envolvidos, a estimativa dos possíveis erros associados e a avaliação de influências externas.
- Experimentação laboratorial: seleção de amostra de cabo isolado para a realização de testes experimentais em condição de falha do condutor principal para a blindagem metálica.

1.4 Contribuições

A principal contribuição desta tese é a proposição da aplicação do método baseado em impedância de dois terminais para o cálculo da posição de falhas de forma *online* em cabos isolados, utilizando os parâmetros e sinais de tensão e corrente na blindagem metálica. A aplicação desse método desacopla a dependência de medições de corrente em ambas as extremidades do condutor principal, reduzindo a necessidade de instalação de dispositivos adicionais para a medição dessas grandezas. As simulações realizadas com a aplicação do método proposto demonstraram redução dos erros na estimativa da posição do ponto de falha, em comparação à aplicação do mesmo método no condutor principal.

As contribuições adicionais desta pesquisa podem ser destacadas conforme segue:

- Desenvolvimento de nova metodologia para utilização de sinais na blindagem metálica em cabos isolados como alternativa para identificação e cálculo da posição de falhas incipientes de forma *online*.

- Uma nova abordagem para localizar o ponto de ocorrência de falhas incipientes em cabos isolados aplicando o método das impedâncias no condutor da blindagem metálica.
- Proposta de desenvolvimento de um algoritmo para análise de dados e cálculo da posição de falhas com base nos sinais da blindagem metálica.

Com base no conhecimento atualmente consolidado, esse trabalho apresenta as principais metodologias relacionadas ao tema desta pesquisa, com o objetivo de contextualizar o estado da arte e evidenciar a originalidade da abordagem proposta neste trabalho. A Tabela 1.1 apresenta um resumo das análises realizadas sobre as lacunas identificadas na literatura.

Tabela 1.1 – Comparativo entre abordagens adotadas na literatura e proposta deste trabalho.

| Abordagem | (PAN et al., 2020) | (QU et al., 2022) | (ZHU et al., 2022) | (BAAYEH; KLEEMANN, 2023) | Esta tese |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|-----------|
| Localiza falhas incipientes | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ |
| Método da impedância | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ |
| Condutor principal | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Condutor blindagem | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Usa corrente na blindagem | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Usa tensão na blindagem | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |

As tensões e correntes na blindagem metálica podem ser exploradas como variáveis para identificação e localização de falhas incipientes em cabos isolados. Em regime permanente, estabelecem-se valores característicos desses parâmetros na blindagem, conforme a configuração do circuito. Esses valores se alteram no instante da falha devido ao fluxo adicional de corrente e queda de tensão nas impedâncias. Essas variações mantêm uma relação proporcional com a posição da falha, podendo ser utilizadas como indicativo de sua localização. A medição simultânea dessas grandezas possibilita a aplicação do método de impedância de dois terminais, permitindo estimar a distância até o ponto de falha de forma não intrusiva e *online*.

1.5 Produção Intelectual

Os materiais disponibilizados e as publicações relacionadas ao trabalho de pesquisa apresentado nesta tese foram:

- Artigo disponibilizado em *Pre-Print* na Rede SSRN (*Social Science Research Network*) no estágio inicial da pesquisa intitulado: *Analysis of Metallic Sheath Waveforms on Single-Bonded Cables: A Case Study*. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4856450>
- Artigo disponibilizado em *Pre-Print* na Rede SSRN (*Social Science Research Network*) no estágio inicial da pesquisa intitulado: *Survey of Incipient Faults Localization Methods in Underground Cables Using Sheath Monitoring*. <https://ssrn.com/abstract/4918372>.
- Artigo publicado na revista : ” *Computers and Electrical Engineering*” (ISSN 0045-7906, classificação A2 CAPES) intitulado ” *Survey on incipient fault localization methods in underground cables*” .<https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109961>.
- Artigo publicado na revista: ” *IEEE Access*” (ISSN 2169-3536, classificação A3 CAPES) intitulado ” *Incipient Fault Localization using Sheath and Impedance-Based Method for Single-Bonded Underground Cables*” doi: 10.1109/ACCESS.2025.3538535.

1.6 Organização do Texto

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, organizados de forma a estabelecer uma sequência lógica para a formulação e o direcionamento da pesquisa, conforme descrito a seguir:

Capítulo 1: Este capítulo introduz o tema, destacando a importância da pesquisa, suas motivações e a relevância do problema investigado. Apresenta os objetivos do estudo, suas contribuições para o avanço científico, descreve as metodologias adotadas e justifica as escolhas para alcançar os objetivos propostos.

Capítulo 2: Este capítulo aborda as principais referências teóricas sobre cabos isolados, incluindo sua estrutura, tecnologias e aplicações. São apresentadas suas características construtivas, os materiais e isolamentos utilizados. Por fim, são resumidas as técnicas de detecção e diagnóstico, com destaque para as metodologias aplicadas à manutenção de redes de cabos isolados.

Capítulo 3: Este capítulo apresenta uma revisão das principais técnicas de localização de falhas em cabos isolados, destacando os métodos empregados e suas respectivas características. Além disso, discute-se a abordagem metodológica desenvolvida neste tra-

balho, com ênfase no uso da blindagem metálica como elemento de monitoramento e diagnóstico para detecção e cálculo da posição de falhas incipientes.

Capítulo 4: Este capítulo discorre sobre o desenvolvimento da metodologia de cálculo para estimar a posição de falhas em cabos isolados, utilizando os parâmetros e sinais na blindagem metálica. Apresenta as simulações realizadas e seus resultados.

Capítulo 5: Este capítulo registra os resultados experimentais obtidos nos ensaios de falhas incipientes realizados na amostra de cabo em laboratório, assim como análises e discussões.

Capítulo 6: Este capítulo apresenta as conclusões da pesquisa, destacando suas contribuições e o cumprimento dos objetivos geral e específicos. São discutidas as limitações identificadas, que apontam para a necessidade de estudos complementares, e propõe direções para pesquisas futuras.

2 ESTADO DA ARTE DE CABOS ISOLADOS

Este capítulo apresenta a evolução tecnológica dos cabos isolados, desde suas primeiras aplicações até as tecnologias atuais, com foco nos aspectos de fabricação, construção, instalação e manutenção. Tal abordagem proporciona uma compreensão aprofundada dos fenômenos associados e das técnicas de diagnóstico do estado da isolação.

2.1 Histórico dos Cabos isolados

Os cabos isolados são condutores de eletricidade revestidos com materiais isolantes que evitam o contato direto do condutor com o ambiente externo, prevenindo assim a ocorrência de curtos-circuitos, choques elétricos e outras falhas (METWALLY, 2012).

Os primeiros avanços na difusão dos sistemas de distribuição de energia elétrica com cabos isolados em escala mundial tiveram início com as instalações dos primeiros sistemas telegráficos (ORTON, 2013; THUE, 2017). O campo de estudo e a aplicação de cabos isolados começaram a se expandir a partir do início do século XIX (1812), quando o Barão Schilling detonou uma mina sob o rio Neva, em São Petersburgo, Rússia, utilizando um pulso elétrico enviado por um cabo isolado com tiras de borracha indiana gutta-percha (Electric Power Research Institute (EPRI), 2006). Composta de fibra de látex extraída de árvores, a gutta-percha foi a forma predominante de isolamento de cabos entre os anos de 1840 e 1860. Quando protegida da oxidação, a gutta-percha revelou-se um material satisfatório para o isolamento de cabos, sendo empregada em instalações subterrâneas e submarinas. Uma foto ilustrativa de um cabo isolado com gutta-percha utilizando nessa época pode ser vista na Figura 2.1.

Com o avanço e a implantação dos sistemas de iluminação pública, a gutta-percha revelou-se inadequada por amolecer em altas temperaturas. Em resposta a esse problema, Thomas Edison desenvolveu barras rígidas isoladas com juta, um tecido de fibras vegetais (THUE, 2017).

Em 1890, Sebastian Ferranti promoveu um avanço significativo ao introduzir cabos com isolamento de papel, constituído por tiras largas saturadas com óleo à base de resina (SILVA; BAK, 2013). Logo depois, em 1917, Emanuelli trouxe inovações com a construção de múltiplos condutores e impregnação com óleo, aumentando a rigidez dielétrica dos cabos (THUE, 2017). O isolamento de papel impregnado em óleo tornou-se o padrão para cabos de transmissão e distribuição de energia, oferecendo alta rigidez dielétrica, baixo fator de dissipação e durabilidade (SILVA; BAK, 2013). Essa inovação permitiu, pela primeira vez, a utilização de cabos isolados com tensões superiores a 100.000 volts (BLACK, 1983).



Figura 2.1 – Cabo elétrico do final do século XIX que utilizava fibra de látex gutta-percha como material de isolamento.

Na década de 1940, a descoberta do polietileno e, posteriormente, o desenvolvimento do polietileno reticulado (XLPE) representaram um avanço na tecnologia de cabos isolados, permitindo que suportassem temperaturas de operação em torno de 90°C (SILVA; BAK, 2013). Contudo, durante meados da década de 1970, começaram a ser documentados relatos de falhas em cabos com sistemas dielétricos extrudados, introduzindo o termo *treeing* ou arborescência para descrever esses fenômenos (THUE, 2017). Caracterizado pela formação de ramificações no material isolante, esse fenômeno pode apresentar regiões semicondutoras ou não semicondutoras, cuja evolução pode levar a falhas como curtos-circuitos (WU; SO, 2019).

A percepção da magnitude e importância do problema nos cabos XLPE levou a uma série de mudanças e melhorias nos processos de fabricação e tecnologia de materiais (METWALLY, 2012). Nas décadas seguintes, o isolamento dos cabos passou a ser construído com novos materiais como o polietileno reticulado com retardante a efeitos de arborescências (TR-XLPE) e a borracha de etileno-propileno (EPR) (METWALLY, 2012). As imagens de cabos isolados que utilizam esses dois tipos de materiais são evidenciadas na Figura 2.2.

Nas últimas décadas, o avanço na tecnologia de cabos HV e EHV, com a introdução do polietileno reticulado (XLPE) como isolante, resultou em cabos com menores constantes dielétricas e maiores temperaturas de operação em comparação aos cabos com papel impregnado em óleo. Apesar das vantagens térmicas dos cabos com óleo pressurizado, a maior facilidade de fabricação dos cabos XLPE impulsionou sua produção e aplicação em sistemas HVAC (ARGAUT, 2021).

Em cabos submarinos, o sistema de isolamento pode ser do tipo XLPE ou SCFF (*Self-*

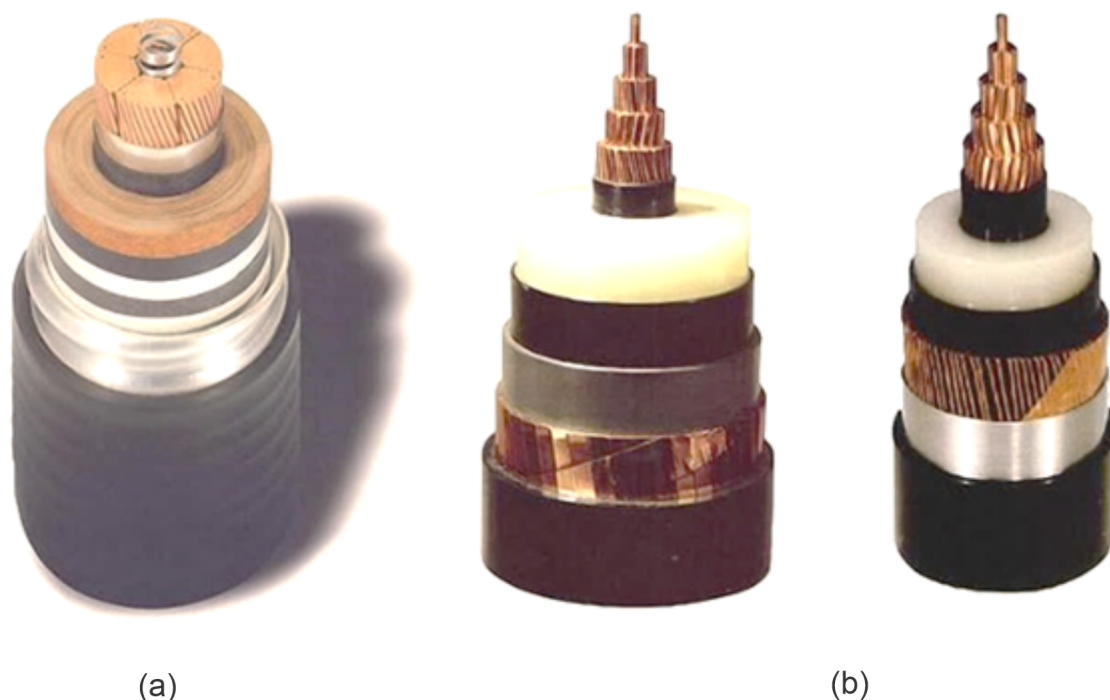


Figura 2.2 – Imagens de cabos isolados com dois tipos de materiais dielétricos, sendo: a) EPR e b) XLPE.

Contained Fluid-Filled), sendo o XLPE o mais utilizado em sistemas HVAC. A isolação é protegida por uma camada metálica que também atua como aterramento, seguida por uma camada de polietileno para proteção mecânica. Entre os condutores, são inseridos elementos de fibra óptica e materiais de enchimento, e todo o conjunto é protegido por uma armadura de fios de aço com revestimento externo de polipropileno.

Para aplicações subterrâneas, diferentes tipos de cabos estão disponíveis, incluindo LPOF (*Low-Pressure Oil-Filled*), HPGF (*High-Pressure Gas-Filled*), HPFF (*High-Pressure Fluid-Filled*), EPR (*Ethylene Propylene Rubber*), PE (*Polyethylene*), XLPE, GIL-SF₆ (*SF₆ Gas-Insulated Lines*) e cabos supercondutores.

Atualmente, a ciência da nanotecnologia surgiu como um reforço das propriedades dielétricas dos polímeros industriais tradicionais, melhorando as características de isolamento e as propriedades físicas dos condutores (THABET; SALEM; MOHAMED, 2018). Os avanços tecnológicos, combinados ao aprimoramento dos processos de controle e fabricação de materiais e componentes, tendem a elevar a eficiência e a viabilidade econômica da implementação de cabos isolados (ARGAUT, 2021).

2.2 Aspectos Construtivos Cabos Isolados

Cabos isolados são projetados para transmitir energia mantendo o isolamento elétrico entre os condutores e o meio externo (Electric Power Research Institute (EPRI),

2006; ARGAUT, 2021). De diferentes formatos e tipos, os cabos podem ter aplicações e características específicas (FILHO, 2019). Apesar dessas variações, eles compartilham características construtivas comuns, como: condutor, camada semicondutiva, isolamento, blindagem metálica e revestimento externo (ou capa) (Electric Power Research Institute (EPRI), 2006). As principais partes que compõem um cabo elétrico isolado são mostradas na Figura 2.3.

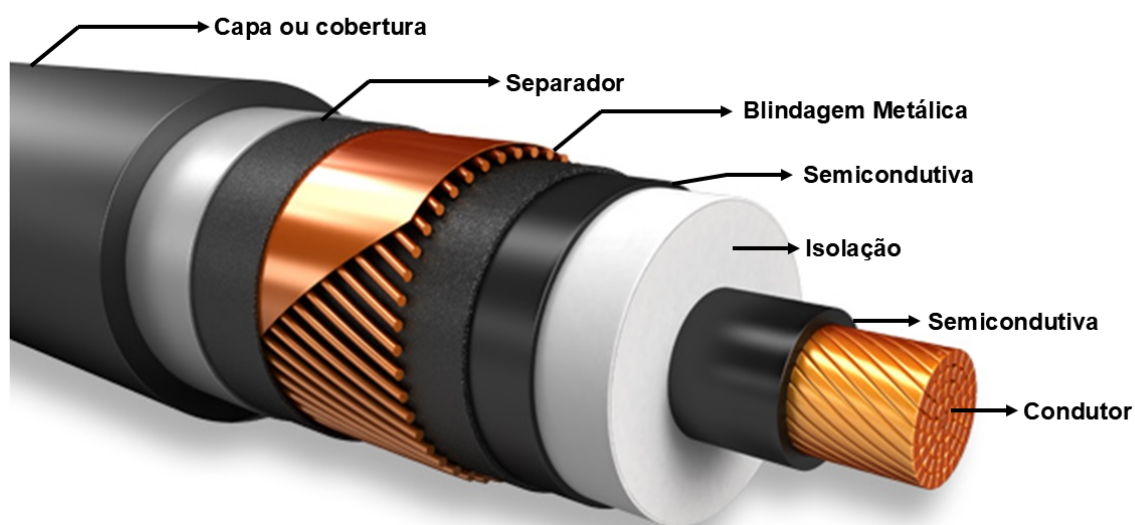


Figura 2.3 – Principais partes estruturais integrantes de um cabo elétrico isolado.

A estrutura de um cabo isolado é composta por diversas camadas que garantem seu desempenho elétrico, segurança e durabilidade. No núcleo, o condutor principal, feito de cobre ou alumínio, tem alta condutividade elétrica. Envolvendo esse condutor, a camada de isolamento, feita de materiais como EPR (borracha de etileno-propileno) ou XLPE (polietileno reticulado), atua como uma barreira dielétrica que impede fugas de corrente e protege contra curtos-circuitos.

Sobre a parte interna e externa da camada de isolamento, é aplicada uma camada semicondutiva que tem a função de uniformizar o campo elétrico do cabo, reduzindo concentrações de linhas que poderiam comprometer a integridade do material isolante. Na parte externa, a blindagem metálica fornece uma via de retorno para correntes de falha à terra. Por fim, a capa externa envolve toda a composição, conferindo resistência a esforços mecânicos e proteção contra umidade, abrasão e agentes químicos.

2.2.1 Condutor Principal

Os condutores elétricos são os principais componentes dos cabos isolados, sendo o elemento físico de transmissão da energia elétrica ou sinais elétricos entre dois meios distintos (ARGAUT, 2021). Pode ser fabricado com cobre ou alumínio e possui formatos e dimensões que se adequam a necessidade de aplicação (SILVA; BAK, 2013; FILHO, 2019). São diversas as formas com que os condutores são fabricados, e cada uma delas própria para um determinado tipo de aplicação. Algumas formações típicas de condutores são apresentadas na Figura 2.4.

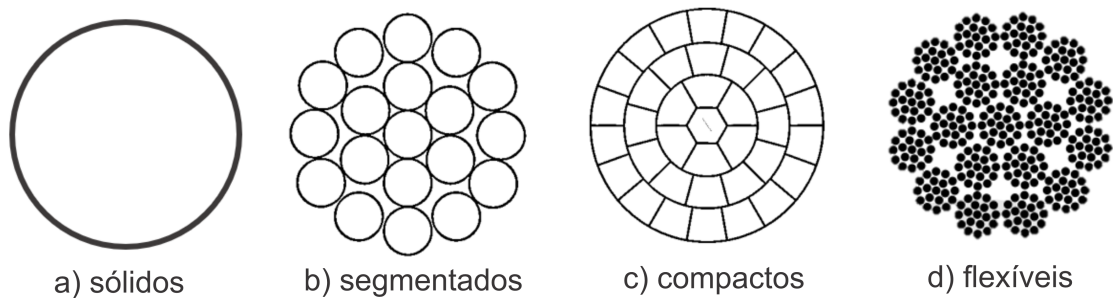


Figura 2.4 – Formatos típicos de condutores principais de cabos isolados.

Os tipos de formatos apresentados mostram algumas seções transversais de condutores elétricos: sólidos, segmentados, compactos e flexíveis (SILVA; BAK, 2013; METWALLY, 2012). Os cabos isolados podem ser construídos de diferentes formas, dependendo da sua aplicação e exigências operacionais, unipolares ou multipolares conforme mostrado na Figura 2.5.

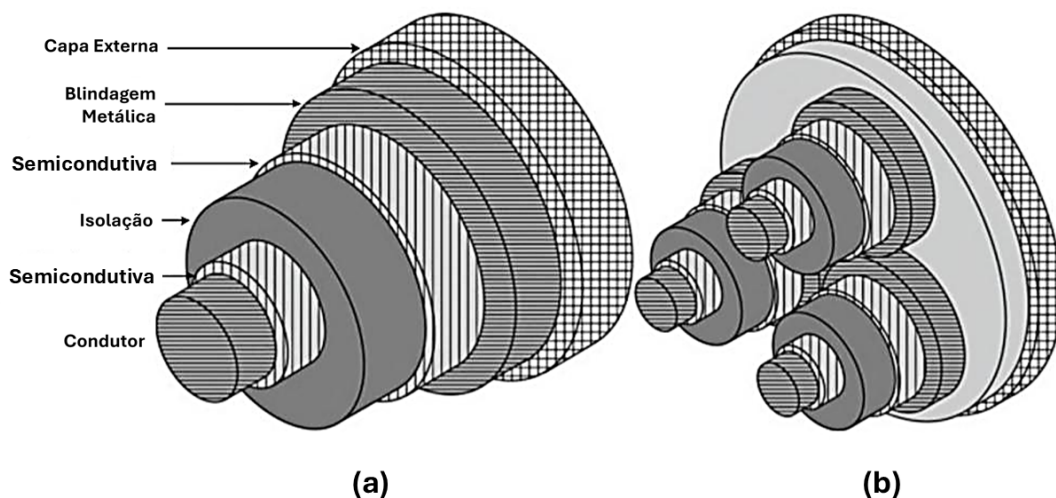


Figura 2.5 – Modos construtivos dos cabos isolados: (a) cabo unipolar e (b) cabo tripolar (SILVA; BAK, 2013).

A escolha do formato do condutor influencia a eficiência elétrica e térmica dos cabos, impactando sua resistência ôhmica, dissipação de calor e questões pertinentes a montagem da instalação (ARGAUT, 2021; Electric Power Research Institute (EPRI), 2006).

Cabos subterrâneos e submarinos podem ser fabricados com um ou três condutores, sendo os cabos singelos mais usados em longas distâncias em terra e os de três condutores em aplicações submarinas. Ambos podem incluir fibras ópticas para monitorar a temperatura ou transmitir outros sinais. Cabos subterrâneos são compostos por trechos de até 2 km, unidos com emendas pré-moldadas, enquanto os cabos submarinos são emendados em fábrica em segmentos de até 20 km, podendo alcançar comprimentos superiores a 100 km (ARGAUT, 2021).

A decisão entre utilizar cabos unipolares ou multipolares está condicionada a diversos fatores, como a tensão do sistema, a capacidade de condução de corrente, as condições ambientais e o grau de flexibilidade exigido para a instalação. Os cabos unipolares são mais indicados em aplicações de alta tensão e redes subterrâneas, devido à sua maior flexibilidade e facilidade de manuseio. Por outro lado, os cabos multipolares oferecem maior proteção mecânica e simplificam o processo de instalação em determinadas configurações. A Tabela 2.1 apresenta um comparativo entre as vantagens e desvantagens desses dois tipos de cabos.

Tabela 2.1 – Características comparativas entre cabos tripolares e monopolares.

| Características | Tripolar (<i>Three-core</i>) | Monopolar (<i>Single-core</i>) |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Vantagens | Campo magnético balanceado Menores correntes e tensões na blindagem Menor custo de instalação | Menor peso e diâmetro Maior capacidade de corrente Requer menos emendas |
| Desvantagens | Menor condução de corrente Maior peso e diâmetro Todas as fases devem ser reparadas após uma falha | Campo magnético intenso Custos de proteção Escavação individual aumenta os custos |

2.2.2 Camada Semicondutiva

Aplicada ao redor da isolação, a camada semicondutiva atua como uma interface entre os condutores e a superfície externa e interna do isolamento (Electric Power Research Institute (EPRI), 2006). É uma camada condutora de baixa resistência comparada ao isolante, mas de elevada resistência se comparada ao material condutor. É composta por um material polimérico com adição de partículas condutivas, conferindo-lhe uma resistividade específica que a caracteriza como semicondutiva.

A camada semicondutiva interna é aplicada diretamente sobre o condutor principal e tem como função promover a isotropia do campo elétrico, eliminando concentrações de campo que poderiam ocorrer devido às irregularidades na superfície do condutor. Evita o efeito corona e degradação prematura da isolação. A camada semicondutiva externa é aplicada sobre a isolação principal e tem como função manter a continuidade do campo elétrico e facilitar o contato elétrico com a blindagem metálica.

2.2.3 Isolação

A isolação impede a conexão elétrica entre o condutor e as partes externas (SILVA; BAK, 2013). Materiais isolantes elétricos são aplicados sobre os condutores metálicos de cabos isolados, para qualquer nível de tensão. Entre esses, são utilizados materiais poliméricos, com variações em sua composição. A Tabela 2.2 resume algumas características dos principais materiais isolantes de cabos isolados.

Tabela 2.2 – Resumo das principais características dos materiais isolantes de cabos.

| Característica | EPR | XLPE | PVC |
|---------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Composição | Elastômero à base de etileno e propileno | Polietileno com ligações químicas cruzadas | Policloreto de vinila |
| Resistência térmica | Opera até 90°C, com capacidade de sobrecarga até 130°C | Opera até 90°C, com capacidade de sobrecarga até 250°C | Opera até 70°C, com sobrecarga limitada |
| Vantagens | Flexibilidade, resistência à umidade e envelhecimento | Durabilidade, menor custo | Menor custo, resistência a produtos químicos |
| Desvantagens | Maior custo | Menor flexibilidade mecânica | Menor durabilidade |

O desempenho do cabo isolado depende, em grande parte, das características do material isolante utilizado. Portanto, a escolha adequada do material de isolamento para cabos é de considerável importância. Em geral, os materiais isolantes empregados devem apresentar as seguintes propriedades: resistência de isolamento, para evitar correntes de fuga; rigidez dielétrica, a fim de prevenir a ruptura elétrica do cabo; resistência mecânica, para suportar os esforços durante o manuseio e a instalação; característica não higroscópica, ou seja, não deve absorver umidade do ar ou do solo. A escolha depende da finalidade do cabo e do nível de desempenho exigido (ARGAUT, 2021).

2.2.4 Blindagem Metálica

A blindagem metálica é uma camada de fita ou malha de fios metálicos, composta de cobre ou alumínio, aplicada sobre a camada semicondutiva externa ao isolamento do cabo. Sua função é realizar a blindagem eletrostática e fornecer um caminho de retorno para correntes à terra (ARGAUT, 2021). Detalhes teóricos da distribuição de campo eletrostático em cabos blindados podem ser verificados no Apêndice A.

Em condições normais de operação, a blindagem apresenta níveis de tensão e corrente de acordo com a configuração do sistema. A corrente na blindagem metálica, causada pelo acoplamento capacitivo com o condutor principal, não se altera com a variação da carga. A tensão induzida na blindagem varia conforme a corrente de carga, pois o campo magnético gerado pelo condutor principal induz uma tensão na blindagem por meio da indução eletromagnética (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2014a).

2.2.5 Capa Externa

A capa externa, ou revestimento, é a camada de proteção mecânica do cabo, responsável por impedir a entrada de impurezas e resistir a esforços mecânicos, abrasão e agentes ambientais. Pode ser composta por materiais metálicos, plásticos ou poliméricos, conforme a aplicação e o ambiente de instalação. O PVC é em geral utilizado devido à sua flexibilidade e resistência térmica, enquanto o polietileno (PE), nas versões de média e alta densidade, é indicado para aplicações que exigem maior tolerância a falha. Além da proteção, a capa externa serve para identificação do cabo, contendo informações técnicas conforme as normas vigentes (Electric Power Research Institute (EPRI), 2006; ARGAUT, 2021).

2.3 Configurações de Aterramento da Blindagem Metálica

A blindagem metálica dos cabos isolados pode ser aterrada de diferentes formas, conforme requisitos de projeto. Os tipos de aterramento recomendados são (METWALLY; AL-BADI; FARSI, 2013):

- Aterramento em um ponto (*single-bonded*): A blindagem metálica das três fases é conectada à terra em um único ponto. Neste caso, na extremidade oposta (não aterrada), há a presença de uma tensão induzida, cujo valor máximo ocorre no ponto mais distante do aterramento. A utilização de SVL - *Sheath Voltage Limiter* é uma alternativa para controlar sobretensões, no entanto sua utilização é opcional. A norma NBR 14039 (Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2005)

estabelece que, em instalações elétricas de média tensão, a tensão em partes acessíveis aos usuários deve ser limitada a, no máximo, 50 V. Quando esse limite é respeitado, a aplicação de dispositivos de proteção do tipo SVL torna-se dispensável.

- Aterramento em ambas as extremidades (*solid-bonded*): As blindagens são aterradas nos dois extremos permitindo condução de corrente entre os pontos de aterramento caso ocorra diferença de potencial.
- Aterramento em ambas as extremidades com transposição (*cross-bonded*): Nesse método, as blindagens metálicas são interligadas em pontos intermediários do cabo, permitindo a compensação das tensões induzidas e reduzindo as perdas por aquecimento por fluxo de corrente nas blindagens.

As ilustrações da Figura 2.6 mostram esquemas das configurações de aterramento da blindagem metálica possíveis para redes isoladas.

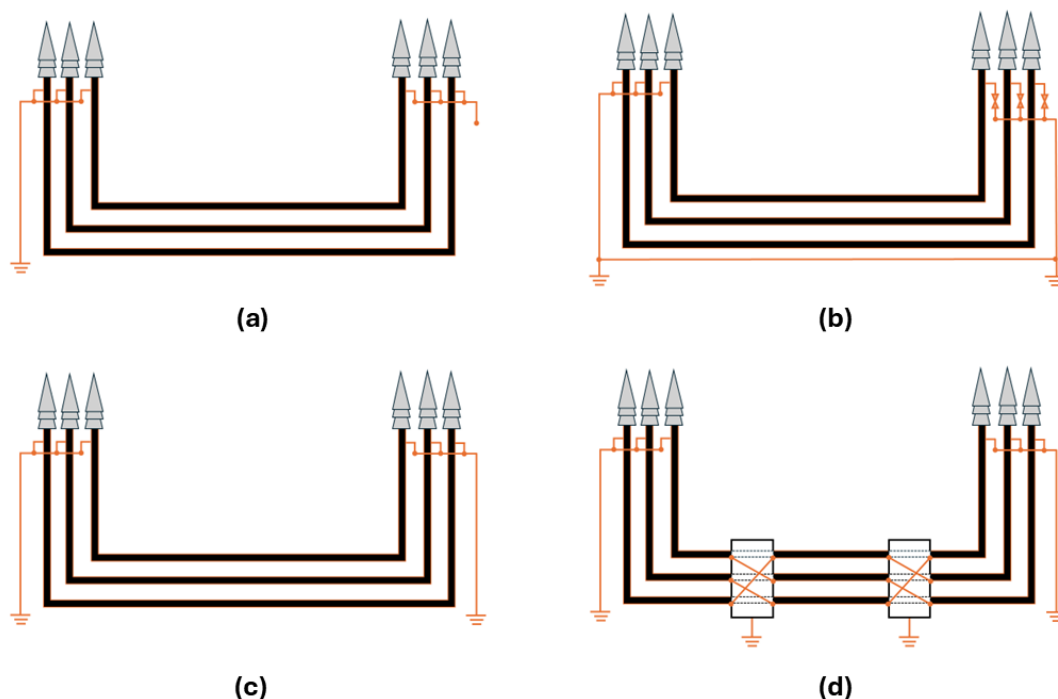


Figura 2.6 – Métodos de aterramento para as blindagens metálicas: (a) *single-bonded* sem SVL; (b) *single-bonded* com SVL e condutor de aterramento auxiliar; (c) *solid-bonded* e (d) *cross-bonded*.

O guia IEEE 575 (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2014a) fornece recomendações para o aterramento de cabos isolados que são determinados na fase de projeto do circuito. Com base em fatores como distância, carga, configuração da rota e instalação do cabo, a filosofia de aterramento que proporcionará o melhor desempenho do sistema é selecionada (GUO; ZHU; DONG, 2015)). A Tabela 2.3 apresenta um resumo das principais características associadas a cada método de aterramento.

Tabela 2.3 – Análise comparativa entre os métodos de aterramento para blindagem metálica.

| Aterramento em um ponto (<i>single-bonded</i>) | Aterramento em ambas as extremidades (<i>solid-bonded</i>) | Aterramento com transposição (<i>cross-bonded</i>) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A blindagem é conectada e aterrada em uma extremidade do cabo, deixando a outra extremidade isolada | A blindagem é conectada e aterrada em ambas as extremidades do cabo | A blindagem é seccionada em três partes com pontos de transposição, sendo aterrada em ambas as extremidades |
| Resulta em tensão induzida na extremidade isolada | Resulta em corrente fluindo pela blindagem (entre os pontos aterrados) | Em configuração trifólio, as tensões podem ser neutralizadas. Tensões podem surgir nas caixas de transposição |
| Requer o uso de SVLs ou para-raios com condutor de retorno para o aterramento (se aplicável) | Não necessita de SVL | A blindagem em cada seção de 1/3 é aterrada, enquanto as outras duas são transpostas |
| Recomendado para cabos curtos ou em configuração plana | Recomendado para linhas curtas e subestações | Recomendado para linhas longas ou cabos com emendas |

Para aterramento em uma única extremidade (*single-bonded*), referências destacam a necessidade de dispositivos de proteção como para-raios, limitadores de surto ou SVLs (*Sheath Voltage Limiters*) para evitar sobretensões transitórias na extremidade isolada (METWALLY; AL-BADI; FARSI, 2013). No entanto, essa prática pode não ser adotada, sendo sua aplicação condicionada às normas técnicas e regulamentações específicas de cada país (ARGAUT, 2021).

2.4 Falhas em Cabos Isolados

A deterioração da isolação dos cabos ocorre em estágios (LU et al., 2022): inicia-se com o surgimento de descargas parciais, evolui para falhas incipientes e, posteriormente, para falha permanente. A ocorrência progressiva das falhas incipientes é um indicativo da degradação do isolamento, podendo evoluir para falhas irreversíveis caso não sejam identificadas e tratadas previamente. O processo de deterioração da isolação de um cabo elétrico é apresentado no esquema gráfico da Figura 2.7.

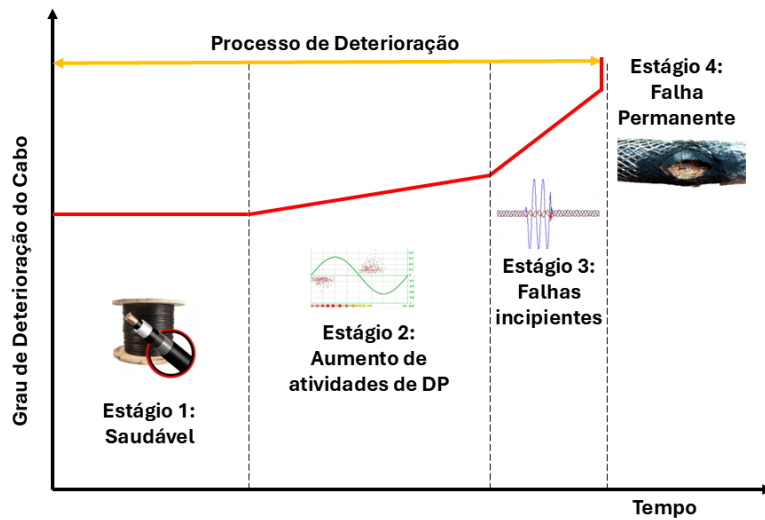


Figura 2.7 – Etapas do processo de deterioração do isolamento do cabo e seus efeitos no sistema elétrico (adaptado de (LU et al., 2022)).

Defeitos típicos em cabos isolados decorrem de imperfeições causadas por impactos durante a instalação ou por processos de degradação natural dos materiais. Entre esses defeitos, destacam-se deformidades como vazios, oxidação, superaquecimento, corrosão do neutro e delaminação. Esses fenômenos estão associados à deterioração do isolamento quando submetido a estresses térmicos, químicos e mecânicos. Exemplificação de tipos de defeitos estão ilustrados na Figura 2.8.

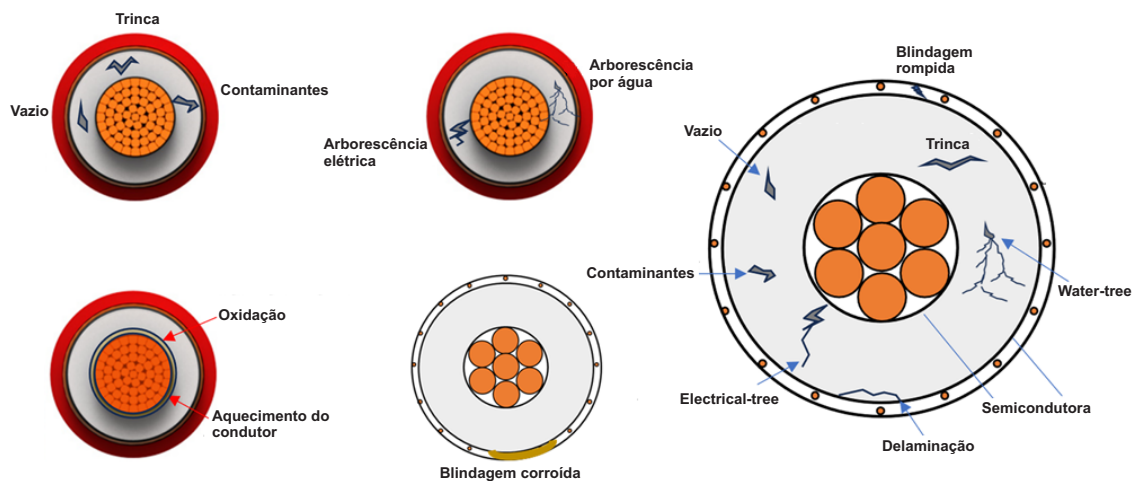


Figura 2.8 – Exemplos de problemas que comprometem o isolamento dos cabos (Adaptado de (BINDI et al., 2023)).

De forma similar, a Figura 2.9 ilustra imagens de degradação observados no isolamento desses cabos.

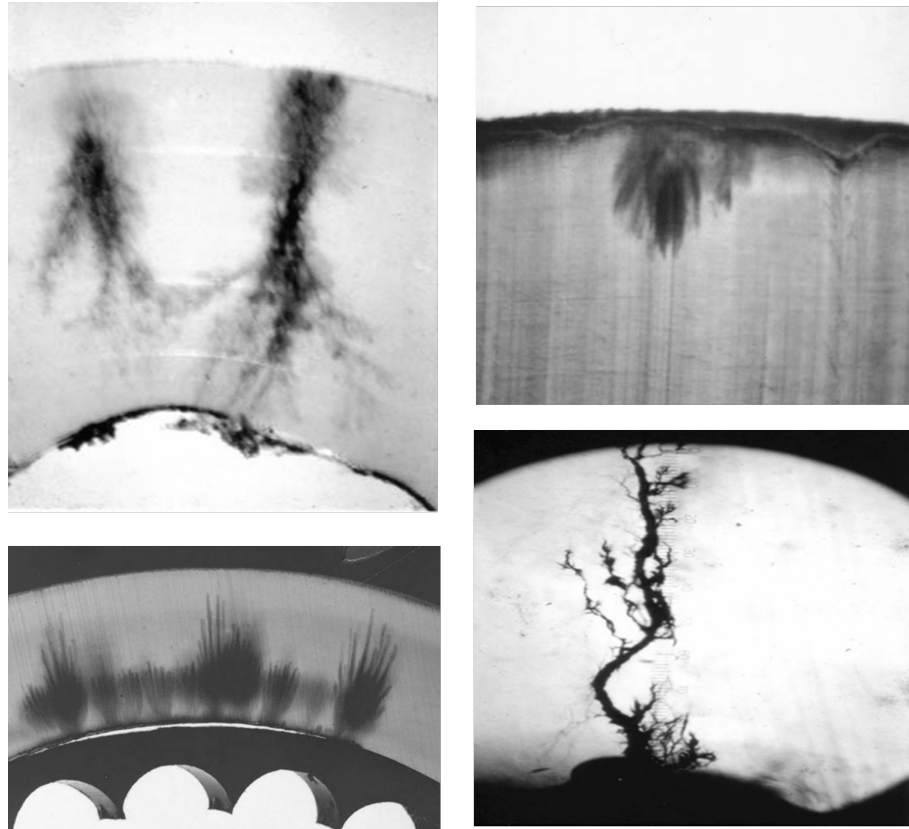


Figura 2.9 – Imagens registradas de defeitos na isolação causados por arborescência elétrica e arborescência por água.

A deterioração progressiva da isolação em cabos elétricos isolados, causada pela atuação contínua de descargas parciais, pode resultar na ocorrência de falhas incipientes (KASZTENNY; VOLOH; JONES, 2009; MAHMOUD et al., 2021). Essas falhas se caracterizam por sua curta duração, inferior a um ciclo, variando entre 1/4 e 4 ciclos.

As falhas incipientes tendem a se iniciar nas proximidades do valor de pico da forma de onda de tensão, tanto nos semiciclos positivos quanto nos negativos, e se autoextinguem nas proximidades do cruzamento por zero (SEYEDI; PIYASINGHE; SMITH, 2024). Um exemplo desse tipo de falha pode ser verificado na Figura 2.10.

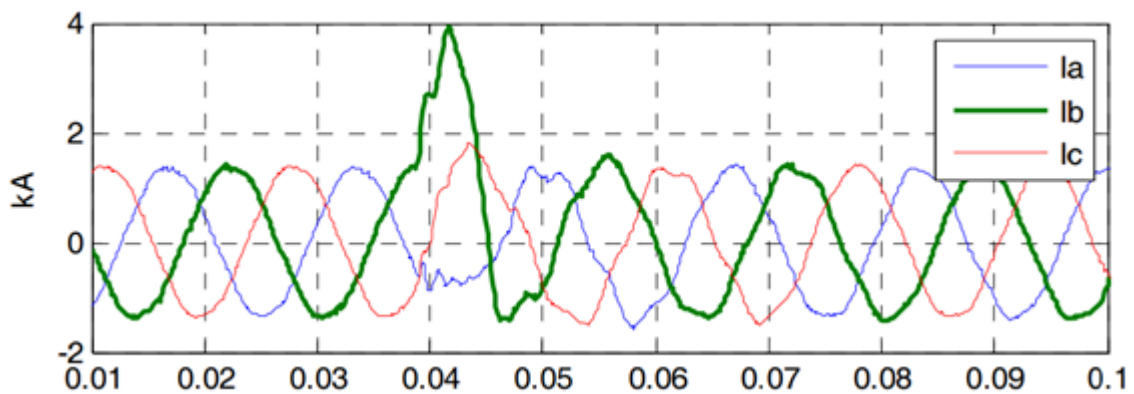


Figura 2.10 – Registro de forma de onda de corrente de uma falha incipiente autoextinguível com duração de aproximadamente 1/2 ciclo.

As falhas incipientes são consideradas precursoras das falhas permanentes e, à medida que se repetem, promovem a degradação do isolamento, podendo evoluir para um evento de falha permanente (SAMET et al., 2021; LU et al., 2021; LU et al., 2022; ZHANG et al., 2024).

2.4.1 Metodologias de Avaliação do Estado da Isolação

A curva Potencial de Falha ou curva PF (*Potential Failure*) apresentada na Figura 2.11, ilustra a degradação da condição de um equipamento no tempo e as diferentes abordagens de manutenção associadas a cada estágio da falha. O equipamento em suas condições nominais de operação, pode apresentar falhas não detectáveis caracterizando a fase prescritiva. Técnicas de manutenção e diagnóstico podem descrever a condição do equipamento nesse estágio a um custo menor (MIRSHEKALI; SANTOS; SHAKER, 2023).

À medida que a degradação avança, a falha passa por estágios. No estágio preditivo, ela pode ser detectada por técnicas de monitoramento. Na fase preventiva, o problema já é perceptível, mas ainda permite intervenção com baixo custo. Caso nenhuma ação seja tomada, chega-se ao ponto de manutenção corretiva, no qual perdas são inevitáveis. Quanto mais cedo a falha for identificada, menores serão os custos e os impactos no sistema.

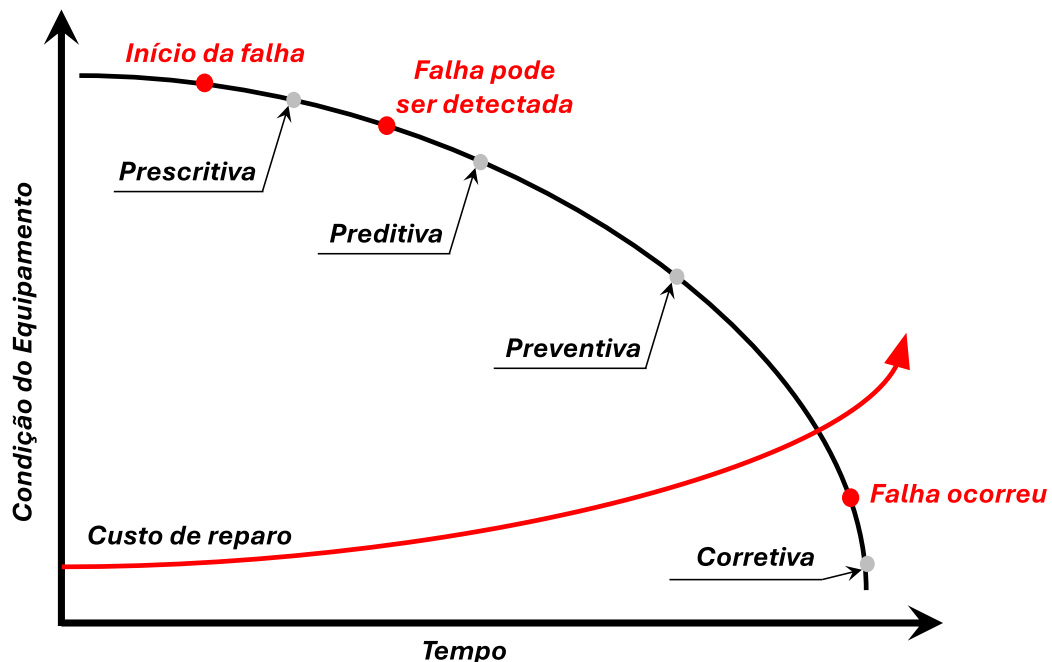


Figura 2.11 – Curva de potencial de falha ou curva PF - *Potential Failure* - (MIRSHEKALI; SANTOS; SHAKER, 2023).

Nesse contexto, a detecção precoce da degradação do isolamento reforça a importância da escolha adequada dos métodos de avaliação no momento correto. A integridade

dos cabos pode ser verificada tanto por métodos *offline*, que requerem a desenergização do sistema, quanto por técnicas *online*, capazes de identificar anomalias a partir da análise de sinais elétricos durante a operação da rede (XU et al., 2023).

Entre as técnicas de diagnóstico consideradas *online*, destacam-se a medição de temperatura e a detecção de descargas parciais. Essas abordagens possibilitam o acompanhamento contínuo das condições operacionais, contribuindo para a execução da manutenção preditiva. Um esquema de como é realizado o ensaio para detecção de descargas parciais é destacado na Figura 2.12.

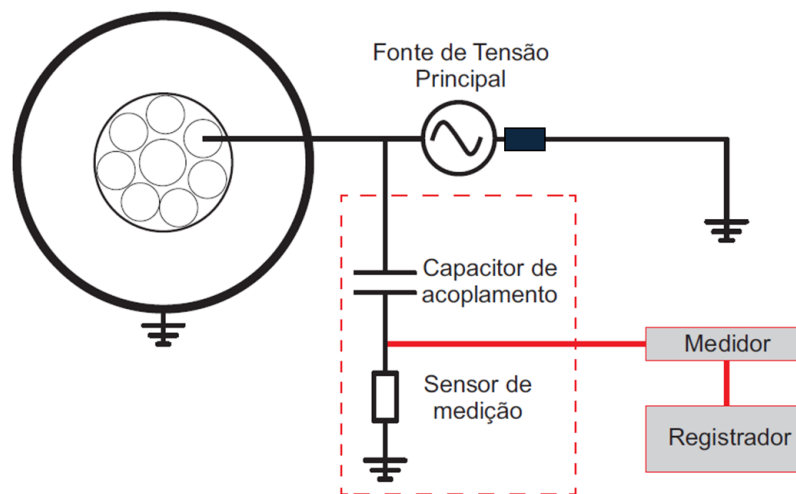


Figura 2.12 – Esquema de montagem de equipamento para monitoramento *online* de descargas parciais (MIRSHEKALI; SANTOS; SHAKER, 2023).

O sistema de medição de descargas parciais inclui a fonte de tensão principal, um capacitor de acoplamento, responsável por permitir a passagem dos sinais de descargas parciais sem interferir na tensão aplicada, e um sensor de medição, que capta os sinais de alta frequência gerados pelas descargas parciais. Os sinais captados são enviados para um medidor, em que são processados e analisados para detectar a presença e a intensidade das descargas parciais. Os dados são armazenados por um registrador, permitindo o armazenamento e a análise posterior dos eventos.

Embora essa técnica ofereça a vantagem de avaliação sem interrupção do sistema, sua aplicação exige uma calibração que minimize interferências externas. Além disso, trata-se de um dispositivo que gera resultados que demandam a interpretação de especialistas. Esse teste pode ser realizado *offline*, com o auxílio de uma fonte de tensão externa.

A termografia emprega câmeras infravermelhas para detectar pontos quentes nos cabos e conexões. Essa abordagem permite a identificação de potenciais pontos de defeito, além de poder ser aplicada *online* (SONG et al., 2022). No entanto, a termografia apresenta limitações, pois não é sensível a problemas internos da isolação, restringindo-se à análise das camadas externas acessíveis e em conexões.

Os testes de diagnóstico *offline* como o ensaio em baixa frequência (VLF) e a tangente de delta possuem os conceitos apresentados na Figura 2.13. O circuito equivalente da isolação composto por uma resistência R e uma capacitância C modelam as características do material isolante. A corrente total \dot{I}_g que atravessa a isolação é composta pela soma da corrente de condução \dot{I}_R , associada à resistência do isolamento, e da corrente capacitiva \dot{I}_C , que representa a resposta dielétrica do material ao campo elétrico aplicado.

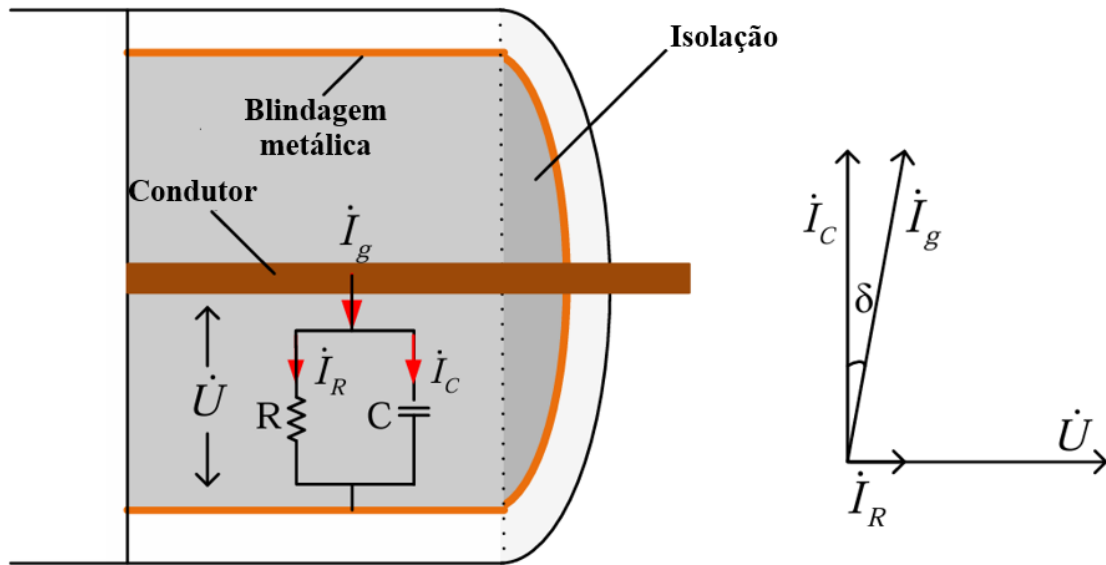


Figura 2.13 – Conceitos de medição do fator de dissipação da isolação ou tangente δ (LI; YONG; XU, 2018).

O diagrama fasorial ilustra a relação entre as componentes das correntes. A corrente capacitiva \dot{I}_C está defasada de 90° em relação à tensão aplicada \dot{U} , enquanto a corrente resistiva \dot{I}_R está em fase com a tensão. O ângulo δ representa a tangente de perda do material isolante, um parâmetro importante para avaliar a qualidade da isolação. Esse modelo é utilizado em testes de tangente δ , que avaliam a degradação da isolação. O aumento da corrente resistiva indica a presença de falhas no isolamento, como envelhecimento do material ou contaminação por umidade. A análise dessas grandezas permite prever falhas incipientes e programar manutenções preventivas.

Os testes de suportabilidade podem ser realizados utilizando fontes de tensão alternada ou contínua. O ensaio conhecido como VLF (*Very Low Frequency*) emprega uma frequência que varia entre 0,01 Hz e 1 Hz, permitindo a avaliação da integridade do isolamento do cabo sem a necessidade de utilizar fontes de alta potência (LI; ZHOU; ZHOU, 2019).

O teste em corrente contínua, denominado *Hipot DC*, segue o mesmo princípio, aplicando uma tensão elevada para verificar a capacidade de isolamento do cabo. No entanto, caso o cabo apresente degradação no isolamento, esse tipo de teste pode ser destrutivo e não é recomendado pela NBR-7287 (GONÇALVES; PAULA; ALZAMORA,

2020; Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2003).

Dentre as técnicas disponíveis para a avaliação das condições operacionais de cabos isolados, as principais estão resumidas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Características das principais técnicas de diagnóstico em cabos isolados.

| Técnica | Online | Offline | Vantagens | Desvantagens |
|--------------------------------------------|---------------|----------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Teste de Descargas Parciais (PD) | x | x | Pode detectar falhas sem desligar o sistema. | Requer equipamento e conhecimento especializados. Não é imune a interferências externas. |
| Termografia | x | x | Não intrusivo e pode ser realizado durante a operação. | Limitações na detecção de falhas internas no isolamento. |
| Teste de Tensão Aplicada (suportabilidade) | | x | Alta sensibilidade a falhas de isolamento. | Requer desligamento do cabo. Pode ser destrutivo para localizar o ponto de falha visualmente. |
| Teste de Resistência de Isolamento | | x | Simple e eficaz para detecção de degradação de isolamento. | Requer desligamento do cabo. Não recomendado para cabos envelhecidos. |
| Tangente de Delta (Fator de dissipação) | | x | Fornecer avaliação global do isolamento. | Requer equipamento específico e conhecimento especializado. |

As metodologias apresentadas oferecem a possibilidade de avaliação da condição da isolação, possibilitando a identificação de possíveis falhas. No entanto, tais técnicas aplicadas de forma isolada não permitem a localização do ponto de defeito, exigindo o uso de abordagens complementares de localização, as quais serão discutidas nos próximos tópicos.

2.5 Considerações Finais

Este capítulo abordou a evolução tecnológica dos cabos elétricos isolados, destacando suas principais características construtivas. Foram discutidos os diferentes tipos de falhas que podem ocorrer nesses sistemas, bem como as técnicas de diagnóstico voltadas à avaliação do estado da isolação. Além disso, foram descritos os mecanismos de degradação responsáveis por comprometer o desempenho do isolamento elétrico, com ênfase nas falhas

incipientes. Por fim, apresentou-se uma revisão das principais metodologias empregadas na identificação de falhas, com foco nas abordagens que se alinham ao escopo desta pesquisa.

3 LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM CABOS ISOLADOS

Este capítulo apresenta uma revisão das principais técnicas de localização de falhas em cabos isolados, abordando os conceitos fundamentais, a descrição dos métodos e suas principais características. Além disso, aborda-se a metodologia desenvolvida neste trabalho, fundamentada no estado da arte em localização de falhas *online* com o uso dos parâmetros da blindagem metálica, destacando-se as lacunas de pesquisa identificadas e as contribuições desta tese.

3.1 Técnicas de Pré-Localização e Localização

A localização de falhas em cabos isolados e blindados consiste na consolidação de diversos processos, conforme apresentados na Figura 3.1. Após a etapa inicial de identificação do problema, é necessária a desconexão dos condutores em ambas as extremidades e a realização do aterramento de segurança (etapa 1). Em seguida, realiza-se a análise da falha e teste de isolamento para confirmar o defeito (etapa 2). Com base nos resultados, procede-se à pré-localização da falha, que fornece uma estimativa da distância do ponto defeituoso (etapa 3). Em seguida, realiza-se o rastreamento do cabo no solo, associando a distância estimada à posição física real (etapa 4). A etapa seguinte consiste na localização precisa do ponto de falha, utilizando técnicas mais específicas (etapa 5). Após localizar o defeito, é necessário identificar corretamente o cabo no circuito, garantindo que o reparo seja feito no cabo correto (etapa 6). Na etapa seguinte, procede-se ao reparo do defeito, mediante substituição ou correção da seção danificada (etapa 7). Por fim, realiza-se o teste e diagnóstico da isolamento para validar o serviço executado (etapa 8) antes da energização do sistema.

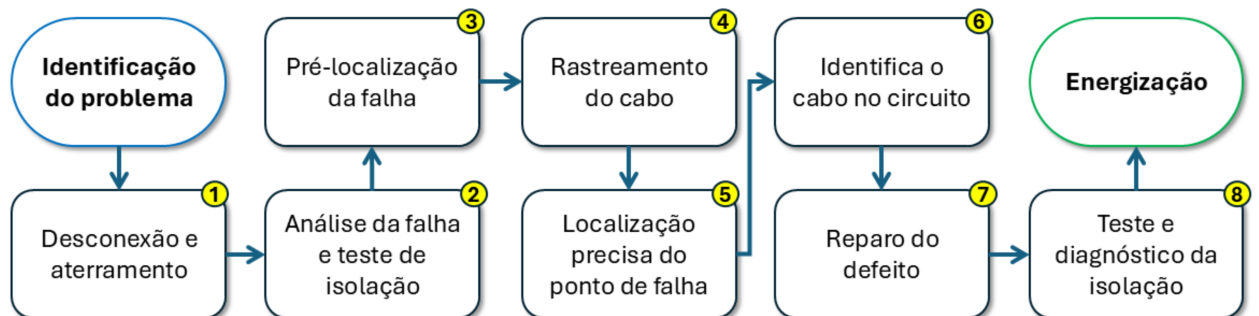


Figura 3.1 – Etapas necessárias entre a detecção de uma falha em um cabo isolado até o momento da reenergização.

A pré-localização refere-se às técnicas utilizadas para estimar a posição da falha com base em testes a partir de um ponto de referência do circuito. Por sua vez, a localização corresponde à inspeção visual e física do cabo, realizada no campo, com o objetivo de identificar o ponto exato da ocorrência do defeito (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2019).

As estratégias de pré-localização e localização de falhas em cabos isolados abrangem diferentes abordagens, cuja aplicação depende do tipo de falha e das condições operacionais do sistema, em conformidade com o *IEEE Guide for Fault-Locating Techniques on Shielded Power Cable Systems*. As principais técnicas de pré-localização e localização são sintetizadas na Figura 3.2, com indicação da faixa de impedância de falha mais adequada a cada uma delas.

As técnicas de pré-localização visam estimar a distância até o ponto de falha por meio da análise de parâmetros elétricos, tais quais o tempo de propagação, a resistência ou a queda de tensão ao longo do cabo. Já as técnicas de localização têm o propósito de confirmar e determinar com precisão o ponto físico da falha, utilizando inspeções visuais complementadas por métodos acústicos ou pela medição do gradiente de potencial no solo (*Earth Gradient*).

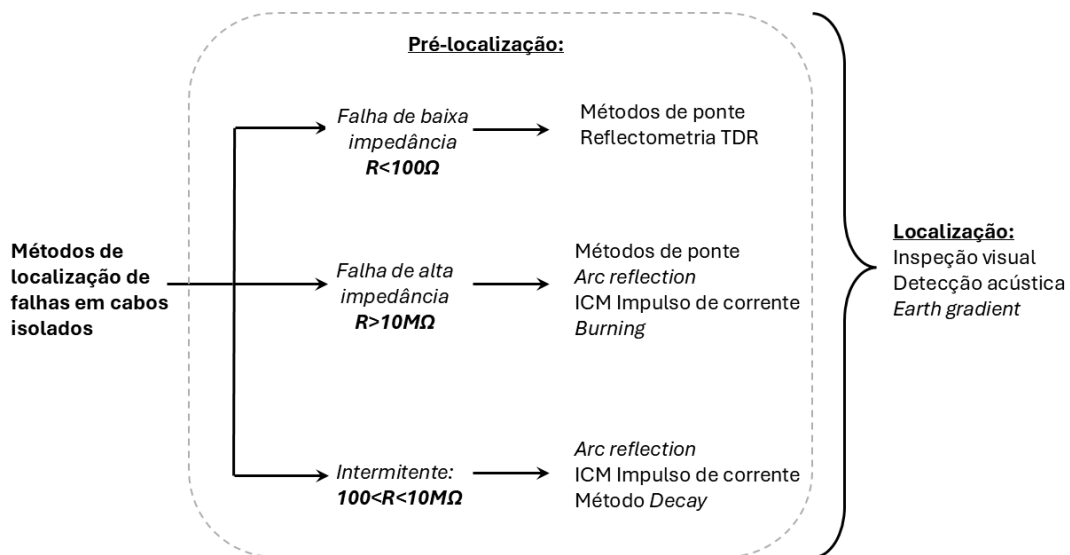


Figura 3.2 – Resumo das principais técnicas de pré-localização e localização de falhas em cabos isolados e indicação dos valores de impedância da falha recomendados.

Dentre os métodos recomendados para falhas de baixa impedância, está a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR). Baseada em conceitos de propagação de ondas eletromagnéticas, a técnica TDR consiste no envio de pulsos de alta frequência. Para cabos de energia isolados, a TDR geralmente opera em frequências de 10 até 100 MHz, pois as frequências mais altas são rapidamente atenuadas pelo material isolante e a resolução

necessária é compatível com o comprimento e o tipo de cabo. Por meio da análise do tempo de retorno dos sinais refletidos é possível identificar discontinuidades do cabo, detectando defeitos como corrosão, presença de umidade, rupturas mecânicas e falhas em emendas ou terminações. As respostas variam de acordo com o tipo de falha presente e alguns exemplos são apresentados na Figura 3.3.

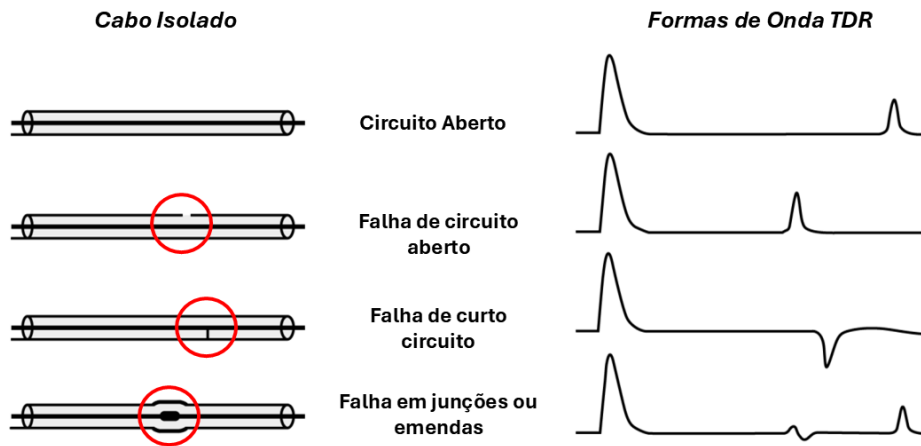


Figura 3.3 – Exemplos de gráficos de respostas do ensaio de refletometria de acordo com o tipo de falha.

Os resistores variáveis R_1 e R_2 correspondem, respectivamente, aos ramos da ponte conectados ao cabo íntegro e ao cabo defeituoso, ambos expressos em ohms (Ω). A resistência R_3 representa a soma da resistência do condutor do cabo sem falha com a resistência do trecho do cabo com falha a partir da extremidade oposta até o ponto de falha, sendo composta por três segmentos: $R_3 = R_{3a} + R_{3b} + R_{3c}$. Já R_4 refere-se à resistência do condutor do cabo defeituoso, medida entre a extremidade mais próxima e o ponto de falha.

A ponte está balanceada quando a seguinte relação é satisfeita:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (3.1)$$

O valor da resistência desconhecida R_4 é proporcional à distância até o ponto de falha, conforme:

$$R_4 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}. \quad (3.2)$$

Para as medições com a ponte de Murray, a distância até o ponto de falha é obtida por:

$$L_x = \frac{2L \cdot R_1}{R_1 + R_2}. \quad (3.3)$$

Onde:

L_x : distância da extremidade próxima até o ponto de falha (m);

L : o comprimento total da seção do cabo entre as extremidades (m);

$2L$: representa a distância do laço formado pelos dois condutores.

Em situações envolvendo falhas de alta impedância, destaca-se a aplicação da descarga capacitiva (*thumper*). Essa técnica consiste na aplicação de pulsos de alta tensão no cabo, induzindo uma descarga elétrica no ponto de falha, que pode ser identificada por emissão sonora ou luminosa. O circuito equivalente da técnica *thumper* complementada pelo método de detecção acústica é apresentado na Figura 3.4.

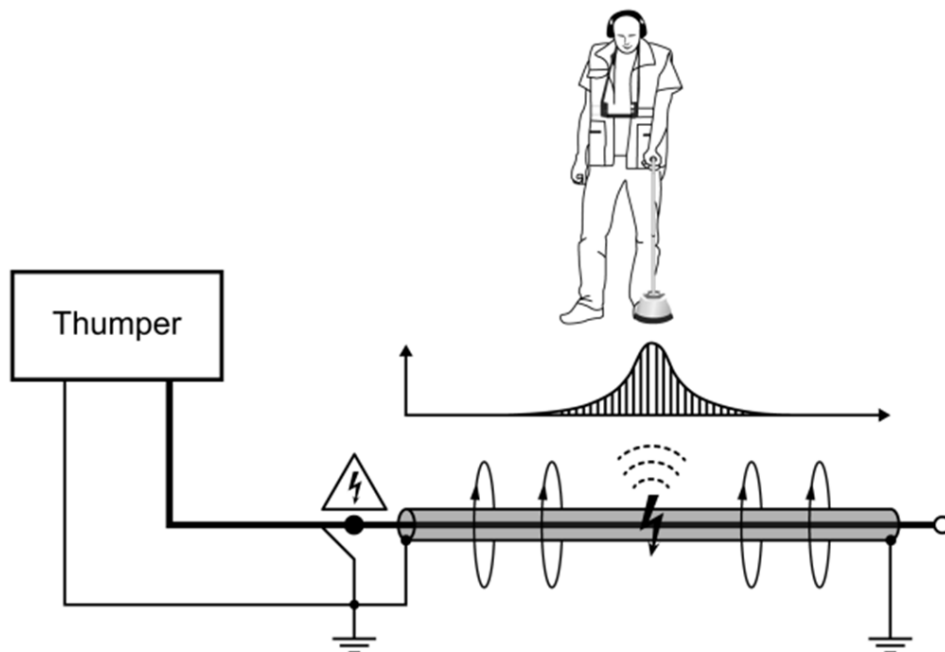


Figura 3.4 – Princípio do método de descarga capacitiva ou *thumper* + detecção acústica para localização de falhas (BROOKE, 1985).

Como complemento à técnica de descarga capacitiva, o *Arc Reflection Method* (ARM) associa a geração do arco elétrico à análise por refletometria no domínio do tempo (TDR), o que possibilita a localização da falha com maior precisão e reduz o risco de danos adicionais ao cabo.

O método da corrente de impulso (*Impulse Current Method* – ICM) consiste em outra solução para a localização de falhas de alta resistência ou intermitentes. Trata-se de uma técnica baseada em gerador de surtos, e não propriamente em TDR, embora

este último seja utilizado como dispositivo de exibição das reflexões, funcionando como registrador dos eventos transitórios no cabo.

Além dessas técnicas, destaca-se o método de queima controlada, conhecido como *burning*, que consiste na aplicação de tensão e corrente elevadas, seja em corrente alternada (frequência de rede ou VLF) ou contínua (por meio de queimador ou *thumper*) com o propósito de converter uma falha de alta resistência em uma falha permanente de baixa resistência.

Para falhas com impedâncias situadas na faixa de 100 Ω a 10 M Ω , classificadas como intermitentes, além das técnicas mencionadas, pode-se empregar o método do decaimento, denominado *Decay Method*. Nessa técnica, um equipamento de teste em corrente contínua (*DC*) carrega o cabo até que ocorra a ruptura do dielétrico no ponto de falha. A cada evento de ruptura, uma onda viajante é gerada, propagando-se e refletindo entre a extremidade do cabo e o ponto de falha até que toda a energia seja dissipada. Esse fenômeno pode ser monitorado por meio de instrumentos sincronizados, como osciloscópios digitais ou TDRs, possibilitando a estimativa precisa da distância até o defeito.

Para falhas localizadas na cobertura externa de cabos enterrados, pode-se aplicar o método de gradiente de tensão (ou *Earth Gradient*). Nessa técnica, uma fonte pulsada de corrente contínua cria um potencial elétrico mensurável na superfície do cabo, gerado pela corrente no ponto de falha. A técnica *Earth Gradient* permite localizar falhas fase-terra em cabos subterrâneos mediante a medição do gradiente de potencial no solo. Quando ocorre a falha, a corrente que retorna pelo solo cria um campo elétrico, e ao medir as diferenças de tensão entre pontos na superfície, é possível estimar a região do ponto de falha. Embora seja um método não invasivo, sua precisão está condicionada à resistividade do solo e pode ser comprometida por interferências externas.

3.2 Técnicas de Localização por Impedância

O princípio de funcionamento dos métodos baseados em impedância está na relação entre a impedância elétrica e a distância até o ponto de falha, considerando os valores de tensões e correntes antes e após o evento. Esses métodos estão descritos no padrão IEEE Std C37.114™-2014 - *Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines* ([Institute of Electrical and Electronics Engineers \(IEEE\), 2014b](#)).

Conforme a configuração adotada, os métodos de localização de falhas podem utilizar medições unilaterais (*single-ended*) ou bilaterais (*two-ended*). Os resultados da estimativa da distância até o ponto de falha estão relacionados à qualidade das medições e à modelagem dos parâmetros da linha de transmissão ([CHOPRA, 2009](#)). Conforme observado na Figura 3.5, o diagrama de uma rede elétrica, com a ocorrência de uma falha à terra no ponto *m* foi utilizado como referência na análise.

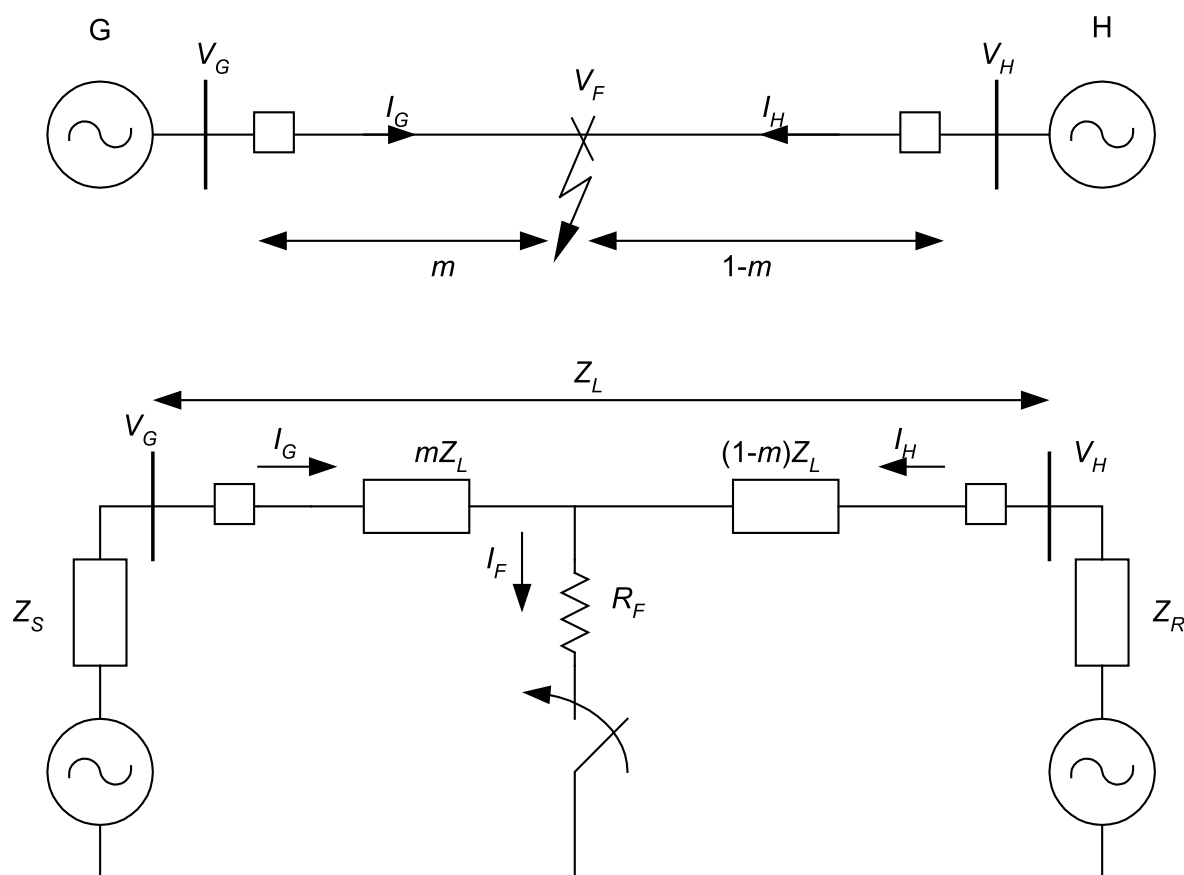


Figura 3.5 – Circuito elétrico equivalente de uma falha a terra no ponto "m" (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2014b).

A rede é alimentada por duas fontes com impedâncias Z_s e Z_R , respectivamente. A corrente de falha à terra, I_F , é composta pela soma da corrente I_G , proveniente da fonte conectada à barra de tensão V_G , e da corrente I_H , oriunda da fonte associada à barra de tensão V_H . O comprimento total da linha é representado por Z_L , enquanto a tensão no ponto de falha é denotada por V_F .

A localização do ponto de falha pode ser determinada pelas seguintes equações:

$$(V_{GF})_{abc} = mZ_{Labc}(I_{GF})_{abc} + V_F. \quad (3.4)$$

$$(V_{HF})_{abc} = (1 - m)Z_{Labc}(I_{HF})_{abc} + V_F. \quad (3.5)$$

Subtraindo as duas equações para eliminar o parâmetro desconhecido V_F , obtém-se:

$$(V_{GF})_{abc} - (V_{HF})_{abc} = mZ_{Labc}(I_{GF})_{abc} + (m - 1)Z_{Labc}(I_{HF})_{abc}. \quad (3.6)$$

A abordagem ilustrada pela equação 3.6 é utilizada em métodos de localização de falhas por impedância baseados em medições realizadas nas duas extremidades do cabo.

Ela expressa a diferença de tensão trifásica entre os terminais G (gerador) e H (carga ou receptor) durante a ocorrência da falha como sendo proporcional às correntes medidas nesses pontos, ponderadas pela impedância longitudinal da linha. O termo m representa a fração do comprimento total do cabo até o ponto de falha, variando entre 0 (falha no terminal H) e 1 (falha no terminal G).

Nessa expressão, V_{GF} e V_{HF} são os fasores de tensões do sistema trifásico, representado pelas fases a , b e c nos terminais G e H, respectivamente, enquanto I_{GF} e I_{HF} representam as correntes trifásicas medidas nesses mesmos pontos. A matriz Z_{Labc} corresponde à impedância longitudinal do cabo por unidade de comprimento, incluindo os efeitos de acoplamento entre fases. A resolução dessa equação permite estimar a posição da falha incipiente ao longo do cabo, sendo a localização física expressa por $x_f = m \cdot L$, em que L representa o comprimento total do cabo.

A equação pode ser resolvida para determinar o valor de m , podendo os valores de fase ser substituídos por suas respectivas componentes simétricas. A redução dos erros requer que os dados sejam coletados de forma sincronizada em ambas as extremidades, assegurando a consistência do processamento.

O cálculo da localização de falhas utilizando medições em ambas as extremidades da linha parte do mesmo princípio do método baseado na medição de impedância por um único terminal. No entanto, a diferenciação está ao utilizar as tensões e correntes medidas nas duas extremidades, o que reduz ou até elimina o efeito da resistência de falha, resultando em menor percentual de erro no cálculo da posição.

Os métodos baseados em impedância são utilizados devido à sua simplicidade, baixo custo e fácil implementação. No entanto, sua aplicação pode ser limitada pela dependência da resistência de falha (no caso de apenas uma extremidade), pela possibilidade de múltiplas soluções e pela sensibilidade às variações de carga, o que exige uma interpretação dos resultados (CHOPRA, 2009; DASHTI et al., 2021).

Para superar essas limitações e aprimorar a representatividade do modelo, aplica-se ao circuito um conjunto de equações diferenciais que incorporam os efeitos dos elementos armazenadores de energia, como capacitâncias e indutâncias. Nesse contexto, a tensão no ponto de falha é determinada com base em dados de medição obtidos nos terminais de fonte e receptor, e a localização do defeito é estimada por meio da equação de igualdade entre as tensões calculadas em diferentes pontos do sistema, possibilitando a dedução da posição da falha no cabo (ZHANG et al., 2016).

3.3 Estado da Arte das Técnicas de Localização

Com o objetivo de assegurar a estabilidade e a confiabilidade dos sistemas elétricos, as técnicas de localização de falhas em cabos isolados por meio de monitoramento *online* têm ganhado destaque (WANG et al., 2022). A identificação e localização de falhas de maneira *online* permite a detecção de problemas sem a interrupção do serviço, garantindo uma resposta mais ágil e eficiente (SONG et al., 2022) para a manutenção do sistema.

Contudo, a literatura revela que a localização do ponto de falha dos cabos isolados enfrenta restrições em questões técnicas e operacionais. Embora o monitoramento *online* tenha avançado, permanece a necessidade de aprofundar as pesquisas para superar as limitações relacionadas à identificação e à localização do ponto de falha (SONG et al., 2022).

A partir da análise de 51 estudos relacionados ao tema, identificaram-se as principais questões discutidas pelos autores quanto à localização de falhas em cabos isolados. A Figura 3.6 apresenta, por meio de um gráfico de radar, a distribuição quantitativa dos principais tópicos abordados na literatura, evidenciando os aspectos mais recorrentes nesses trabalhos (CARMO; SILVA; MAIA, 2025b).

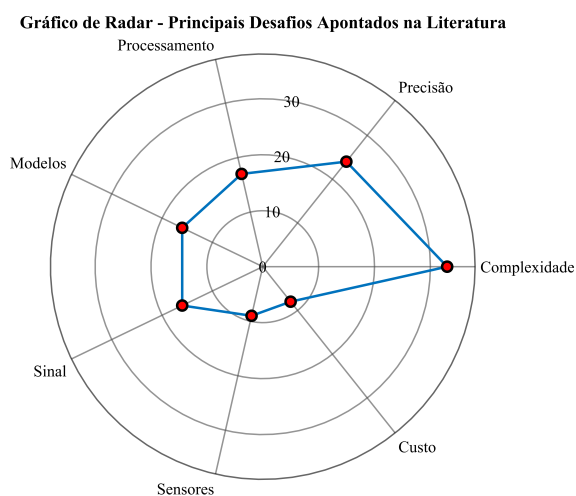


Figura 3.6 – Distribuição quantitativa dos principais problemas de localização de falhas em cabos citados na literatura estudada (Fonte: elaborada pela autora).

O gráfico evidencia que os principais temas abordados nos trabalhos sobre localização de falhas em cabos isolados são a complexidade dos métodos, a precisão dos resultados e as exigências de processamento. A complexidade refere-se à dificuldade de aplicar, modelar e interpretar os métodos envolvidos, devido a fatores como modelos matemáticos avançados, necessidade de instrumentação precisa e exigência de conhecimento técnico especializado. Questões como modelagem, qualidade dos sinais, sensores e custos foram mencionadas, mas com menor frequência.

As pesquisas de (ZHAO et al., 2022) e (ZHU et al., 2022) apontam que a diversidade de ambientes e configurações nos sistemas de distribuição de energia dificulta a padronização das análises, exigindo abordagens específicas para cada caso. Tal heterogeneidade dificulta o desenvolvimento de soluções universais para a localização de falhas. Outros autores corroboram essa perspectiva, ressaltando que fatores como a estrutura da rede, as condições ambientais e a topologia dos sistemas exercem influência direta no desempenho e na aplicabilidade das metodologias propostas (SONG et al., 2022; WU et al., 2022; LOWCZOWSKI; OLEJNIK, 2022; DAS; REDDY, 2022; WU et al., 2022; WANG et al., 2022; TERESA et al., 2022; QU et al., 2022; DESHMUKH et al., 2018; SHINGRUT et al., 2020; MISHRA et al., 2022; ZHANG, 2023; FENG; CHENG, 2023; PENG et al., 2022; LI et al., 2023; MIRSHEKALI; SANTOS; SHAKER, 2023; BUGAJSKA; DESANIUK, 2023; JAMSHIDIGAHROUEI; NOROUZI; ESFANDIARI, 2023; LV et al., 2023; WANG et al., 2023).

As análises de (CHOUDHARY et al., 2022) e (JUNLING et al., 2023) indicam que, além de questões relacionadas à diversidade estrutural e ambiental, outro fator diz respeito à simulação das condições reais de operação dos cabos isolados, no que se refere à representação dos mecanismos de degradação sob diferentes cenários operacionais. Essa preocupação evidencia a dificuldade em reproduzir, em ambiente computacional, o comportamento real dos sistemas em operação.

Nesse contexto, diversos autores discutem as dificuldades para aprimorar os sistemas de monitoramento aplicados à detecção de falhas em cabos isolados. Por exemplo, (FARADE et al., 2022) destacam a influência das variações de impedância decorrentes das alterações nos parâmetros físicos dos cabos e do solo, enquanto (CRUZ et al., 2023) reforçam a necessidade de adaptar os modelos às configurações dinâmicas das redes elétricas. Já autores como (XU et al., 2023) e (WAN; YAN, 2023) ressaltam a importância de distinguir falhas incipientes de distúrbios operacionais, com o objetivo de mitigar alarmes falsos. Em paralelo, (LV et al., 2023) e (XU et al., 2023) destacam a relevância dos desequilíbrios trifásicos e seus impactos nas análises.

As definições que influenciam a confiabilidade nos resultados da localização de falhas incipientes constituem temas recorrentes na literatura, ressaltando a importância de tais abordagens metodológicas. Trabalhos como os de (QU et al., 2022; LU et al., 2022; LV et al., 2023) e (LI et al., 2023) ressaltam que a curta duração e a baixa energia associadas a essas falhas constituem um desafio para o aprimoramento da precisão na estimativa do ponto de falha. Além disso, (LU et al., 2022) chama atenção para as limitações impostas pelas condições reais de operação, caracterizadas por fatores externos e pela heterogeneidade elétrica. Como resposta, (QU et al., 2022) e (LV et al., 2023) propõem algoritmos que não dependem da modelagem da tensão do arco, buscando melhores resultados.

No trabalho de (QU et al., 2022), foram apresentados modelos de sequência zero

com base no circuito equivalente ilustrado na Figura 3.7. Embora o estudo não incorpore os parâmetros elétricos da blindagem metálica, o algoritmo proposto diferencia-se por eliminar a necessidade de modelagem do arco elétrico, adotando o método de impedância de dois terminais para a estimativa da localização da falha.

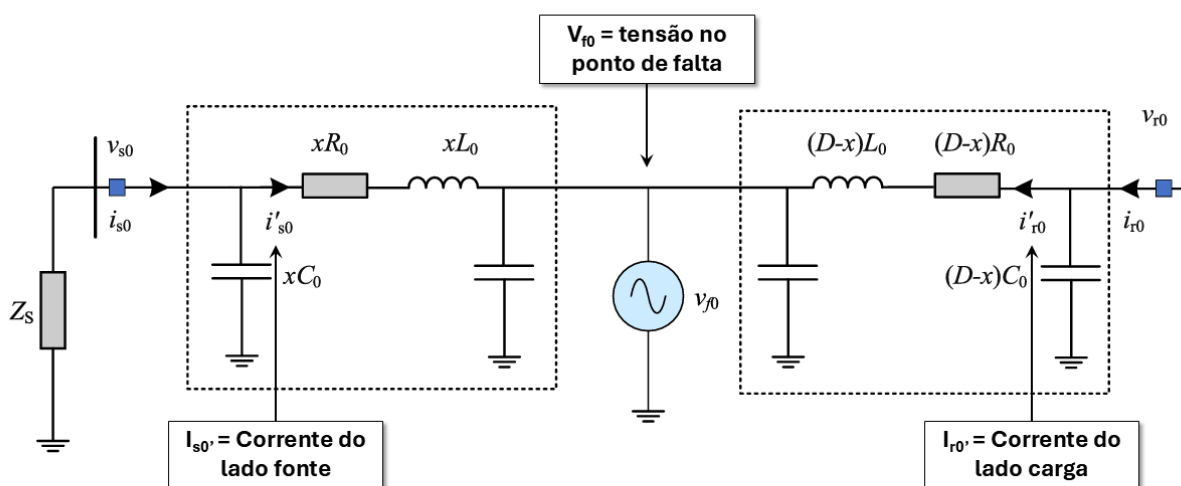


Figura 3.7 – Modelo de localização de falha com a aplicação do método da impedância de dois terminais proposto por (QU et al., 2022).

No que se refere ao uso das correntes na blindagem metálica para diagnóstico, há divergências de interpretação entre os autores. Por um lado, (ZHAO et al., 2022) questiona a confiabilidade dessas correntes como indicativo do estado do isolamento. Por outro, (CHI et al., 2022) argumenta que a baixa magnitude dessas correntes pode ser explorada para detectar variações sensíveis com maior precisão. Já (CHOUDHARY et al., 2022) e (TARIQ et al., 2022) alertam para influências externas, como condições dinâmicas e envelhecimento dos cabos, que afetam a resposta do sistema. Ainda nesse campo, (ZHANG, 2023; LV et al., 2023; LAN et al., 2023) evidenciam que a qualidade da amostragem é um fator que impacta a precisão das localizações.

Além disso, interferências externas e ruídos são apontados como elementos prejudiciais que podem gerar alarmes falsos e distorções dos dados medidos. Trabalhos como os de (MISHRA et al., 2022; BAHARUZU; ILHAN; SOYKAN, 2023; MISHRA et al., 2021) e (MISHRA; SWAIN; DASH, 2022) destacam essas interferências, enquanto (MIRSHEKALI; SANTOS; SHAKER, 2023) associa os erros à limitação dos próprios dispositivos de aquisição de dados e medições.

O ambiente de instalação adiciona incertezas às análises. Segundo (PENG et al.,

2021; SAID et al., 2022; JAMSHIDIGAHROUEI; NOROUZI; ESFANDIARI, 2023), muitos fenômenos ainda carecem de modelagem que traduza cenário em estudo. Já (WANG et al., 2023) associa a dificuldade de acesso às informações do estado atual do isolamento ao envelhecimento natural dos cabos, visão corroborada por (SUGDARE et al., 2023), que reforça os entraves impostos pelo difícil acesso aos cabos enterrados.

As limitações técnicas dos dispositivos comprometem o desempenho dos algoritmos de localização. Estudos como os de (WANG et al., 2022; TARIQ et al., 2022; MISHRA et al., 2022) e (BAHAROZU; ILHAN; SOYKAN, 2023) apontam que os sistemas disponíveis não têm capacidade de processamento suficiente para lidar com o elevado número de variáveis. Essa limitação decorre da taxa de amostragem dos sinais, que nem sempre é adequada para capturar os transitórios associados às falhas incipientes, conforme discutido por (WU et al., 2022), (LOWCZOWSKI; OLEJNIK, 2022), (LU et al., 2022) e (BAAYEH; KLEEMANN, 2023).

Nesse cenário, a capacidade operacional dos sistemas se torna um caminho crítico, como apontado por (ZHANG, 2023; LI et al., 2023) e (MISHRA; SWAIN; DASH, 2022), que destacam a necessidade de armazenamento e capacidade para processamento na detecção, filtragem, extração e interpretação dos sinais de falha. (LOURO; FERREIRA, 2022) reforça essa limitação.

Algumas propostas buscam superar as questões relatadas. Por exemplo, (XU et al., 2023) apresenta um método analítico para estimar a corrente na blindagem metálica no cabo, tanto em condições normais quanto sob falha, com a vantagem de não depender da resistência de falha. No entanto, essa abordagem permanece limitada a cenários de falha permanente, não abrangendo casos incipientes ou transitórios.

O trabalho de (ZHU et al., 2022) propõe um método de monitoramento online e diagnóstico de falhas em cabos de alta tensão com blindagem metálica em transposição (cross-bonded), baseado na análise das componentes resistiva e capacitiva das correntes. Utilizando um modelo equivalente em MATLAB/Simulink e sensores distribuídos, o método identifica o estado da isolação, falhas na blindagem e curtos em emendas, a partir da separação das correntes de fuga e de blindagem. Embora o estudo mencione a localização da falha, esta se limita à identificação do tipo e da severidade do defeito por meio das assinaturas nos sinais, não contemplando o cálculo da posição física no cabo. O modelo empregado é um circuito RC equivalente, sem a aplicação de métodos de impedância.

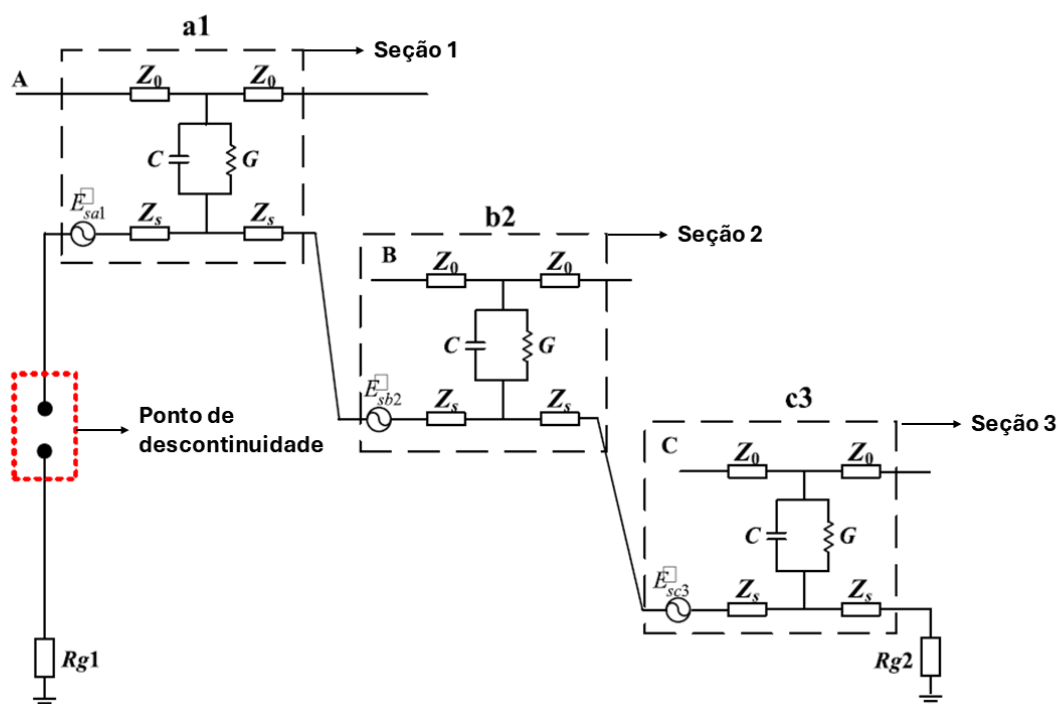


Figura 3.8 – Modelo de localização de falha pelo método da impedância de dois terminais para cabos *cross-bonded* (Adaptado de (ZHU et al., 2022)).

Por outro lado, o trabalho de (KULKARNI; SANTOSO; SHORT, 2014) elaboram uma proposta de um algoritmo de localização de falhas incipientes no domínio do tempo, assumindo uma forma quadrada para a tensão de arco e corrente em fase, utilizando registros de qualidade de energia e técnicas de pré e pós-processamento. O método apresenta erro médio inferior a 10%, mesmo com baixa taxa de amostragem.

Por fim, abordagens como a de (HERRERA-OROZCO, 2017), baseadas em modelos de impedância e arco elétrico, optam por não considerar medições na blindagem metálica, justificando que essas variáveis não estão geralmente disponíveis na prática. Já (ZHANG et al., 2016) propõem um método iterativo que estima a posição da falha com base na distorção harmônica causada pelo arco, utilizando a tensão no ponto de falha para calcular a distância.

Diante das questões identificadas na literatura, fica evidente que a localização de falhas incipientes em cabos isolados ainda demanda avanços, tanto na modelagem dos fenômenos envolvidos quanto no aprimoramento dos sistemas de medição e processamento de sinais. As limitações operacionais, a diversidade de topologias e ambientes, as interferências externas e a natureza transitória dessas falhas compõem um cenário que exige soluções específicas e cada vez mais adaptáveis a cada circuito aplicado. Assim, os estudos analisados não apenas evidenciam as lacunas existentes, e reforçam a importância do desenvolvimento de metodologias que considerem as particularidades do sistema elétrico e explorem novas abordagens de monitoramento.

Com base na revisão da literatura, foram selecionados quatro artigos cujas lacunas metodológicas forneceram subsídios relevantes à fundamentação teórica e orientaram o desenvolvimento desta pesquisa, evidenciando sua contribuição original frente aos estudos existentes.

O trabalho de (PAN et al., 2020) propõe um método analítico para localização de falhas incipientes em cabos, utilizando as grandezas elétricas medidas nas duas extremidades. A abordagem considera um modelo de parâmetros distribuídos com a blindagem metálica representada por um circuito RC paralelo e aplica uma transformação de modo-fase para obter uma expressão analítica da posição da falha com base nas tensões e correntes da blindagem. As simulações demonstram que o método é aplicável sob diversas condições, como diferentes severidades de falha, modos de aterramento, presença de *cross-bonding*, resistência de falha e variações de carga. Destaca-se que essa metodologia não utiliza o método de impedância de dois terminais.

Os cálculos de tensão na blindagem metálica utilizados por (BAAYEH; KLEEMANN, 2023) em seu algoritmo não são aplicáveis à localização de falhas incipientes, limitando-se a falhas permanentes. Apesar disso, o trabalho faz uma introdução ao monitoramento das correntes de blindagem utilizando medidores de qualidade de energia e comunicação entre si conforme apresentado no esquema da Figura 3.9.

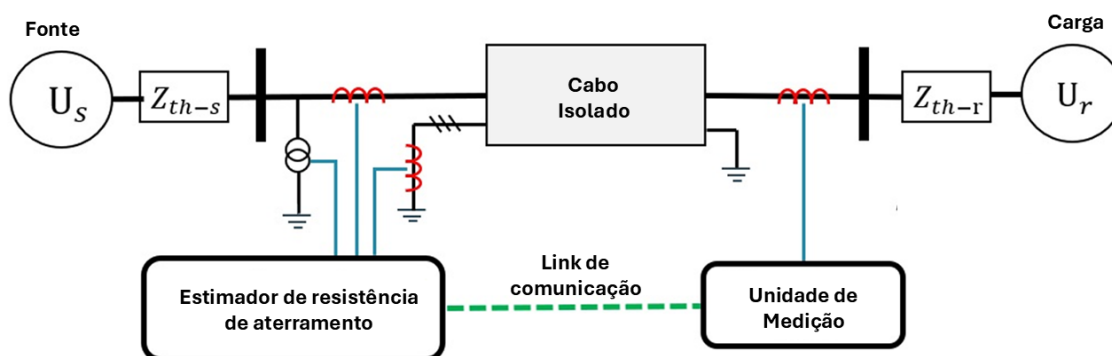


Figura 3.9 – Modelo de localização de falha utilizando o cálculo de resistência descrito no trabalho de (BAAYEH; KLEEMANN, 2023).

No método proposto pelos autores, a tensão na blindagem metálica não é medida, mas sim estimada por meio de um modelo elétrico de seis fases e da análise da componente de sequência zero. A metodologia emprega exclusivamente medições de corrente nos

condutores principais e nas blindagens, sem a necessidade de sensores específicos para a tensão na blindagem.

O trabalho de (ZHU et al., 2022) propõe um método de monitoramento online da isolamento de cabos de alta tensão com blindagem metálica transposta *cross-bonded*, utilizando a análise das correntes resistiva e de blindagem. Embora identifique falhas na isolamento, circuitos abertos na blindagem e curtos em emendas, o método não se baseia na impedância de dois terminais e não estima a posição exata da falha, apenas a seção defeituosa. As medições são realizadas por sensores de corrente e tensão distribuídos ao longo do sistema, com simulações implementadas em (INC., 2022). Contudo, o método não foi estendido para outras filosofias de aterramento.

Por fim, o artigo de (QU et al., 2022) propõe um método inovador para localizar falhas incipientes em cabos subterrâneos utilizando medições de sequência zero sincronizadas em dois terminais, dispensando a necessidade de modelos de arco elétrico. A abordagem baseia-se em um circuito equivalente π da linha de distribuição e em uma equação diferencial no domínio do tempo. A identificação do intervalo da falha e a filtragem das componentes de alta frequência no sinal (não especificados no trabalho) são feitas por transformada *wavelet*, o que permite estimar a posição da falha mesmo em condições transitórias. Como resultado, os autores demonstram que o método apresenta respostas a diferentes modelos e parâmetros de arco, distâncias de falha, níveis de carga e presença de ramais laterais. Os resultados mostram erros médios de localização entre 1% e 3%, com desempenho superior aos métodos convencionais que dependem de modelos prévios do arco elétrico.

A análise dos trabalhos coletados pela autora, associada ao objetivo de fundamentar a proposta metodológica desenvolvida nesta pesquisa, motivou a realização de uma revisão detalhada dos estudos citados, cujos principais aspectos estão sintetizados na Tabela 1.1. A tabela apresenta as principais abordagens adotadas pelos autores selecionados, evidenciando as contribuições e os diferenciais introduzidos por esta pesquisa em relação ao estado da arte.

3.4 Considerações Finais

Este capítulo introduziu os conceitos de pré-localização e localização de falhas em cabos isolados, além de apresentar um panorama das principais técnicas aplicadas. Estabeleceram-se os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento da metodologia proposta, com ênfase na aplicação *online* do método de impedância, a partir da análise dos sinais na blindagem metálica. As discussões conduzidas na literatura, juntamente com a identificação das lacunas existentes, constituem o alicerce para o desenvolvimento e a validação da metodologia de cálculo da posição de falhas, a ser detalhada nos capítulos subsequentes.

4 METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA POSIÇÃO DE FALHAS

Vistas as características dos cabos elétricos isolados e a necessidade de implementação de novas metodologias para identificação e localização de falhas, o objetivo deste capítulo é apresentar o desenvolvimento de uma metodologia de cálculo para estimar a posição de falhas em cabos isolados e blindados, utilizando os parâmetros e sinais na blindagem metálica.

O desenvolvimento proposto nesta pesquisa fundamenta-se na modelagem do circuito elétrico equivalente, tanto do condutor principal quanto da blindagem metálica. Para isso, são utilizados parâmetros elétricos característicos do sistema, bem como sinais de tensão e corrente obtidos nas extremidades de cada um desses condutores. A metodologia tem como objetivo estimar a posição de falhas do tipo fase-terra em cabos isolados. Além disso, será realizada uma análise comparativa entre os resultados dos dois métodos de localização para avaliar o desempenho de cada abordagem.

4.1 Fundamentos Teóricos

O método da impedância de dois terminais, descrito no IEEE C37.114 ([Institute of Electrical and Electronics Engineers \(IEEE\), 2014b](#)), é empregado para localização de falhas em linhas de transmissão e distribuição em corrente alternada. O circuito elétrico do método é ilustrado na Figura 4.1.

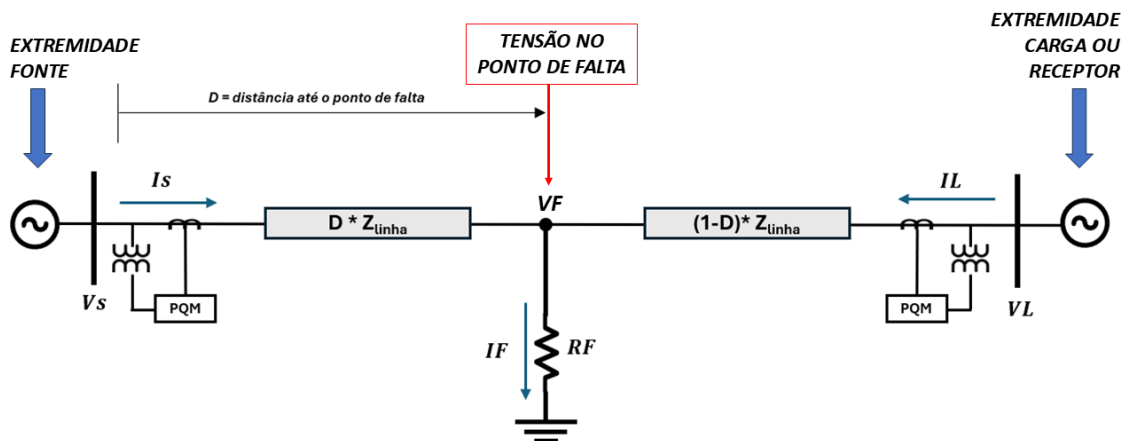


Figura 4.1 – Circuito equivalente para aplicação do método da impedância de dois terminais utilizando o cálculo do valor da tensão no ponto de falha V_F .

O ponto de falha é determinado a partir das equações que deduzem o valor da tensão no ponto de falha V_F . Neste circuito, a falha está localizada na posição D proporcional ao comprimento da linha representada pela impedância total Z_{Linha} com referência de distância a partir da barra de alimentação V_s . De forma equivalente, em relação a barra oposta V_L , o ponto de falha está a uma distância de $(1 - D)$. A tensão no ponto de falha é denotada por V_F , e a resistência associada à falha é denotada por R_F . As tensões nos terminais são indicadas por V_s (fonte) e V_L (carga ou receptor), enquanto as correntes I_s e I_L fluem a partir de cada extremidade, somando-se para compor a corrente de falha total I_F , que atravessa o ponto de defeito. Os parâmetros de medição de corrente e tensão em ambas as extremidades são obtidos por meio de monitores de qualidade de energia representados na figura como (*PQM - Power Quality Monitors*).

Aplicando as relações de tensão e corrente ao modelo unifilar do sistema, obtêm-se as expressões que permitem a dedução do valor da tensão no ponto de falha V_F :

$$V_s = DZ_L I_s + V_F. \quad (4.1)$$

$$V_L = (1 - D)Z_L I_L + V_F. \quad (4.2)$$

Subtraindo as duas equações para eliminar a variável desconhecida V_F temos:

$$V_s - V_L = DZ_L I_s + (D - 1)Z_L I_L. \quad (4.3)$$

O cálculo da distância D é realizado por meio da substituição dos valores medidos de tensão, corrente e da impedância total da linha nos equacionamentos do método. Durante a ocorrência da falha, o resultado obtido converge para a estimativa da sua posição no cabo.

4.2 Modelagem de Cabos Isolados Utilizando a Blindagem Metálica

4.2.1 Cálculo dos Parâmetros

Os resultados do método de impedância são diretamente influenciados pelos valores da impedância da linha, que impactam na estimativa da posição da falha. Nesse contexto, os cálculos dos parâmetros elétricos são estabelecidos com base nas diretrizes recomendadas pelo guia IEEE C37.114-2014, que fornecem os fundamentos para a determinação das componentes de impedância em sistemas de cabos isolados pela aplicação do método de Carson ([Institute of Electrical and Electronics Engineers \(IEEE\), 2014b](#); [CARSON, 1926](#)). Esses parâmetros estão associados às características físicas dos cabos, incluindo aspectos

construtivos, geometria, propriedades dos materiais e dimensões (ZHU et al., 2022; ZHAO et al., 2022; WAN; YAN, 2023).

Embora o cálculo dos parâmetros elétricos do cabo tenha sido realizado com base no método de Carson, não se considerou a modelagem detalhada do solo neste trabalho. Isso se deve ao fato de que, para cabos isolados com blindagem metálica, a corrente de falha incipiente encontra um caminho preferencial e confinado pela própria blindagem até o sistema de aterramento. Nesse contexto, a influência do solo sobre a propagação dos sinais na blindagem torna-se desprezível, uma vez que o fluxo de corrente permanece direcionado pela estrutura metálica do cabo, sem interação significativa com o meio externo. Dessa forma, a modelagem do solo não se revelou necessária para os objetivos desta pesquisa, que concentra sua análise na resposta elétrica da blindagem como meio para a localização de falhas incipientes.

Para representar os cabos isolados, é necessário considerar tanto as impedâncias próprias quanto as mútuas entre os condutores (XU, 2011). A Figura 4.2 ilustra o modelo de impedâncias, destacando as componentes próprias, as mútuas e suas interações com os demais condutores.

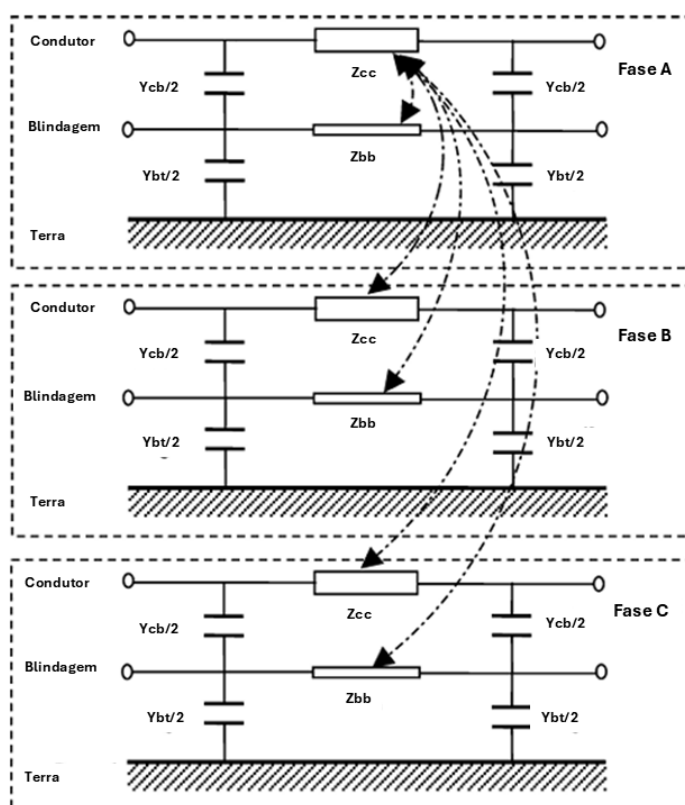


Figura 4.2 – Diagrama do modelo com cabos trifásicos considerando impedâncias próprias e mútuas (adaptado de (XU, 2011)).

O modelo apresentado consiste no equivalente do circuito elétrico de parâmetros concentrados de um cabo isolado trifásico com blindagem metálica, considerando individualmente as fases A, B e C. Cada fase é representada pelo condutor principal e pela

blindagem metálica, modelados por elementos de impedância e admitância longitudinal e transversal.

Em cada fase, a impedância longitudinal do condutor, representada por z_{cc} , incorpora os efeitos da resistência e da indutância por unidade de comprimento. De forma análoga, a impedância longitudinal associada à blindagem é representada por z_{nn} , conectada entre a blindagem e o solo. As admitâncias transversais y_{cc} e y_{nn} , divididas igualmente entre as extremidades de cada segmento, modelam o acoplamento capacitivo e as perdas dielétricas entre o condutor principal e a blindagem, bem como entre a blindagem e o solo, respectivamente.

As linhas tracejadas que conectam as fases representam o acoplamento eletromagnético entre os condutores, fenômeno que ocasiona interferências mútuas e influencia a propagação de sinais em regimes transitórios ou durante falhas. Este modelo permite representar de forma mais precisa o comportamento eletromagnético do cabo, considerando tanto os caminhos principais de condução quanto as interações parasitas entre os elementos do cabo e o solo.

Além disso, o modelo serve como referência para o cálculo dos parâmetros elétricos por métodos analíticos, como o método de Carson, ou por meio de simulações em ferramentas computacionais, como o MATLAB/Simulink (INC., 2022). O modelo *Power AC Cable*, disponível no MATLAB/Simulink, considera as impedâncias mútuas com base nos dados de entrada referentes à configuração e estrutura dos cabos isolados.

Resistência

A resistência em corrente alternada (AC) é superior à resistência em corrente contínua (DC), em razão dos efeitos pelicular e de proximidade. Esses valores são calculados para a componente fundamental de 60Hz:

$$R_{DC} = \frac{\rho}{S}(1 + \alpha_T(T - 20)). \quad (4.4)$$

Onde:

ρ : resistividade ($1,724 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, para o cobre);

S : área da seção transversal;

α_T : fator de correção de temperatura ($3,93 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ para 20°C).

A resistência AC é maior que a DC pois é influenciada pelo efeito pelicular e o efeito de proximidade. O efeito pelicular ocorre pela distribuição não uniforme da corrente, que se concentra na superfície do condutor e se intensifica com o aumento da frequência.

O efeito de proximidade surge quando condutores próximos induzem correntes parasitas, alterando a distribuição da corrente original. Assim, a resistência AC é corrigida conforme:

$$R_{AC} = R_{DC} \cdot y_s \cdot y_p. \quad (4.5)$$

Onde:

y_s : fator de correção para efeito pelicular;

y_p : fator de correção para efeito de proximidade.

A resistência é definida por:

$$R(f) = \frac{\rho}{S} \left(1 + \frac{f\mu}{\sigma} \right). \quad (4.6)$$

Onde:

f : frequência;

μ : permeabilidade do condutor (≈ 1);

σ : condutividade do cobre, 5.96×10^7 S/m a 20°C;

O fator de perda associado ao efeito pelicular é determinado pelas Equações (4.7) e (4.8):

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 x_s^4} \quad (4.7)$$

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R_{DC}} \times 10^{-7} \times k_s \quad (4.8)$$

em que:

R_{DC} – resistência DC, Ω/m ;

f : frequência de operação, Hz;

k_s : coeficiente do efeito pelicular.

O fator de perda devido ao efeito de proximidade, necessário no caso do cabo com três condutores, é obtido conforme as Equações (4.9) e (4.10):

$$y_p = \left(\frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \right) \left(\frac{d}{s} \right)^2 \times \left[0,312 \left(\frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \right) + 0,27 \right]^{1,18} \quad (4.9)$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R_{DC}} \times 10^{-7} \times k_p \quad (4.10)$$

em que:

R_{DC} : resistência DC, Ω/m ;

f : frequência de operação, Hz;

d : diâmetro do condutor, mm;

s : distância entre o centro dos condutores, mm;

k_p : coeficiente do efeito de proximidade.

Os valores dos coeficientes k_p e k_s correspondentes aos efeitos de proximidade e pelicular, respectivamente, são estabelecidos pela norma IEC 60287 para diferentes tipos de condutores.

Resistência Efetiva

A resistência efetiva corresponde à resistência em corrente alternada (AC), ajustada para incluir as perdas adicionais na blindagem e na armadura. As Equações (4.11), (4.12) e (4.13) detalham a obtenção da resistência efetiva:

$$R_{\text{ef}} = R_{\text{AC}} \times (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad \Omega/\text{m} \quad (4.11)$$

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1 \quad (4.12)$$

$$\lambda_2 = \lambda'_2 + \lambda''_2 \quad (4.13)$$

onde:

R_{ef} : resistência efetiva, Ω/m ;

λ_1 : coeficiente de perdas na blindagem;

λ'_1 : parcela de λ_1 referente à corrente de retorno;

λ''_1 : parcela de λ_1 referente às correntes parasitas;

λ_2 : coeficiente de perdas na armadura;

λ'_2 : parcela de λ_2 referente às perdas por histerese magnética;

λ''_2 : parcela de λ_2 referente às correntes parasitas.

O cálculo de λ_1 e λ_2 varia de acordo com a construção do cabo. O procedimento para obtenção desses valores em diferentes tipos de cabos está descrito na norma IEC 60287-1-1.

Capacitância

A capacitância de um cabo é dada por:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln(R_2/R_1)}. \quad (4.14)$$

Onde:

R_2 : raio externo da isolação (incluindo semicondutiva);

R_1 : raio interno do condutor;

ε : permissividade da isolação.

As camadas semicondutivas entre o condutor e a isolação, bem como entre a isolação e a blindagem metálica, formam um acoplamento capacitivo em série. Assim, a capacitância total do cabo deve ser corrigida pelo fator:

$$C_{corr} = C \cdot \varepsilon_{ins}. \quad (4.15)$$

Onde:

ε_{ins} : permissividade da isolação (EPR = 2,6; XLPE = 2,3);

Indutância

A indutância do cabo pode ser calculada em [H/m] como:

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{b}{a} \right). \quad (4.16)$$

Onde:

μ : permeabilidade do condutor (≈ 1);

a : raio interno da isolação;

b : raio externo da isolação.

Condutância

A condutância da isolação do cabo é definida como o inverso da resistência de isolamento:

$$G = \frac{1}{R_{isol}} \quad (4.17)$$

Onde:

$$R_{isol} = \frac{\rho_{isol} L}{\pi(D_{ext} - D_{int})} \quad (4.18)$$

Sendo:

ρ_{isol} : resistividade do material isolante ($\Omega \cdot m$);

D_{ext} : diâmetro externo do isolante (mm);

D_{int} : diâmetro do condutor (mm);

L : comprimento do cabo (m).

A resistência de isolamento do cabo deve atender, no mínimo, ao valor estipulado pela ([Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022](#)):

$$R_i = 3700 \times \log \left(\frac{D}{d} \right). \quad (4.19)$$

Em que:

R_i : resistência de isolamento, expressa em megaohms.kilômetro ($M\Omega \cdot km$);

D : diâmetro nominal sobre a isolação, em milímetros (mm);

d : diâmetro nominal sob a isolação, em milímetros (mm).

Matrizes RLC

Os valores das resistências, impedâncias e capacitâncias dos condutores são organizados em matrizes $2N \times 2N$, onde N representa o número de cabos de fase, incluindo as respectivas blindagens metálicas. As entradas diagonais dessas matrizes representam os valores próprios de cada condutor, enquanto as posições fora da diagonal indicam os acoplamentos mútuos.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{aa} & r_{ax} & r_{ab} & r_{ab} & r_{ab} & r_{ab} \\ r_{ax} & r_{xx} & r_{ab} & r_{ab} & r_{ab} & r_{ab} \\ r_{ab} & r_{ab} & r_{aa} & r_{ax} & r_{ab} & r_{ab} \\ r_{ab} & r_{ab} & r_{ax} & r_{xx} & r_{ab} & r_{ab} \\ r_{ab} & r_{ab} & r_{ab} & r_{ab} & r_{aa} & r_{ax} \\ r_{ab} & r_{ab} & r_{ab} & r_{ab} & r_{ax} & r_{xx} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Nesta matriz:

r_{aa} representa a resistência própria do condutor de fase.

r_{xx} é a resistência própria da blindagem metálica.

r_{ax} corresponde à resistência mútua entre o condutor de fase e sua respectiva blindagem.

r_{ab} representa a resistência mútua entre condutores de fase distintos.

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ax} & l_{ab} & l_{ab} & l_{ab} & l_{ab} \\ l_{ax} & l_{xx} & l_{ab} & l_{ab} & l_{ab} & l_{ab} \\ l_{ab} & l_{ab} & l_{aa} & l_{ax} & l_{ab} & l_{ab} \\ l_{ab} & l_{ab} & l_{ax} & l_{xx} & l_{ab} & l_{ab} \\ l_{ab} & l_{ab} & l_{ab} & l_{ab} & l_{aa} & l_{ax} \\ l_{ab} & l_{ab} & l_{ab} & l_{ab} & l_{ax} & l_{xx} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Nesta matriz:

l_{aa} é a indutância própria do condutor de fase.

l_{xx} é a indutância própria da blindagem metálica.

l_{ax} representa a indutância mútua entre fase e blindagem.

l_{ab} corresponde à indutância mútua entre condutores de fase diferentes.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{ax} & -c_{ax} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_{ax} & c_{ax} + c_{xe} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{ax} & -c_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_{ax} & c_{ax} + c_{xe} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{ax} & -c_{ax} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{ax} & c_{ax} + c_{xe} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Nesta matriz:

c_{ax} representa a capacitância entre o condutor de fase e sua blindagem.

c_{xe} é a capacitância entre a blindagem e o solo (terra).

Os termos negativos refletem o acoplamento capacitivo mútuo (simetria da matriz).

O termo $c_{ax} + c_{xe}$ expressa a capacitância total associada à blindagem.

O modelo adotado considera valores desprezíveis ou nulos para os termos que representam o acoplamento capacitivo direto entre condutores e blindagens de fases distintas, dado que sua influência é inferior àquela observada entre cada condutor e sua respectiva blindagem (INC., 2022).

4.2.2 Representação do Cabo Isolado

Os modelos de linha com parâmetros distribuídos, como o modelo em π , representam sistemas de transmissão por meio de elementos elétricos que caracterizam a impedância longitudinal, composta pela resistência R e indutância L , e a impedância transversal, composta pela condutância G e capacitância C . Esses parâmetros são definidos para uma frequência específica, conforme ilustrado no diagrama apresentado na Figura 4.3.

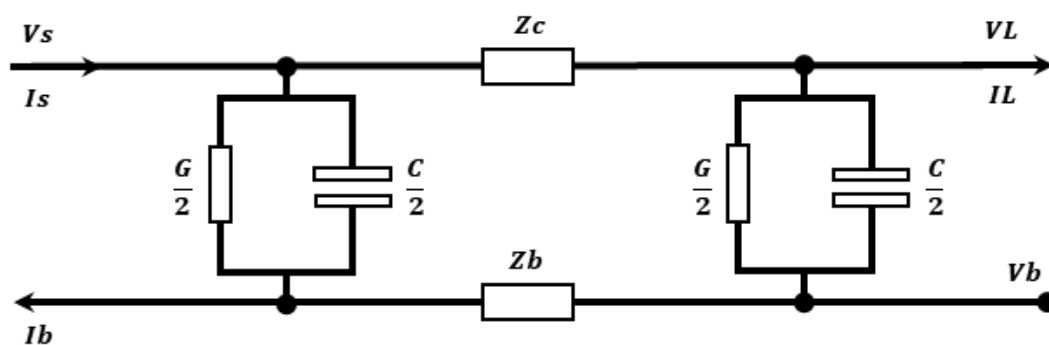


Figura 4.3 – Representação modelo π do cabo isolado incluindo os parâmetros da blindagem metálica para regime permanente ou fenômenos de baixa frequência.

A Figura 4.3 representa o circuito equivalente, no qual as impedâncias longitudinais do condutor principal são indicadas por Z_c e a da blindagem metálica por Z_b . As grandezas de tensão e corrente da fonte e da carga são representadas por V_s , I_s , V_L e I_L , respectivamente. Na blindagem metálica, as tensões e correntes são designadas por V_b e I_b . As impedâncias transversais, ou de *shunt*, são modeladas pelos parâmetros G (condutância) e C (capacitância), distribuídos de forma simétrica no circuito π .

Na modelagem de linhas de transmissão, o modelo por impedância série aplica-se a linhas curtas, caracterizadas por comprimentos de até 80 km para sistemas de até 150 kV, 40 km para sistemas entre 150 e 400 kV, ou até 20 km para tensões superiores a 400 kV. Nesse caso, os efeitos capacitivos são desprezados, e a linha é representada unicamente pela impedância série.

Para linhas de média extensão, adota-se o modelo π nominal, que inclui a impedância série e a admitância transversal distribuída nas extremidades, possibilitando uma representação mais precisa dos efeitos capacitivos. Esse modelo é indicado para linhas de 150 a 400 kV com até 200 km de comprimento, ou para tensões superiores a 400 kV com até 100 km de extensão.

O fenômeno de eliminação de faltas em sistemas de potência manifesta-se por meio de oscilações de baixa frequência, compreendendo a faixa de 60 Hz a 3 kHz conforme (MARTINEZ-VELASCO, 2017). Nesse contexto, o efeito de propagação no solo não exerce influência significativa, uma vez que, em baixas frequências, o comprimento de onda associado é elevado, reduzindo o impacto dos efeitos de propagação e atenuação no solo. Além disso, em cabos isolados com blindagem metálica, a própria blindagem constitui o caminho preferencial para o escoamento das correntes de falta, o que reduz ainda mais a interação direta com o solo.

Com o objetivo de comparar os resultados das simulações com as condições reais de operação, o estudo de caso foi conduzido em um alimentador industrial de 13,8 kV.

Foram coletados dados de tensão de fase-terra e corrente na blindagem metálica, por meio de medições realizadas nos pontos indicados no diagrama unifilar da Figura 4.4.

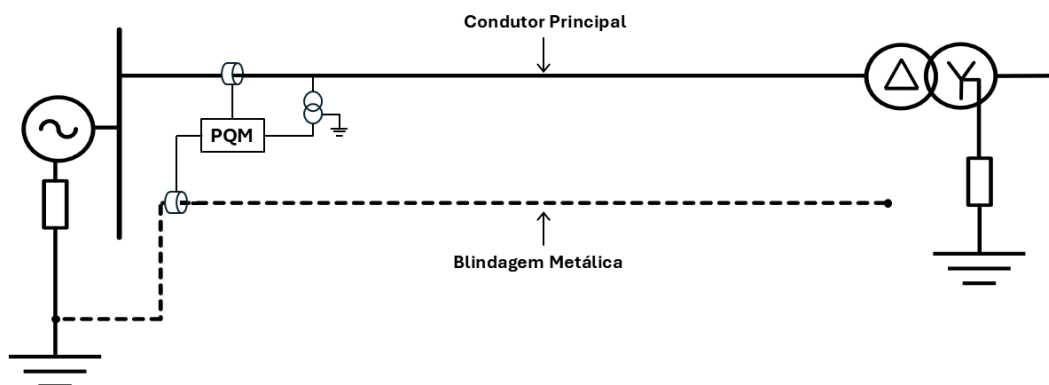


Figura 4.4 – Diagrama unifilar do circuito monitorado para análise e validação do modelo.

Com a instalação de um analisador de qualidade de energia (*Power Quality Monitor* – PQM), foi possível realizar a aquisição contínua das principais grandezas elétricas relacionadas ao comportamento do cabo sob condição de carga. Especificamente, monitoraram-se as correntes de fase, as correntes nas blindagens metálicas e as tensões de fase em relação à terra.

Para as simulações, adotaram-se como valores de referência uma corrente de carga no condutor principal de aproximadamente $I_{\text{carga}} = 150 \text{ A}$, e uma corrente na blindagem metálica próxima de $I_{\text{blindagem}} \approx 1,3 \text{ A}$. Com base nos parâmetros físicos e nas características dos cabos instalados, conforme apresentados na Tabela 4.1, foi elaborado o modelo computacional representando o circuito analisado.

Os parâmetros apresentados foram obtidos por meio de medições realizadas em uma amostra de cabo isolado, utilizando uma ponte de medição RLC. As dimensões físicas do cabo foram extraídas de catálogos técnicos de fabricantes, informações complementares encontram-se disponíveis no Apêndice B.

Os resultados obtidos nas simulações, apresentados na Figura 4.5, demonstraram que o modelo considerado em regime permanente é capaz de reproduzir os valores medidos no circuito real, tanto para a corrente de carga quanto para a corrente na blindagem metálica. O valor máximo registrado para a corrente de carga foi de 150 A, enquanto para a corrente na blindagem metálica foi de 1,3 A.

Tabela 4.1 – Principais parâmetros do circuito do alimentador industrial de 13,8 kV em estudo.

| Dados | Especificações |
|--------------------------|----------------------------|
| Seção | 240 mm ² |
| Resistência do condutor | 0,13×10 ⁻³ Ω/m |
| Indutância do condutor | 8,036×10 ⁻⁸ H/m |
| Capacitância | 0,32×10 ⁻⁶ F/km |
| Isolação | EPR |
| Raio do condutor | 9,1 mm |
| Camada de isolação | 4,5 mm |
| Raio da blindagem | 13,6 mm |
| Resistência da blindagem | 3,146×10 ⁻³ Ω/m |
| Indutância da blindagem | 9,44×10 ⁻⁷ H/m |

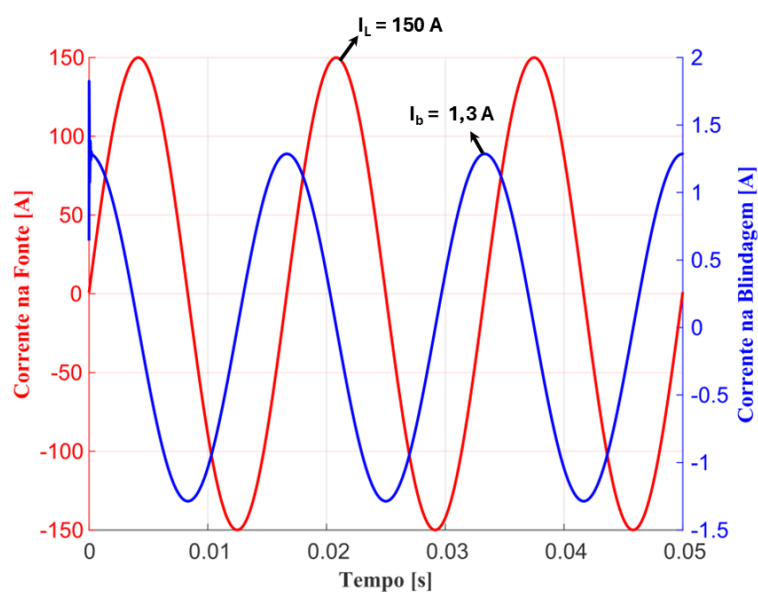


Figura 4.5 – Resultados de corrente da fonte e corrente na blindagem metálica obtidos por meio da simulação do modelo, considerando os parâmetros definidos no estudo de caso.

4.3 Equações para o Cálculo da Posição de Falha

As equações foram desenvolvidas com base na Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC), aplicada ao circuito elétrico ilustrado na Figura 4.6, e complementadas pela Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT), a fim de estabelecer as relações de potencial entre os pontos do circuito e aprimorar a modelagem do sistema.

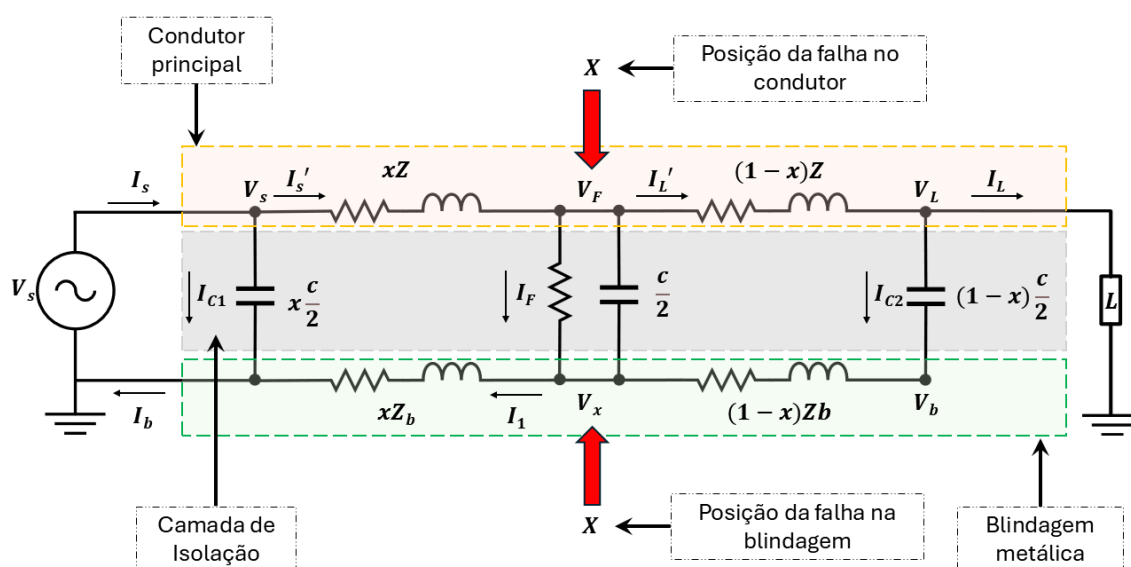


Figura 4.6 – Circuito elétrico equivalente para dedução das equações de tensão no ponto de falha V_F no condutor principal e V_x na blindagem.

O diagrama representa uma linha com impedância longitudinal Z no condutor principal, onde a falha ocorre em um ponto localizado na fração xZ em relação à fonte, sendo x a posição da falha expressa em percentual do comprimento total da linha. No condutor principal, a tensão no ponto de falha é denotada por V_F . De maneira análoga, a blindagem metálica do circuito possui impedância longitudinal Z_b , e a tensão no ponto de falha na blindagem metálica é representada por V_x , correspondente à fração xZ_b do total da impedância longitudinal da blindagem.

As variáveis e os sentidos das correntes representados na Figura 4.6 estão definidos da seguinte forma:

V_s : Tensão da fonte, aplicada entre o condutor principal e o terra no lado de alimentação do cabo.

I_s : Corrente da fonte que alimenta o circuito.

I'_s : Corrente que percorre a linha na porção x , antes do ponto de falha.

I_{C1} : Corrente capacitiva do cabo referente à porção x da linha.

I_{C2} : Corrente capacitiva do cabo referente à porção $1 - x$ da linha, após o ponto de falha.

I_F : Corrente de falha, que flui entre o condutor principal e a blindagem metálica no ponto de falha.

I_1 : Corrente que percorre a blindagem metálica na porção x .

V_F : Tensão no ponto de falha do condutor principal em relação ao terra.

I'_L : Corrente na linha na porção $1 - x$, após o ponto de falha.

V_L : Tensão na carga, no final do cabo.

I_L : Corrente que alimenta a carga (ou lado receptor).

V_b : Tensão da blindagem metálica em relação ao terra.

I_b : Corrente total que percorre a blindagem metálica.

As equações foram desenvolvidas utilizando o método da impedância para calcular a posição estimada da localização da falha, indicado no ponto denominado x . O objetivo deste cálculo é desenvolver uma expressão para a tensão no ponto de falha V_F do condutor principal e, posteriormente para a tensão V_x , que corresponde à tensão equivalente no ponto de falha da blindagem metálica.

4.3.1 Cálculo do Ponto de Falha pelo Condutor Principal

Para calcular a tensão de falha V_F no ponto da falha no condutor principal, foram desenvolvidas duas equações. A primeira equação representa a tensão observada a partir do lado x , enquanto a segunda descreve a tensão obtida a partir do lado $(1 - x)$.

A tensão no ponto de falha, denotada por V_F definida para a porção x do cabo e observada a partir do lado da fonte, é dada por::

$$V_F = V_s - I'_s x Z \quad (4.23)$$

ou

$$V_F = V_s - x R I'_s - x L \frac{dI'_s}{dt}. \quad (4.24)$$

O valor de I'_s é dado por:

$$I'_s = I_s - x \frac{C}{2} \frac{dV_s}{dt}. \quad (4.25)$$

Substituindo a Equação 4.25 na Equação 4.24, obtém-se a seguinte expressão para a tensão no ponto de falha V_F :

$$V_F = V_s - x R \left(I_s - x \frac{C}{2} \frac{dV_s}{dt} \right) - x L \frac{d}{dt} \left(I_s - x \frac{C}{2} \frac{dV_s}{dt} \right) \quad (4.26)$$

Ou:

$$V_F = V_s - x R I_s + x^2 \frac{RC}{2} \frac{dV_s}{dt} - x L \frac{dI_s}{dt} + x^2 \frac{LC}{2} \frac{d^2 V_s}{dt^2}. \quad (4.27)$$

A tensão no ponto de falha V_F , para a porção $1 - x$ do cabo e observada pelo lado da carga, é expressa por:

$$V_F = V_L + I'_L Z(1 - x) \quad (4.28)$$

ou

$$V_F = V_L + (1 - x)RI'_L + (1 - x)L\frac{dI'_L}{dt}. \quad (4.29)$$

O valor de I'_L é dado por:

$$I'_L = I_L + (1 - x)\frac{C}{2}\frac{dV_L}{dt}. \quad (4.30)$$

Então:

$$V_F = V_L + (1 - x)R \left[I_L + (1 - x)\frac{C}{2}\frac{dV_L}{dt} \right] + (1 - x)L\frac{d}{dt} \left[I_L + (1 - x)\frac{C}{2}\frac{dV_L}{dt} \right] \quad (4.31)$$

ou:

$$V_F = V_L + (1 - x)RI_L + (1 - x)^2\frac{RC}{2}\frac{dV_L}{dt} + (1 - x)L\frac{dI_L}{dt} + (1 - x)^2\frac{LC}{2}\frac{d^2V_L}{dt^2}. \quad (4.32)$$

Igualando as expressões obtidas para V_F nas Equações (4.27) e (4.32), chega-se a:

$$\begin{aligned} & V_s - xRI_s + x^2\frac{RC}{2}\frac{dV_s}{dt} - xL\frac{dI_s}{dt} + x^2\frac{LC}{2}\frac{d^2V_s}{dt^2} \\ & - V_L - (1 - x)RI_L - (1 - x)^2\frac{RC}{2}\frac{dV_L}{dt} \\ & - (1 - x)L\frac{dI_L}{dt} - (1 - x)^2\frac{LC}{2}\frac{d^2V_L}{dt^2} = 0. \end{aligned} \quad (4.33)$$

A Equação (4.50) é um polinômio de segundo grau no formato:

$$Ax^2 + Bx + C = 0. \quad (4.34)$$

Os valores dos coeficientes A , B e C são funções da tensão da fonte V_s e corrente da fonte I_s , tensão na carga V_L e corrente da carga I_L . As raízes dessa equação, obtidas após o instante da ocorrência da falha e situadas no intervalo entre 0 e 1, correspondem à solução que determina a posição.

4.3.2 Cálculo do Ponto de Falha pela Blindagem Metálica

De forma análoga ao procedimento aplicado ao condutor principal, a formulação das equações para a blindagem metálica visa ao cálculo da tensão de falha, denotada por V_x no ponto da falha, observando o ponto correspondente da falha no circuito da blindagem. A primeira equação representa a tensão observada a partir da porção x , enquanto a segunda descreve a tensão considerando o lado $(1 - x)$, correspondente a outra extremidade.

O valor da tensão no ponto de falha denominada V_x definida para a porção x da blindagem metálica e vista pelo lado da fonte é dada por:

$$V_x = xZ_b I_1 \quad (4.35)$$

ou

$$V_x = xR_b I_1 + xL_b \frac{dI_1}{dt}. \quad (4.36)$$

A corrente I_1 , que flui na blindagem metálica até o ponto de falha pelo lado da fonte, é expressa por:

$$I_1 = I_b - x \frac{C}{2} \frac{dV_s}{dt}. \quad (4.37)$$

Então a tensão no ponto de falha V_x será:

$$V_x = xR_b \left[I_b - x \frac{C}{2} \frac{dV_s}{dt} \right] + xL_b \frac{d}{dt} \left(I_b - x \frac{C}{2} \frac{dV_s}{dt} \right) \quad (4.38)$$

ou

$$V_x = xR_b I_b - x^2 R_b \frac{C}{2} \frac{dV_s}{dt} + xL_b \frac{dI_b}{dt} - x^2 L_b \frac{C}{2} \frac{d^2 V_s}{dt^2}. \quad (4.39)$$

O valor da tensão no ponto de falha denominada V_x definida para a porção $1 - x$ da blindagem metálica e vista pelo lado da carga é dada por:

$$V_x = V_b + (1 - x)Z_b I_{C2} \quad (4.40)$$

ou

$$V_x = V_b + (1 - x)R_b I_{C2} - (1 - x)L_b \frac{dI_{C2}}{dt}. \quad (4.41)$$

O valor de I_{C2} é dado por:

$$I_{C2} = (1 - x) \frac{C}{2} \frac{d(V_L - V_b)}{dt}. \quad (4.42)$$

Substituindo a Equação (4.42) na Equação (4.41), obtém-se:

$$V_x = V_b + (1-x)R_b \left[(1-x) \frac{C}{2} \frac{d(V_L - V_b)}{dt} \right] + (1-x)L_b \frac{d}{dt} \left[(1-x) \frac{C}{2} \frac{d(V_L - V_b)}{dt} \right] \quad (4.43)$$

ou:

$$V_x = V_b + (1-x)^2 \frac{R_b C}{2} \frac{d(V_L - V_b)}{dt} + (1-x)^2 \frac{L_b C}{2} \frac{d^2(V_L - V_b)}{dt^2}. \quad (4.44)$$

Igualando as expressões obtidas para V_x a partir das Equações (4.39) e (4.49) obtém-se a expressão que permite determinar o ponto de falha x :

$$\begin{aligned} xR_b I_b - x^2 \frac{R_b C}{2} \frac{dV_s}{dt} + xL_b \frac{dI_b}{dt} - x^2 \frac{L_b C}{2} \frac{d^2 V_s}{dt^2} \\ - V_b - (1-x)^2 \frac{R_b C}{2} \frac{d(V_L - V_b)}{dt} - (1-x)^2 \frac{L_b C}{2} \frac{d^2(V_L - V_b)}{dt^2} = 0. \end{aligned} \quad (4.45)$$

De forma similar ao condutor principal, a Equação (4.45) corresponde a um polinômio de segundo grau, cujos coeficientes dependem das componentes da tensão fase-terra da fonte V_s , da tensão fase-terra na carga V_L , da tensão fase-terra na blindagem V_b e da corrente na blindagem I_b (CARMO; SILVA; MAIA, 2025a).

4.4 Sistemas Trifásicos Aterrados por Resistência

O diagrama do circuito trifásico utilizado como referência é mostrado na Figura 4.7. Nele estão representados os pontos de medição adotados tanto nos condutores principais quanto nas blindagens metálicas, a partir dos quais foram extraídos os parâmetros empregados nas análises. Esse arranjo permite registrar as grandezas necessárias para a comparação entre o comportamento das fases e das blindagens, bem como para a aplicação da metodologia proposta ao longo do estudo.

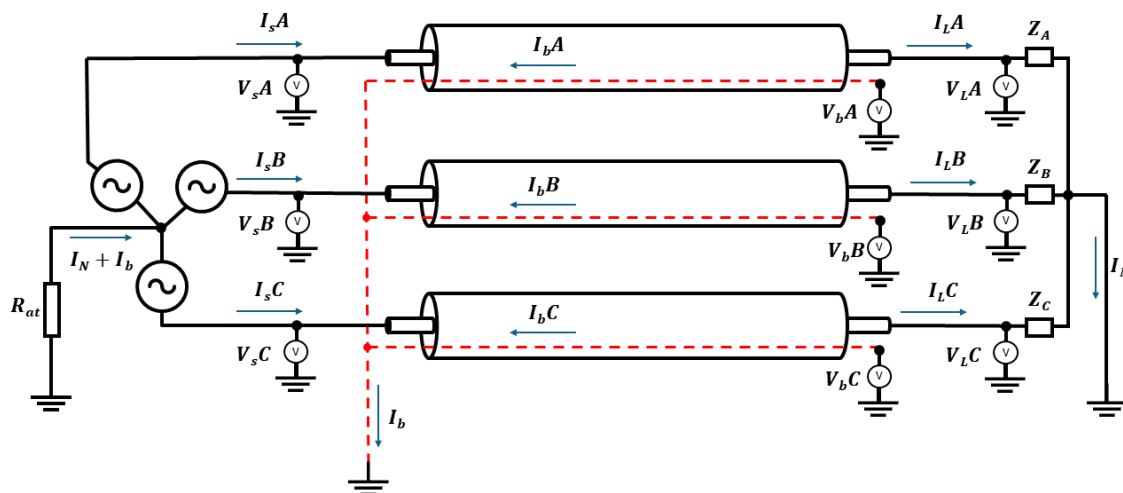


Figura 4.7 – Diagrama elétrico do circuito trifásico implementado nas análises realizadas.

As tensões fase-terra da fonte, identificadas por V_{sA} , V_{sB} e V_{sC} , fornecem as correntes I_{sA} , I_{sB} e I_{sC} às cargas nas fases A, B e C respectivamente. Já as correntes na carga são representadas por I_{LA} , I_{LB} e I_{LC} nas impedâncias de carga Z_A , Z_B e Z_C . As tensões fase-terra no lado da carga estão representadas pelas medições V_{bA} , V_{bB} e V_{bC} .

Cada fase do condutor e da blindagem metálica está equipada com medidores de corrente e de tensão fase-terra, permitindo o monitoramento das grandezas elétricas nos pontos indicados no circuito. Os medidores de corrente na blindagem metálica medem as componentes (I_{bA} , I_{bB} e I_{bC}). No lado da carga, os medidores (I_{LA} , I_{LB} e I_{LC}) medem a corrente que chega ao sistema de consumo. Os voltímetros (V_{bA} , V_{bB} e V_{bC}) estão conectados entre a blindagem metálica e terra (do lado não aterrado), permitindo a medição da tensão das blindagens em relação à terra.

Em sistemas elétricos com neutro aterrado por resistência, o valor dessa resistência deve ser considerado, pois em caso de falha fase-terra, as tensões fase-terra das fases não afetadas podem se elevar conforme a impedância do caminho de aterramento. Em sistemas equilibrados, as tensões e correntes possuem a mesma magnitude e estão defasadas de 120° , resultando em corrente nula no neutro (ou seja $I_N = 0$ A), enquanto sistemas desequilibrados exibem diferenças entre as fases, podendo gerar corrente no neutro.

Conforme ilustrado na figura, a corrente resultante no neutro da fonte é composta pela soma das correntes circulantes nas blindagens metálicas e pela corrente do neutro na carga. Considerando a corrente do neutro igual a zero, a corrente medida no neutro durante uma falha corresponde à componente de sequência zero gerada na blindagem metálica.

Nessas condições, as equações para a localização da falha podem ser expressas

conforme descrito a seguir. Para um sistema aterrando por resistência, tem-se:

$$I_n = I_{b0} + I_{L0} = \frac{(I_{bA} + I_{bB} + I_{bC})}{3} + \frac{(I_{LA} + I_{LB} + I_{LC})}{3}. \quad (4.46)$$

A tensão resultante na fonte do sistema de potência será:

$$V_N = R_{at} \times \frac{(I_{b0} + I_{L0})}{3} \quad (4.47)$$

A equação para o cálculo da posição de falha, considerando a contribuição do ponto neutro, é dada por:

$$V_x - V_N = V_b + (1-x)^2 \frac{R_b C}{2} \frac{d(V_L - V_b)}{dt} + (1-x)^2 \frac{L_b C}{2} \frac{d^2(V_L - V_b)}{dt^2}. \quad (4.48)$$

Ou:

$$V_x = R_{at} \times \frac{I_L + I_b}{3} + V_b + (1-x)^2 \frac{R_b C}{2} \frac{d(V_L - V_b)}{dt} + (1-x)^2 \frac{L_b C}{2} \frac{d^2(V_L - V_b)}{dt^2}. \quad (4.49)$$

Para o condutor principal, aplica-se o mesmo procedimento, sendo que a tensão no ponto de falha é expressa por:

$$\begin{aligned} V_s - xRI_s + x^2 \frac{RC}{2} \frac{dV_s}{dt} - xL \frac{dI_s}{dt} + x^2 \frac{LC}{2} \frac{d^2V_s}{dt^2} \\ - V_L - (1-x)RI_L - (1-x)^2 \frac{RC}{2} \frac{dV_L}{dt} \\ - (1-x)L \frac{dI_L}{dt} - (1-x)^2 \frac{LC}{2} \frac{d^2V_L}{dt^2} + R_{at} \times \frac{(I_{b0} + I_{L0})}{3} = 0. \end{aligned} \quad (4.50)$$

Em sistemas solidamente aterrados, a resistência de aterramento é considerada desprezível, o que permite eliminar esse termo da equação correspondente.

4.5 Comparativo entre Aplicações do Método de Impedância

Ao aplicar o método baseado em impedância de dois terminais na blindagem metálica, elimina-se a necessidade de medições de corrente no condutor principal para a estimativa da localização da falha. Embora ainda sejam requeridas as medições de tensão em ambas as extremidades do cabo, a inclusão das grandezas de tensão e corrente na blindagem no algoritmo possibilita eliminar as medições de corrente no condutor, promovendo o desacoplamento entre esses parâmetros na solução da equação.

As medições necessárias para o condutor principal e para aplicação do método utilizando a blindagem metálica são apresentadas no esquema da Figura 4.8. A inserção de um ponto de medição de tensão e de corrente na blindagem permitiu eliminar a necessidade de medir dois pontos de corrente no condutor principal (a corrente da fonte e a corrente da carga).

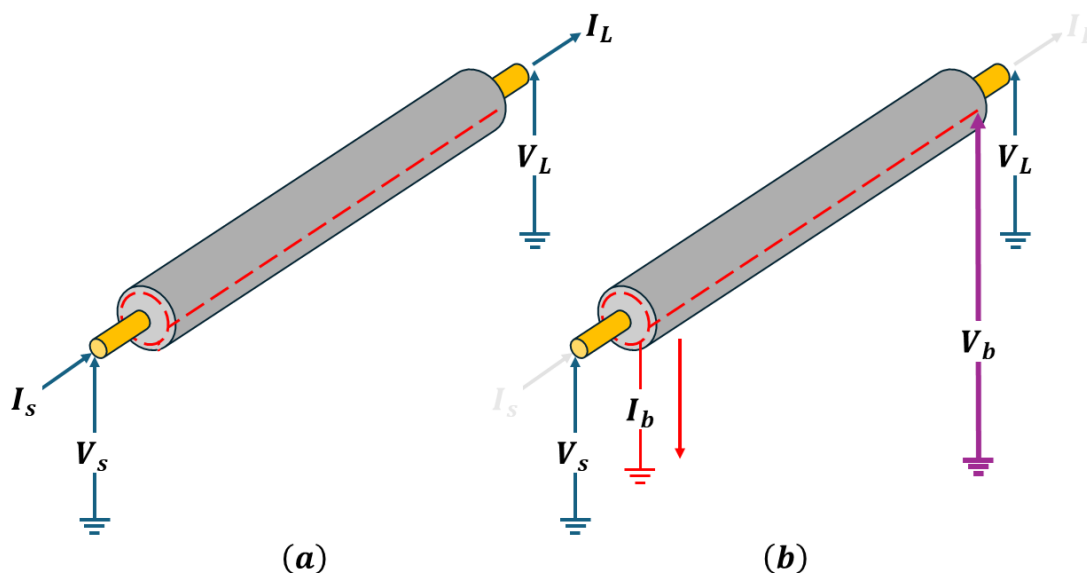


Figura 4.8 – Comparativo entre as variáveis necessárias para cálculo do ponto de falha pelo método da impedância considerando: (a) condutor principal e (b) blindagem metálica.

A análise comparativa dos coeficientes das equações desenvolvidas para ambos os métodos revela que a abordagem baseada na blindagem metálica demanda um menor número de termos para a implementação do algoritmo. Enquanto no método baseado no condutor principal requer o tratamento de 15 termos, a abordagem aplicada à blindagem metálica envolve 11 termos.

As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam, respectivamente, os coeficientes das equações aplicadas ao condutor principal e à blindagem metálica do cabo.

As equações referentes ao condutor principal e à blindagem metálica envolvem termos dependentes das tensões V_s , V_L . As correntes da fonte I_s e da carga I_L estão presentes nos termos associados ao condutor principal, mas não figuram no equacionamento da blindagem. Por outro lado, as grandezas tensão fase-terra V_b e corrente I_b na blindagem aparecem exclusivamente no equacionamento desenvolvido para a própria blindagem.

Tabela 4.2 – Termos dos coeficientes da equação do método da impedância no condutor principal.

| Ax^2 | Bx | C |
|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|
| $+\frac{RC}{2} \frac{dV_s}{dt}$ | $-RI_s$ | $+V_s$ |
| $+\frac{LC}{2} \frac{d^2V_s}{dt^2}$ | $-L \frac{dI_s}{dt}$ | $-V_L$ |
| $+\frac{RC}{2} \frac{dV_L}{dt}$ | $+RI_L$ | $-RI_L$ |
| $+\frac{LC}{2} \frac{d^2V_L}{dt^2}$ | $+L \frac{dI_L}{dt}$ | $-\frac{RC}{2} \frac{dV_L}{dt}$ |
| $-$ | $+RC \frac{dV_L}{dt}$ | $-L \frac{dI_L}{dt}$ |
| $-$ | $+LC \frac{d^2V_L}{dt^2}$ | $R_{at} \times \frac{I_{b0}+I_{L0}}{3}$ |

Tabela 4.3 – Termos dos coeficientes da equação do método da impedância na blindagem metálica.

| Ax^2 | Bx | C |
|------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|
| $-R_b \frac{C}{2} \frac{dV_s}{dt}$ | $+R_b I_b$ | $-V_b$ |
| $-L_b \frac{C}{2} \frac{d^2V_s}{dt^2}$ | $+L_b \frac{dI_b}{dt}$ | $+R_b \frac{C}{2} \frac{d(V_L - V_b)}{dt}$ |
| $+R_b \frac{C}{2} \frac{d(V_L - V_b)}{dt}$ | $-R_b C \frac{d(V_L - V_b)}{dt}$ | $+L_b \frac{C}{2} \frac{d^2(V_L - V_b)}{dt^2}$ |
| $+L_b \frac{C}{2} \frac{d^2(V_L - V_b)}{dt^2}$ | $-L_b C \frac{d^2(V_L - V_b)}{dt^2}$ | $R_{at} \times \frac{I_{b0}+I_{L0}}{3}$ |

4.6 Simulações de Falhas Incipientes e Algoritmos de Cálculo

4.6.1 Implementação do Modelo em Simulação Computacional

A implementação computacional do modelo proposto teve como finalidade aplicar as formulações desenvolvidas para o cálculo de estimativa da posição de falhas em cabos isolados. Para isso, utilizou-se o ambiente de simulação *Matlab/Simulink* para a inserção de falhas incipientes em pontos previamente definidos, possibilitando a coleta de sinais elétricos tanto no condutor principal quanto na blindagem metálica.

Essas medições são realizadas em um sistema configurado como *single-bonded*, em que a linha tracejada em vermelho representa a blindagem metálica dos cabos, aterrada na extremidade da fonte e isolada na extremidade da carga.

O circuito de distribuição com cabos isolados analisado neste estudo consiste em um alimentador industrial trifásico de média tensão (13,8 kV), com comprimento total $L = 1.000$ metros. O alimentador utiliza um cabo unipolar por fase, com condutores de seção transversal de 240 mm^2 e isolamento em *EPR (Ethylene Propylene Rubber)*.

4.6.2 Procedimentos das Simulações e Análises dos Resultados

As falhas incipientes fase-terra entre o condutor principal e a blindagem metálica foram simuladas em 10 pontos distintos no comprimento total L do cabo isolado. As falhas foram configuradas para acontecerem no pico do semiciclo positivo da onda de tensão com uma duração de 4,2 ms (1/4 de ciclo). Essa característica é de uma falha incipiente de menor duração relatada na literatura estudada.

O esquema de um cabo sob falha no ponto x representando a posição da falha em relação à fonte é mostrado na Figura 4.9. A corrente de falha I_F percorre o condutor principal até o ponto de falha e retorna para a fonte pela da blindagem metálica.

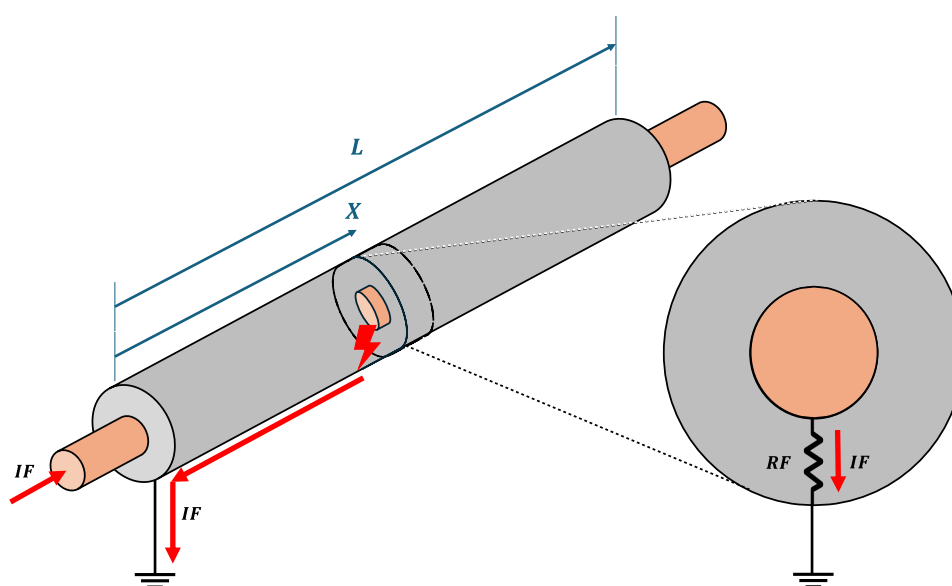


Figura 4.9 – Caminho percorrido das falhas incipientes entre condutor principal e blindagem metálica no ponto de defeito x e cabo de comprimento total L .

Dada a ausência de consenso na literatura sobre os valores típicos de resistência de falha, este trabalho adota uma faixa de análise entre 1 m Ω e 1 M Ω . A Tabela 4.4 apresenta alguns dos valores utilizados em estudos anteriores, que serviram como referência para a definição dos casos simulados.

Tabela 4.4 – Valores de referência para resistências de falha citadas nas literaturas correspondentes.

| Autores | Resistência [Ω] |
|---------------------------|--------------------------|
| (LOWCZOWSKI et al., 2020) | 0 a 10 |
| (CHEN; CHE; ZHANG, 2021) | 10 a 20 |
| (PENG et al., 2022) | 12 a 200 |
| (KHOA et al., 2022) | 0 a 20 |
| (LI et al., 2023) | 100 |
| (BAAYEH; KLEEMANN, 2023) | 1 a 10 |

Os resultados apresentados por meio da solução equação são raízes de valores adimensionais. Esses valores podem ser convertidos para percentuais em relação ao comprimento total do circuito. Essa conversão facilita a interpretação prática dos resultados, permitindo a visualização direta da estimativa da posição da falha, conforme previsto no guia ([Institute of Electrical and Electronics Engineers \(IEEE\), 2014b](#)).

Para verificar o impacto do valor da resistência de falha nos métodos analisados, foram realizadas simulações variando-se a resistência de falha e considerando uma posição fixa da falha em 100 metros de distância da fonte. Os resultados apresentados na Tabela 4.5 foram obtidos a partir da aplicação da equação de cálculo da posição da falha incipiente, considerando tanto os sinais medidos no condutor de potência quanto aqueles adquiridos na blindagem metálica. Essa abordagem possibilita a comparação do desempenho e da precisão do método em relação às distintas formas de monitoramento elétrico aplicadas ao cabo isolado.

Tabela 4.5 – Resultados dos cálculos da posição da falha para diferentes valores de resistência de defeito, simulados com a falha posicionada a 100 metros da fonte, correspondente a 10% do comprimento total do cabo.

| Resistência [Ω] | x Condutor [%] | Erro [%] | x Blindagem [%] | Erro [%] |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|
| 1×10^{-6} | 10,9 | 0,9 | 10,8 | 0,8 |
| 1×10^{-3} | 10,9 | 0,9 | 10,8 | 0,8 |
| 1×10^0 | 10,9 | 0,9 | 10,8 | 0,8 |
| 1×10^1 | 10,5 | 0,5 | 10,4 | 0,4 |
| 1×10^2 | 10,5 | 0,5 | 10,4 | 0,4 |
| 1×10^3 | 10,4 | 0,4 | 10,4 | 0,4 |
| 1×10^5 | 10,4 | 0,4 | 10,4 | 0,4 |
| 1×10^5 | 10,4 | 0,4 | 10,4 | 0,4 |
| 1×10^6 | 10,4 | 0,4 | 10,4 | 0,4 |
| 1×10^7 | 10,4 | 0,4 | 10,4 | 0,4 |

O percentual de erro apresentado corresponde ao valor relativo ao comprimento total do cabo, sendo determinado utilizando a seguinte equação:

$$Erro[\%] = \frac{|x_{\text{real}} - x_{\text{calculado}}|}{L} \times 100. \quad (4.51)$$

Na Equação (4.51), o termo x_{real} representa a distância efetiva da fonte até o ponto de falha; $x_{\text{calculado}}$, a distância estimada pelo algoritmo; e L , o comprimento total da linha.

Os resultados obtidos indicam que, para ambos os métodos analisados, a variação da resistência de falha não impacta de forma significativa a estimativa da posição da falha,

em conformidade com o observado na literatura (QU et al., 2022). Embora os resultados obtidos pelas duas abordagens sejam semelhantes, observa-se que as estimativas derivadas das medições na blindagem metálica apresentam, de forma sistemática, erro igual ou inferior àquele observado no método baseado no condutor principal.

Fixando a resistência de falha em $100\ \Omega$, realizaram-se simulações com falhas inseridas a cada 100 metros do cabo, conforme ilustrado na Figura 4.10. O procedimento visou avaliar a capacidade do modelo em estimar a posição da falha em distintas localizações ao longo do cabo.

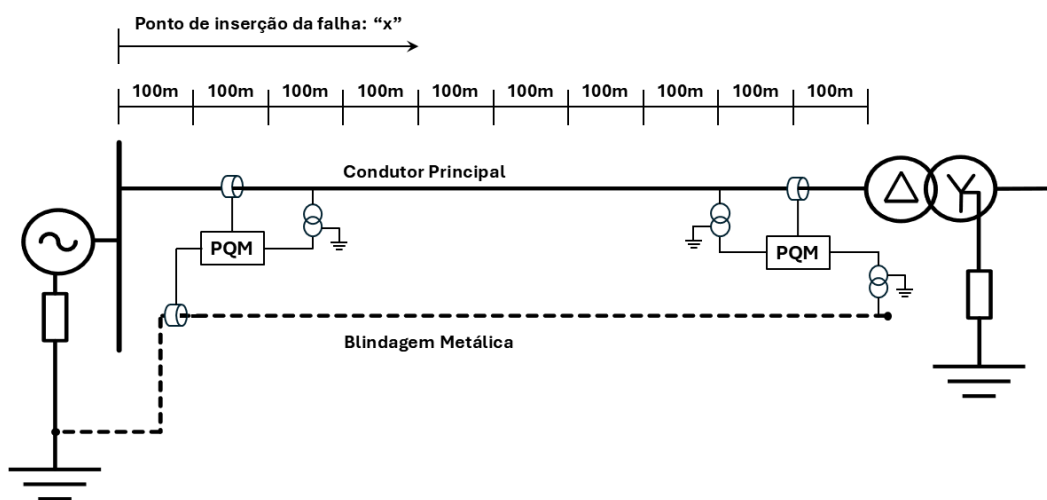


Figura 4.10 – Diagrama unifilar do estudo de caso, indicando as posições pré-determinadas das falhas e os pontos de medição de tensão e corrente considerados em cada extremidade do cabo.

A Figura 4.11 apresenta o gráfico comparativo dos erros obtidos para o método da impedância de dois terminais, considerando as medições no condutor principal e na blindagem metálica. As simulações foram realizadas para os pontos previamente definidos, e os resultados estimados pelo algoritmo foram aplicados na fórmula de cálculo do erro percentual em relação ao comprimento total da linha, conforme estabelecido no guia (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2014b).

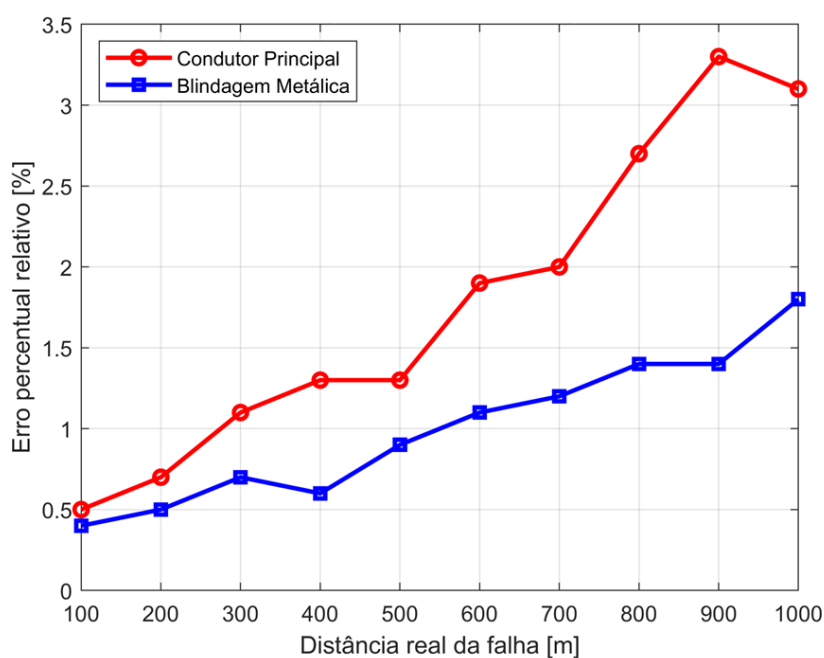


Figura 4.11 – Gráfico comparativo entre os erros relativos calculados para método da impedância no condutor principal e na blindagem metálica.

O gráfico compara o erro percentual na localização de falhas no cabo, com base em medições no condutor principal e na blindagem metálica. Observa-se que o erro aumenta proporcionalmente à distância da falha em relação à fonte, sendo mais acentuado no método baseado no condutor principal, cujo erro ultrapassa 3,00% próximo ao comprimento máximo da linha. Já a abordagem com sinais da blindagem mostrou erros abaixo de 2,00%. Os erros médios foram de 1,79% para o condutor e 1,00% para a blindagem, indicando uma redução de 55,86% no erro percentual ao se utilizar a metodologia aplicada à blindagem metálica.

Conforme observado na Figura 4.12, as variações nas formas de onda de tensão e corrente do condutor principal durante o intervalo de ocorrência da falha são sutis, o que evidencia a limitada sensibilidade dos sistemas de proteção convencionais diante desse tipo de distúrbio (KULKARNI; SANTOSO; SHORT, 2014).

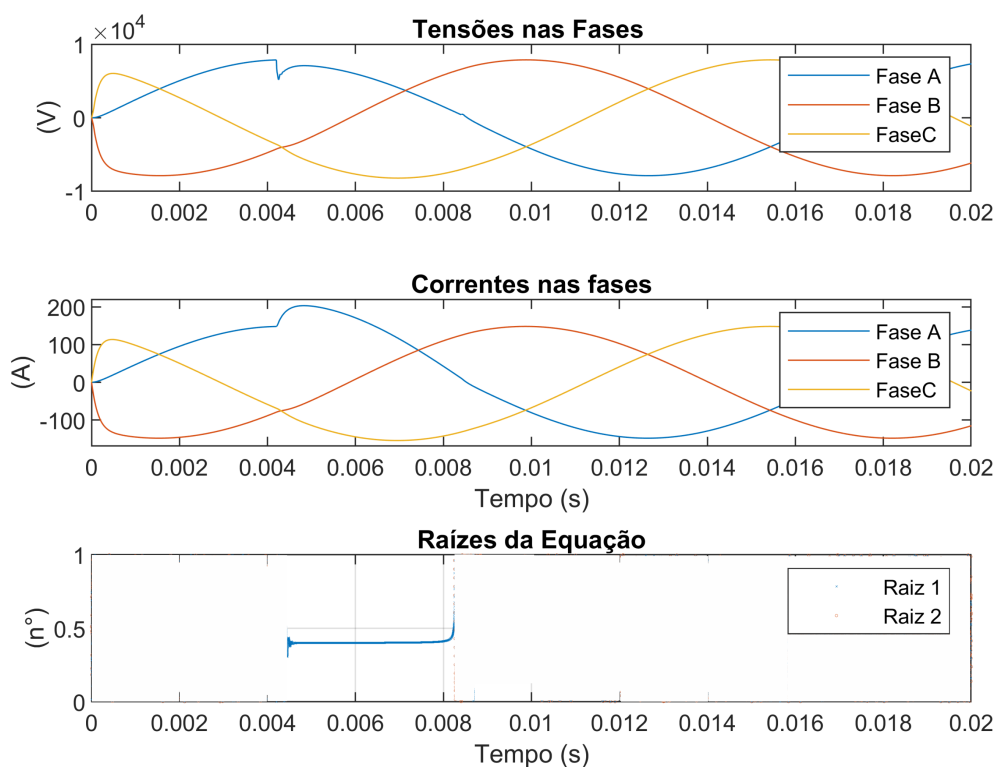


Figura 4.12 – Gráficos das formas de onda de tensão e corrente nas fases e dos resultados das raízes calculadas na ocorrência de uma falha incipiente no instante de tempo 4,2 ms e posição igual a 40% do comprimento do circuito (ou 400 metros).

Embora as falhas incipientes provoquem apenas pequenas variações nas formas de onda de tensão e corrente, os sinais elétricos da blindagem metálica exibem alterações perceptíveis, evidenciando sua sensibilidade à ocorrência desses eventos. Essa característica pode ser verificada na Figura 4.13.

Métodos matemáticos podem ser aplicados para detectar tais instantes, garantindo que os resultados obtidos correspondam efetivamente aos eventos reais observados no sistema (WANG et al., 2021; QU et al., 2022). A partir da detecção de derivadas de sequência zero diferentes de zero nas grandezas monitoradas, pode-se incorporar à lógica do algoritmo uma condição que identifique a presença de falha no circuito. Com isso, torna-se viável realizar a análise das raízes da equação apenas durante o intervalo efetivo da falha, conforme ilustrado na Figura 4.14

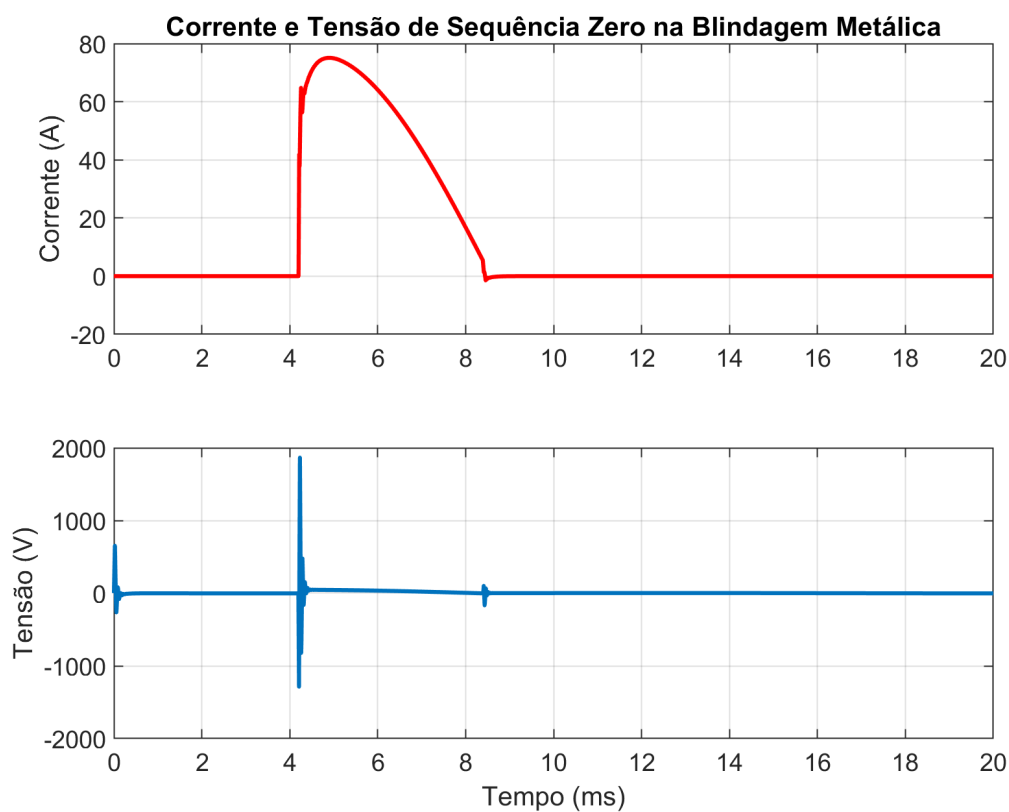


Figura 4.13 – Alterações na corrente e tensão de sequência zero na blindagem metálica.

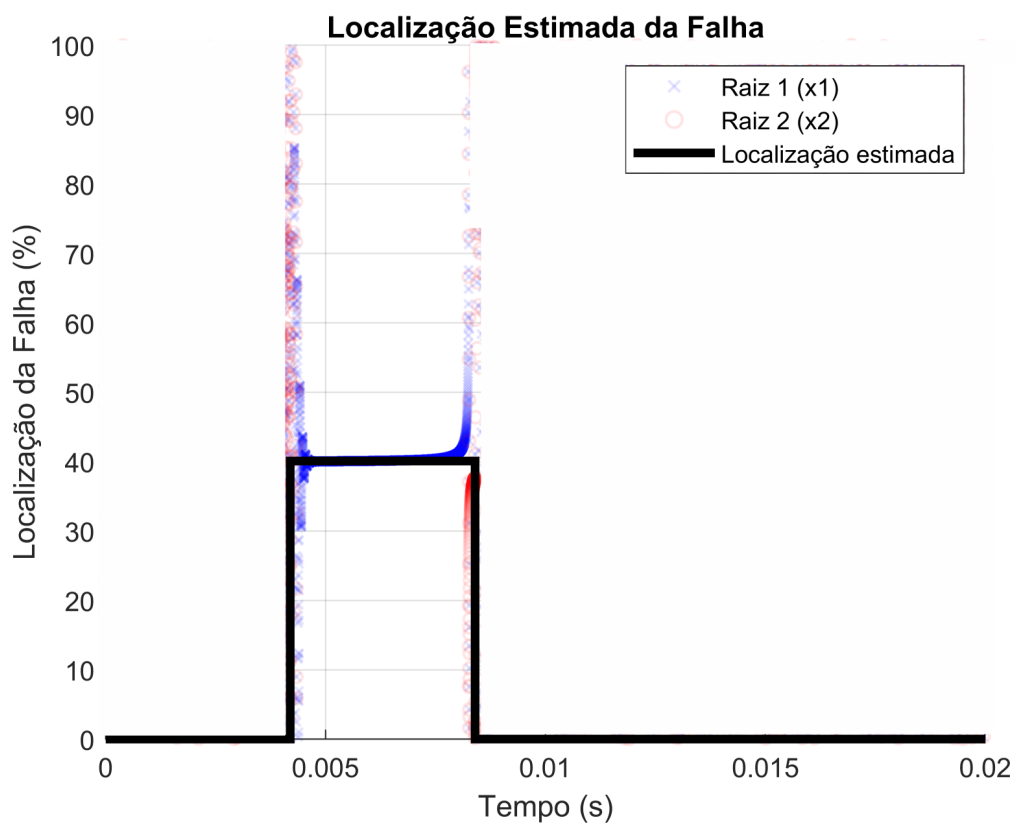


Figura 4.14 – Gráfico de resultados dos cálculos das raízes pelo algoritmo antes, durante e após uma falha incipiente no intervalo de 4,2 ms a 8,4 ms.

A interpretação dos dados pode ser realizada a partir das variações observadas nas componentes de sequência zero, conforme ilustrado na Figura 4.15 para sistemas equilibrados. No entanto, o modo operacional do sistema deve ser identificado, de modo a considerar possíveis desequilíbrios presentes nas condições normais de operação e evitar erros de cálculos (CARMO; SILVA; MAIA, 2025a).

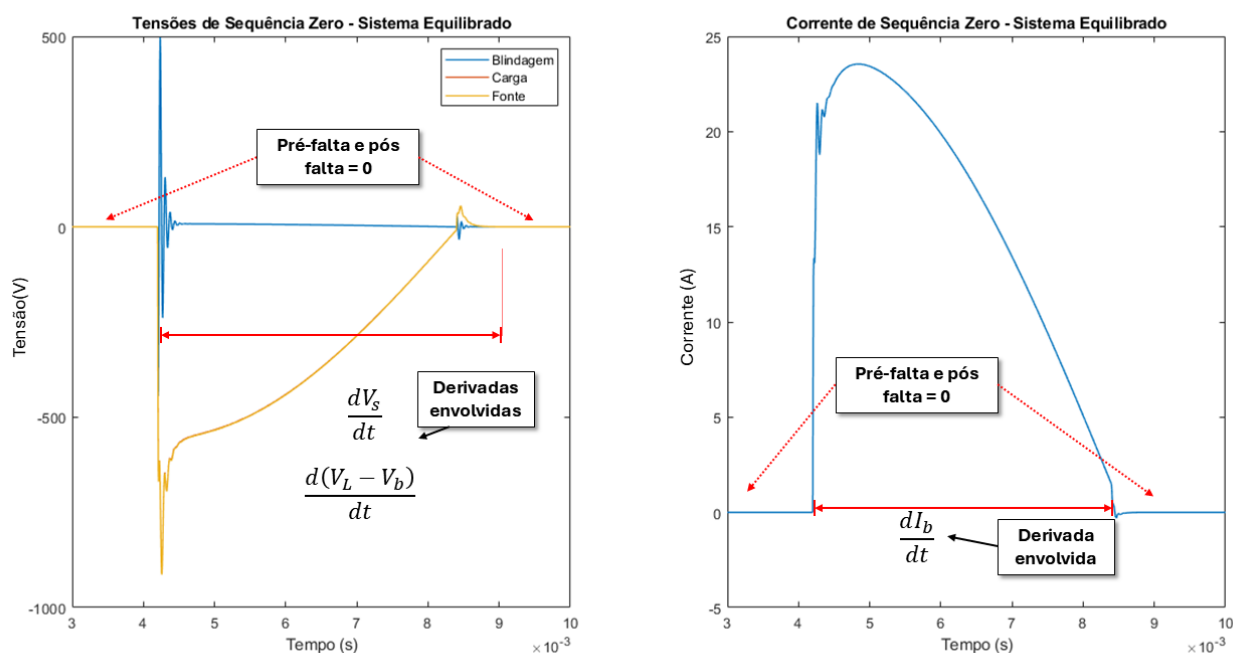


Figura 4.15 – Gráficos de tensões e correntes de sequência zero durante a presença de falha incipiente.

Em sistemas desequilibrados, o algoritmo de localização deve considerar o desequilíbrio existente para mitigar a ocorrência de falsos positivos, os quais podem comprometer a confiabilidade da estimativa de localização de falhas. A resposta do algoritmo em um cenário de sistema desequilibrado é apresentado na Figura 4.16.

O guia do IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2014b) para determinação do ponto de falha em linhas de transmissão e distribuição detalha diferentes métodos a serem aplicados para limitar os erros nos resultados devido ao impacto da resistência da falha e a característica da corrente de carga nos condutores principais, especialmente nos métodos baseados em medições em uma única extremidade do sistema. Dentre eles se destacam os métodos de Takagi (TAKAGI et al., 2007) e Novosel (NOVOSEL et al., 1995). O método baseado em medições em duas extremidades reduz os erros envolvidos nas estimativas, apresentando resultados mais precisos quando comparado ao método de uma extremidade.

Com o objetivo de avaliar o impacto dos diferentes tipos de carga, a Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos para a estimativa do ponto de falha, utilizando o método

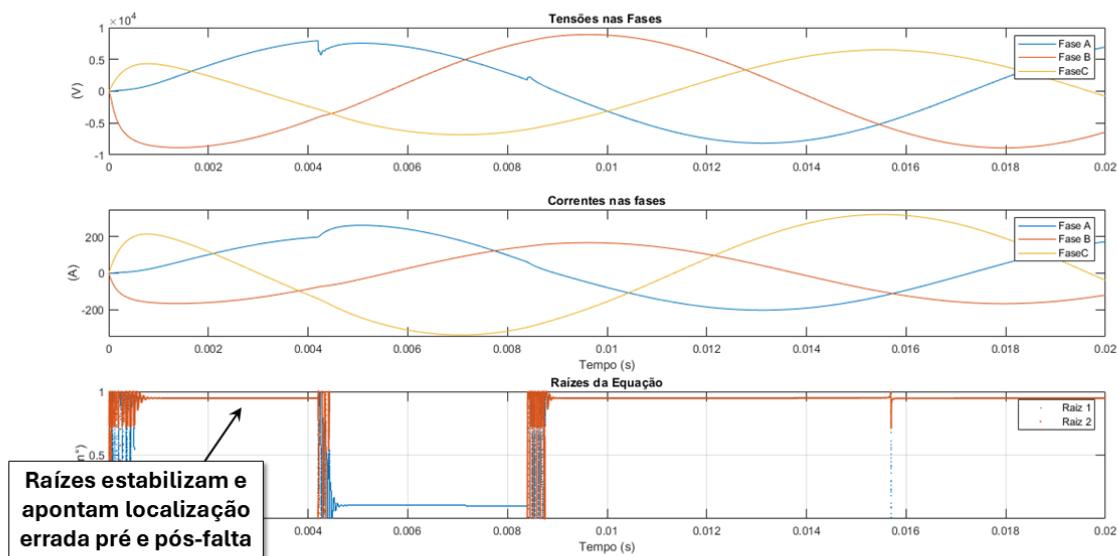


Figura 4.16 – Resposta das raízes indicando falso positivo antes da ocorrência da falha, considerando sistemas desequilibrados.

das impedâncias aplicado tanto ao condutor principal quanto à blindagem metálica. A análise considera uma falha incipiente localizada a 100 metros da fonte, abrangendo diversos cenários de carga com configurações resistivas, indutivas e capacitivas, bem como associações em série e em paralelo.

Tabela 4.6 – Resultados calculados para a localização da falha considerando diferentes tipos de carga conectadas, com a falha posicionada a 100 metros da fonte (ou 10% do comprimento total do circuito).

| Carga | Condutor [%] | Erro [%] | Blindagem [%] | Erro [%] |
|--------------|--------------|----------|---------------|----------|
| R | 10,5 | 0,1 | 10,4 | 0,2 |
| L | 3,8 | 6,2 | 10,4 | 0,4 |
| C | 62,2 | 52,2 | 14,5 | 4,5 |
| RL série | 10,2 | 0,2 | 10,2 | 0,2 |
| RC série | 10,3 | 0,3 | 10,2 | 0,2 |
| LC série | 4,9 | 5,1 | 10,7 | 0,7 |
| RLC série | 10,3 | 0,3 | 10,2 | 0,2 |
| RL paralelo | 4,3 | 5,7 | 10,3 | 0,3 |
| RC paralelo | 10,6 | 0,6 | 10,3 | 0,3 |
| LC paralelo | 1,2 | 8,8 | 14,6 | 4,6 |
| RLC paralelo | 2,4 | 7,6 | 10,5 | 0,5 |

De modo geral, observa-se que o método aplicado à blindagem metálica apresenta

melhor desempenho em termos de precisão, com erros percentuais inferiores a 0,5% na maioria dos casos. Dos 11 casos simulados, 8 apresentaram erro igual ou inferior a 0,5%, com exceção dos casos de cargas capacitiva e LC em paralelo.

O método aplicado ao condutor principal demonstrou sensibilidade à natureza da carga conectada. Nos casos de cargas reativas, como as configurações indutiva (L) e capacitiva (C), os erros observados atingiram até 6,2% e 52,2%, respectivamente.

Apesar de as equações de localização não contemplarem os termos associados às correntes da fonte e da carga, observa-se que essas grandezas exercem influência indireta por meio dos acoplamentos eletromagnéticos presentes no sistema, os quais são representados pelas impedâncias mútuas. Tais acoplamentos influenciam diretamente a resposta do sistema, mesmo sem que as equações de localização incluam explicitamente os termos relacionados às correntes da fonte e da carga. Dessa forma, ressalta-se a importância de uma caracterização aprofundada das impedâncias mútuas, seja por meio de modelagem teórica, medições ou validação experimental, a fim de mitigar distorções nos resultados e garantir maior confiabilidade na estimativa do ponto de falha.

Por fim, destaca-se que a metodologia proposta possui potencial de aplicação em distintas configurações construtivas de cabos isolados. Em especial, sua aplicação pode ser estendida a cabos multipolares, caracterizados por uma única blindagem metálica que envolve todos os condutores, conforme ilustrado na Figura 4.17. Em sistemas trifásicos, é comum a utilização de cabos tripolares (três fases) ou tetrapolares (três fases mais o neutro), sendo a escolha da configuração determinada pelas exigências do projeto e pelas características da aplicação.

Nesse contexto, a premissa para a aplicação da metodologia é a existência de uma blindagem metálica. No entanto, em configurações multipolares com blindagem única envolvendo os três condutores, embora o método permaneça capaz de estimar a posição da falha no cabo, não é possível identificar qual fase apresenta o defeito. Isso ocorre porque os sinais medidos na blindagem refletem uma resposta elétrica combinada dos três condutores, o que dificulta a individualização da fase onde a falha incipiente ocorreu. A identificação da fase em falha em um cabo tripolar não representa uma limitação prática, uma vez que, independentemente da fase afetada, torna-se necessária a intervenção no cabo no mesmo ponto. Isso ocorre porque não é possível realizar o reparo isolado de apenas uma fase nesse tipo de cabo.

Nessa configuração, espera-se que o comportamento observado seja equivalente ao analisado nesta tese, uma vez que cada condutor mantém seu caminho individual de retorno à terra. Entretanto, para assegurar a confiabilidade do sistema e evitar alarmes indevidos, recomenda-se o emprego de indicadores complementares. Um exemplo é a análise da sobretensão fase-terra, em sistemas aterrados por resistência, a qual pode atuar como critério adicional de validação da presença de uma falha real.

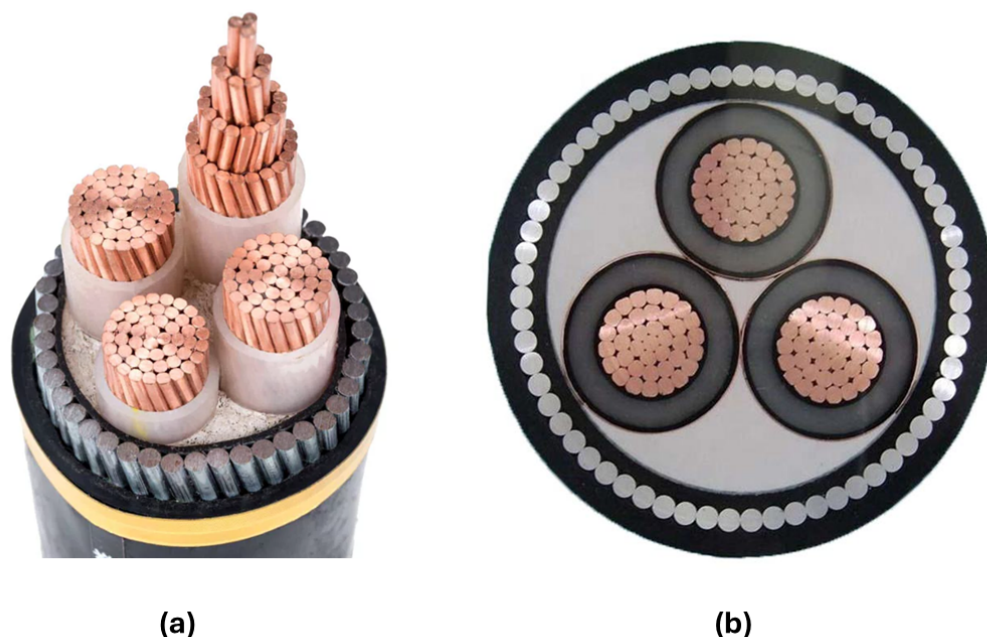


Figura 4.17 – Imagens de cabos tripolares sendo: (a) sem blindagem metálica e (b) com blindagem metálica.

4.7 Metodologia para Cálculo da Posição de Falhas

O fluxograma do passo a passo destacando as principais etapas do processo para cálculo da posição das falhas incipientes está representado pelo diagrama da Figura 4.18.

As entradas de dados estão denominadas pelas letras (A) e (B). (A) corresponde a entrada de dados técnicos dos parâmetros do circuito elétrico no modelo matemático do sistema. (B) são os dados provenientes da aquisição de dados de monitoramento contínuo (*online*) das variáveis de tensões no condutor principal e correntes e tensões na blindagem metálica dos cabos isolados em operação.

O fluxo inicia-se na etapa (0), com a modelagem do sistema elétrico a partir dos seguintes parâmetros: impedâncias do condutor principal e da blindagem [Ω/m]; comprimento do circuito [m]; tensão na blindagem V_b em regime permanente; corrente na blindagem I_b em regime permanente e a capacitância C do cabo. As etapas sequenciais enumeradas em cada passo do processo são descritas a seguir:

1. Realiza-se o monitoramento contínuo das variáveis elétricas: tensão e corrente na blindagem, bem como das tensões fase-terra dos condutores principais.
2. Com os valores monitorados na etapa (1), é realizada a comparação instantânea com os valores esperados de tensão e corrente na blindagem e tensões fase-terra nessa etapa de decisão (2).

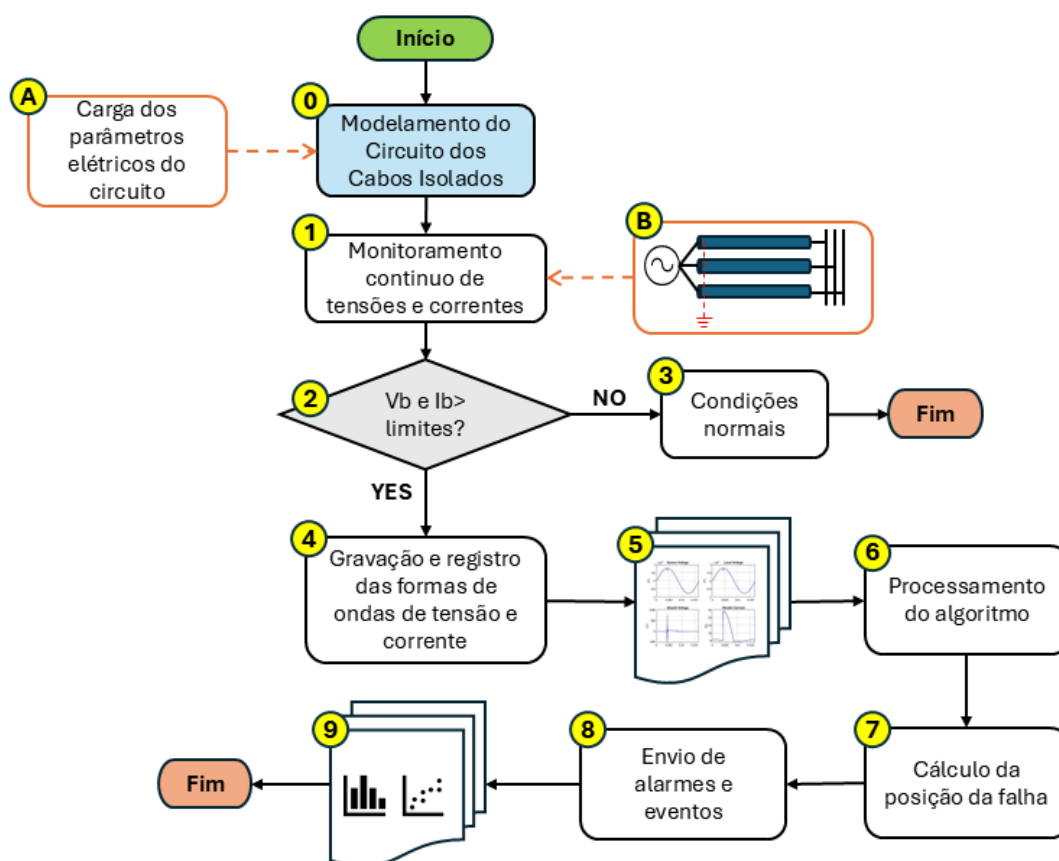


Figura 4.18 – Fluxograma do passo a passo para realização dos cálculos das raízes e resultados da posição da falha estimada.

3. Nessa etapa, os valores dos resultados da etapa anterior são comparados com os limites operacionais pré-determinados como valores esperados em condições normais de operação (regime permanente) determinados no modelagem do circuito etapa (0). Caso os valores permaneçam dentro dos limites inferiores esperados para tensão e corrente na blindagem metálica, o fluxo confirma a operação normal do sistema e encerra a análise, sinalizando a condição de operação padrão.
4. Caso os valores dos parâmetros elétricos da blindagem metálica monitorados estejam acima dos valores de operação normal em regime permanente, realiza-se a coleta e o registro das formas de onda das tensões fase-terra nos condutores, bem como da tensão e corrente na blindagem.
5. Os registros da etapa anterior são armazenados com uma taxa de amostragem de 256 kbps por ciclo ou a uma frequência aproximada de 15 kHz, armazenados em formato de oscilografia e registrados em banco de dados.
6. A partir dos registros da etapa (5), as equações são processadas na etapa (6), aplicando o método de impedâncias na blindagem para determinar a posição do

ponto da falha a partir da referência da fonte.

7. O valor resultante do cálculo da posição da falha é realizado pela resolução das equações.
8. O valor é convertido em valores percentuais ou em metros e transmitido para o sistema supervisor, por meio de um alarme e/ou sinalização, indicando a estimativa da posição da falha a partir do referencial da fonte de alimentação.
9. Por fim, registra-se o histórico de eventos e os resultados de localização para a geração de gráficos de tendência e estatísticas com os valores dos posicionamentos calculados e o número de eventos emitidos.

Ressalta-se que, embora os dados utilizados sejam adquiridos online, o processamento ocorre em tempo real, imediatamente após a ocorrência da falha. Isso se deve à curta duração do fenômeno, geralmente inferior a um quarto de ciclo, e ao tempo requerido para a aquisição, o registro e a análise das informações.

4.8 Análise de Sensibilidade do Modelo

Com o intuito de avaliar a sensibilidade e a robustez do método proposto foi realizada uma simulação estatística utilizando o método de Monte Carlo.

O método de Monte Carlo é uma técnica de simulação baseada em amostragens aleatórias que permite estimar o comportamento de sistemas sujeitos a incertezas, por meio da geração de múltiplos cenários e da avaliação estatística dos resultados correspondentes. Considerando N simulações, a estimativa da média de uma função $f(x)$ é dada por:

$$\mathbb{E}[f(x)] \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i) \quad (4.52)$$

Em que x_i representa o conjunto de parâmetros simulados aleatoriamente na i -ésima iteração.

A estimativa da posição da falha na i -ésima simulação, denotada por $\hat{x}_{f,i}$, pode ser comparada ao valor real x_f^{real} por meio do erro absoluto 4.53 e do erro percentual 4.54:

$$\text{Erro}_i = \hat{x}_{f,i} - x_f^{\text{real}} \quad (4.53)$$

$$\text{Erro percentual}_i = \left(\frac{\hat{x}_{f,i} - x_f^{\text{real}}}{x_f^{\text{real}}} \right) \times 100 \quad (4.54)$$

Após a realização das simulações, calculam-se a média e o desvio padrão dos erros obtidos:

$$\mu_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{Erro}_i \quad ; \quad \sigma_e = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\text{Erro}_i - \mu_e)^2} \quad (4.55)$$

A influência de uma variável de entrada x_j sobre o erro é avaliada por meio do coeficiente de correlação de Pearson:

$$\rho_{x_j,e} = \frac{\text{cov}(x_j, \text{Erro})}{\sigma_{x_j} \sigma_e} \quad (4.56)$$

Para o modelo de cálculo de posição de falhas proposto, verificou-se como erros de medição, ruídos, variações na impedância de falha e nos parâmetros elétricos do cabo impactam a precisão da estimativa da posição da falha.

Foram consideradas variações estatísticas nos seguintes parâmetros: resistência de falha (Rf), resistência e indutância do condutor, resistência da blindagem, e capacitância do cabo. Cada parâmetro foi modelado como uma variável aleatória com distribuição normal em torno de seu valor nominal, com desvio padrão estimado de acordo com tolerâncias técnicas usuais, totalizando 1.000 simulações.

Tabela 4.7 – Resumo estatístico da simulação Monte Carlo para uma amostragem com 1000 execuções.

| Métrica | Valor |
|------------------------|--------------|
| Erro médio absoluto | 0,02 m |
| Erro percentual médio | 0,0058% |
| Desvio padrão do erro | 1,61 m |
| Erro percentual máximo | +1,48% |
| Erro percentual mínimo | -1,78% |

Os resultados indicam que o método proposto mantém o erro percentual inferior a $\pm 2\%$, mesmo diante de variações realistas nos parâmetros elétricos do sistema. A baixa média de erro, associada ao desvio padrão de 1,61 metros, apresenta que o comportamento da metodologia diante das incertezas inerentes aos sistemas reais de distribuição isolados.

Portanto, os resultados da simulação Monte Carlo reforçam a confiabilidade do método proposto para localização de falhas incipientes, mesmo em cenários com parâmetros incertos e sujeitos a dispersão técnica.

4.9 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a metodologia desenvolvida para o cálculo da posição de falhas incipientes em cabos isolados, com base na aplicação do método da impedância de dois terminais na blindagem metálica. Detalharam-se os modelos adotados, o cálculo dos parâmetros elétricos, o desenvolvimento das equações e os critérios estabelecidos para a condução das análises. A abordagem proposta foi implementada de forma a possibilitar a avaliação do desempenho da metodologia em diferentes condições de falha, constituindo a base para os estudos experimentais e as simulações que serão discutidos no capítulo subsequente.

5 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Esta etapa do trabalho destina-se à investigação experimental dos modelos desenvolvidos na fase anterior. Este capítulo tem como objetivo apresentar a base de dados dos ensaios de falhas incipientes realizados na amostra de um cabo no laboratório. A partir desses resultados, desenvolveu-se o modelo de réplica do experimento e elaboraram-se discussões que aprofundam a compreensão do fenômeno estudado, contribuindo para o aprimoramento da metodologia proposta.

5.1 Circuito Elétrico para Simular Falhas Incipientes

A representação do circuito de uma isolação degradada em um cabo isolado pode ser realizada com base em modelos equivalentes relacionados à arborescência ou arcs elétricos (LIMA, 2008). O modelo de falha utilizado foi implementado por meio de um circuito elétrico composto por diodos em antiparalelo, associados a uma resistência de falha, conforme ilustrado na Figura 5.1 (QU et al., 2022). Nessa configuração, os diodos conduzem corrente apenas durante os intervalos em que a polarização direta é estabelecida, bloqueando a condução nos demais períodos do ciclo.

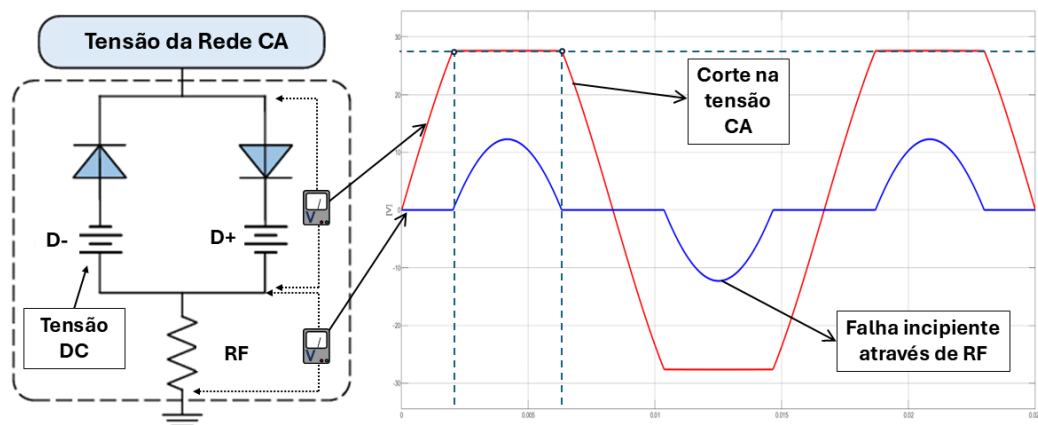


Figura 5.1 – Representação do circuito elétrico de modelagem do arco elétrico ou arborescência e as formas de onda associadas.

Os diodos em antiparalelo simulam a dinâmica das falhas incipientes ao longo dos semiciclos positivos e negativos da forma de onda da tensão alternada. Quando a tensão alternada atinge um valor próximo ao pico, o nível de tensão contínua (D_+ ou D_-) atua

no circuito, promovendo a inserção de potencial sobre a resistência de falha R_F , o que simula o estabelecimento da corrente de falha.

Esse modelo característico de falha pode ser associado a pontos específicos da isolamento do cabo. Durante a ocorrência de uma falha incipiente entre o condutor principal e a blindagem metálica, o sistema pode ser representado por um modelo equivalente, conforme ilustrado na Figura 5.2.

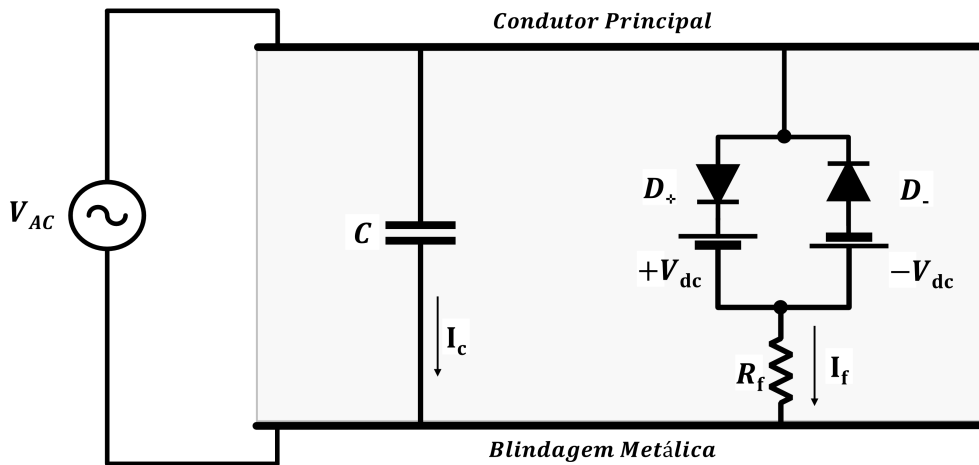


Figura 5.2 – Representação do circuito utilizado para simulação de falhas incipientes, destacando o arranjo com diodos em antiparalelo.

Por definição, um capacitor é constituído por duas terminações condutoras separadas por um material isolante (dielétrico). Assim, a capacitância C não representa o isolamento em si, mas expressa a capacidade do sistema de armazenar energia elétrica no campo formado entre os condutores, sendo responsável pela corrente capacitiva I_c . A falha é simulada por um circuito composto por dois diodos (D_+ e D_-), uma fonte de tensão contínua ($\pm V_{dc}$) e uma resistência R_f , que representa o caminho da corrente I_f . Quando a tensão alternada V_{AC} aplicada ao sistema excede os limiares definidos pelos diodos e pela fonte, ocorre a condução, simulando o fluxo de corrente por uma trilha semicondutiva formada na isolação degradada.

5.2 Bancada de Ensaio

A estrutura elaborada para a validação experimental da metodologia proposta nesta tese é apresentada na Figura 5.3. O diagrama ilustra a configuração da montagem, com destaque para o ponto de inserção da falha incipiente e os pontos de medição empregados na aquisição dos sinais elétricos.

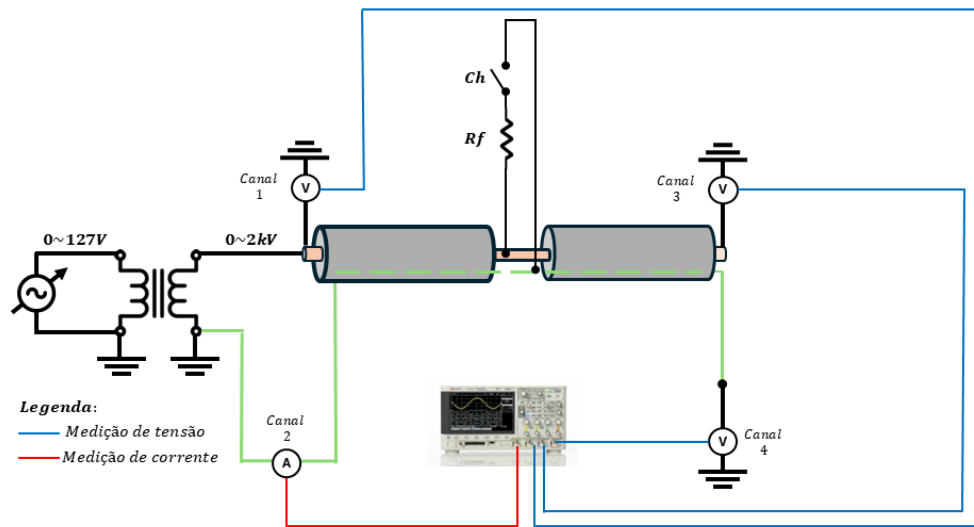


Figura 5.3 – Representação do arranjo utilizado para o experimento de falha incipiente com a inserção da resistência de falha R_F .

A figura apresenta o diagrama do circuito experimental utilizado para a realização dos ensaios de falhas incipientes em cabos isolados. O sistema de alimentação fornece tensão de até 127 V alternada no primário, aplicada ao condutor principal, enquanto a blindagem metálica permanece aterrada em uma das extremidades. A resistência de falha R_F é inserida entre o condutor e a blindagem para simular diferentes condições de falha.

A instrumentação de medição inclui um osciloscópio digital configurado para monitorar: canal (1) a tensão da fonte no condutor principal; canal (3) a tensão do lado receptor (ou carga) no condutor principal; canal (2) a corrente na blindagem metálica e canal (4) a tensão do lado não aterrado da blindagem.

Os equipamentos de medição utilizados no experimento consistem em: um osciloscópio Keysight InfiniiVision série 2000X, com largura de banda de 100MHz, quatro canais analógicos, memória de 100kpts e taxa de atualização de até 200.000 formas de onda por segundo; sondas diferenciais de alta tensão Tektronix P5200A, com largura de banda de DC a 50MHz, razão de atenuação de 500:1 e tensão máxima de pico de 1300V; e um sensor de corrente tipo pinça baseado em efeito Hall, modelo Hantek CC-65, com resposta AC/DC até 20kHz, faixa de medição de 20mA a 65 A em corrente contínua.

A amostra analisada corresponde a um cabo blindado do tipo FTP, com comprimento de 7,4 metros, constituído por quatro pares de condutores $24 AWG$, dos quais apenas um foi utilizado nos ensaios. A blindagem metálica é formada por um condutor de cobre nu, recoberto por uma fita metálica e protegida por uma capa externa de PVC.

A resistência elétrica, obtida por meio de medições realizadas com uma ponte de teste, foi de $5,8 \Omega$ para os condutores principais e de $1,22 \Omega$ para a blindagem metálica. Já a capacitância considerada para o cabo, conforme especificado para o produto, foi de $55,8 \text{ pF/m}$. A indutância, por sua vez, foi desconsiderada nesta análise em função do reduzido comprimento do cabo e da baixa frequência dos sinais de interesse, condições nas quais sua contribuição ao comportamento observado é desprezível quando comparada aos efeitos resistivos e capacitivos.

A inserção da falha incipiente foi realizada em trechos pré-definidos e conhecidos do cabo por meio da chave *Ch*, conforme os valores apresentados na Tabela 5.1 (distâncias em relação à fonte).

Tabela 5.1 – Posições de falhas pré-determinadas e seus correspondentes percentuais do comprimento total do cabo.

| Comprimento [m] | Distância [%] |
|------------------------|----------------------|
| 7,40 | 100,00% |
| 5,33 | 72,03% |
| 3,84 | 51,89% |
| 1,44 | 19,46% |

O objetivo desta etapa foi coletar dados em diferentes posições ao longo do cabo, registrando os valores de tensão e corrente necessários para aplicação nas equações da metodologia proposta. Os dados obtidos a partir das medições serviram como referência para a construção de um modelo computacional no ambiente *MATLAB/Simulink*. A reprodução das condições reais observadas nos ensaios experimentais permitiu a realização de uma análise comparativa entre os resultados medidos e os simulados. A Figura 5.4 apresenta essa comparação, destacando os sinais adquiridos experimentalmente e os correspondentes obtidos por meio das simulações.

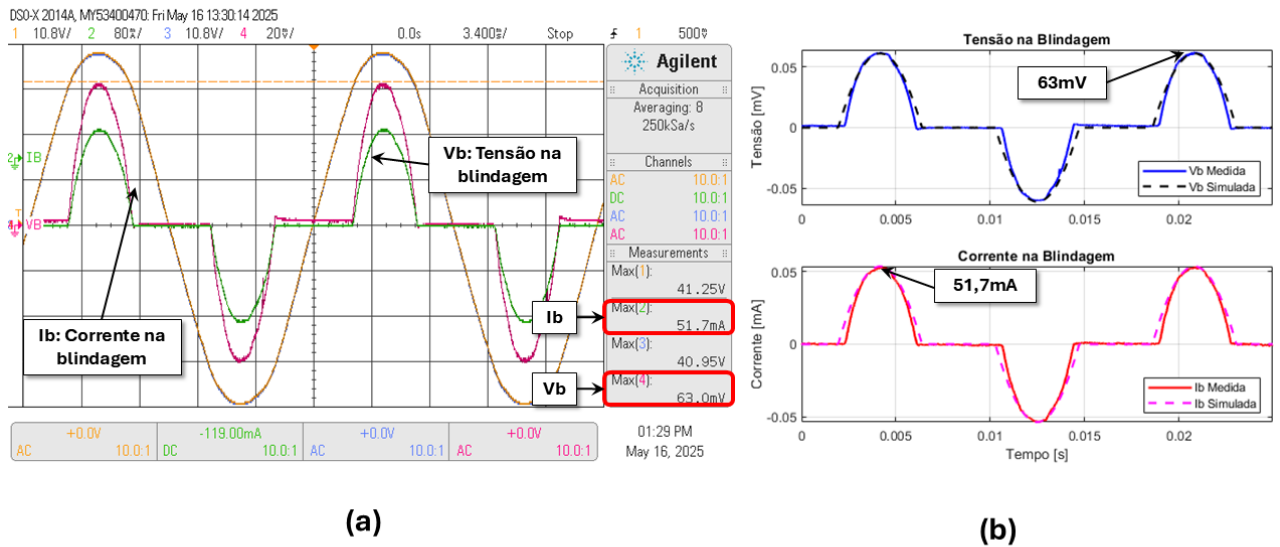


Figura 5.4 – Análise comparativa entre os sinais de corrente e tensão na blindagem metálica: (a) valores obtidos experimentalmente; (b) comparação entre os sinais medidos e os resultados das simulações.

As formas de onda das tensões medidas nos terminais da fonte e da carga apresentaram valores de 41,25 V e 40,95 V, respectivamente, evidenciando a queda de tensão ao longo da impedância da amostra de cabo. As grandezas elétricas na blindagem metálica registraram tensão de 63 mV e corrente de 51,7 mA. O ponto de medição corresponde à extremidade final do cabo, equivalente a 100% do seu comprimento total.

Durante os experimentos, verificou-se que o valor máximo da queda de tensão está localizada na extremidade oposta à fonte (100% do comprimento do cabo), situação em que toda a extensão da blindagem é percorrida pela corrente de falha, resultando na maior diferença de potencial medida entre os terminais. Como o valor da resistência de falha é fixa e a tensão do condutor principal constante, a corrente de falha no circuito depende da impedância proporcional ao ponto de falha no condutor principal e na blindagem metálica.

Com base nas informações medidas e na validação da réplica do modelo computacional, foram realizadas simulações considerando a inserção da falha nos mesmos pontos mapeados na Tabela 5.1. Com base nesses dados, calcularam-se as raízes da equação de segundo grau por meio do método de impedâncias aplicado à blindagem metálica, com o objetivo de determinar a posição da falha.

Como o princípio do método baseia-se no cálculo dinâmico das raízes de uma equação quadrática, aplicou-se uma abordagem destinada a apresentar os resultados de forma objetiva. As raízes dessa equação existem quando há variação nos sinais elétricos da blindagem metálica no tempo. Isso significa que as tensões e correntes envolvidas, como as

da fonte, carga, blindagem e corrente na blindagem, devem apresentar variações detectáveis ao longo do tempo, ou seja, derivadas diferentes de zero.

Quando essas variações ocorrem, os coeficientes da equação assumem valores que ao serem processados retorna o cálculo de raízes, que são interpretadas como estimativas do ponto de falha no cabo. Por outro lado, se os sinais permanecem constantes (sem variações), as raízes não apresentam valores correspondentes a localização das falhas. O diagrama que mostra o passo a passo para avaliação é apresentado na Figura 5.5. O processo apresentado se inicia com o objetivo de monitorar e calcular a posição de falhas ao longo do cabo isolado.

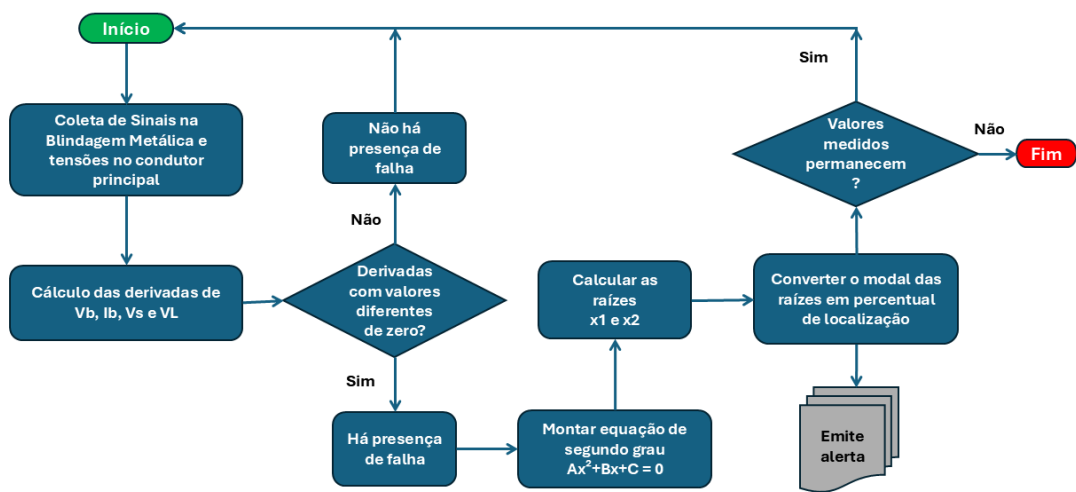


Figura 5.5 – Fluxograma para verificação do instante de alteração das raízes das equações no período de início e duração da falha.

A primeira etapa consiste na coleta dos sinais de corrente e tensão na blindagem metálica, bem como das tensões no condutor principal. As grandezas monitoradas incluem: corrente na blindagem metálica (I_b), tensão na blindagem metálica (V_b), tensão de alimentação (V_s) e tensão na carga (V_L). As medições podem ser realizadas em tempo real ou a partir de registros armazenados.

Em seguida, realiza-se o cálculo das derivadas temporais dessas grandezas. Este procedimento permite identificar variações abruptas que possam indicar a presença de uma condição anômala, como uma falha incipiente.

Com base nos valores das derivadas, monta-se uma equação de segundo grau na forma $Ax^2 + Bx + C = 0$, que representa o modelo matemático para o cálculo da posição da falha. A solução dessa equação resulta nas raízes x_1 e x_2 , que indicam as possíveis posições da falha ao longo do cabo, expressas inicialmente de forma adimensional.

Em seguida, verifica-se se as derivadas calculadas apresentam valores distintos de zero. Caso não haja variação, conclui-se pela ausência de falha, e o processo retorna à etapa inicial de monitoramento. Se houver variação, considera-se a presença de uma falha incipiente e prossegue-se com a análise.

As raízes obtidas são então convertidas em percentuais do comprimento total do cabo, indicando a posição estimada da falha. Em seguida, o sistema verifica a persistência dos valores medidos, evitando falsas detecções. Caso os indícios permaneçam consistentes por um intervalo de tempo definido, um alerta de falha incipiente é emitido; do contrário, o processo é finalizado sem sinalização.

A aplicação desta metodologia resultou em valores de raízes que indicam a posição calculada da falha, com as respostas apresentadas nos gráficos da Figura 5.6. Os gráficos demonstram que, nos períodos em que há tensão e corrente presentes na blindagem, é possível calcular as raízes da equação proposta. Nessas regiões, o algoritmo converte as raízes em percentuais relativos ao comprimento do cabo, apresentando valores estáveis em torno de 70%. Fora desses instantes, o valor retorna a zero. Os pontos dispersos representam as raízes calculadas (X_1 e X_2), sendo visível que apenas durante os eventos válidos essas raízes se alinham ao patamar de posição da falha apontando para o local estimado.

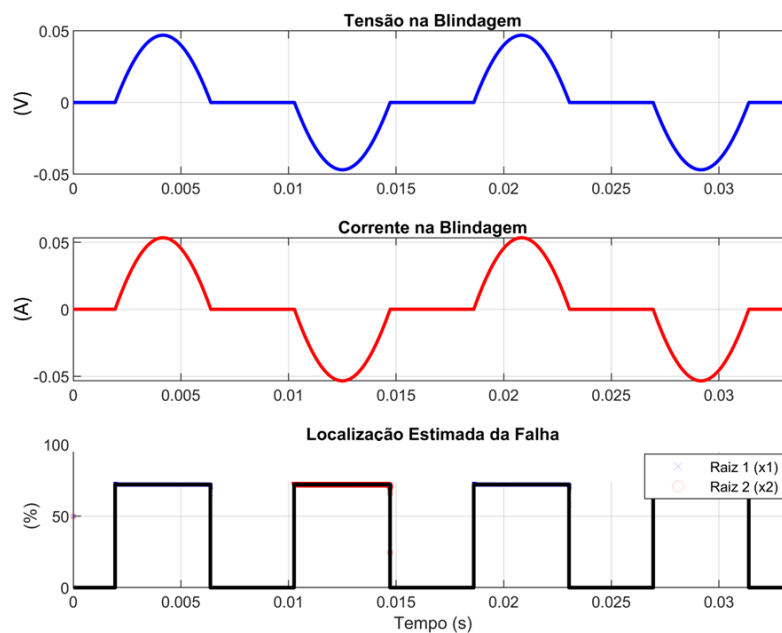


Figura 5.6 – Exemplo de resultado de localização das falha incipientes do experimento considerando distância de 70%.

Nota-se que, quando o sistema está ativo, as raízes se estabilizam em faixas que coincidem com os pontos de posição da falha amostrados, indicando consistência entre os sinais obtidos em campo e as estimativas do modelo matemático utilizado. Esse comportamento evidencia que a metodologia é capaz de acompanhar as variações do circuito e identificar a posição da falha ao longo do trecho monitorado.

Nos intervalos em que a blindagem não apresenta fluxo de corrente ou diferença de potencial em relação à terra, o algoritmo não gera estimativas, uma vez que não há informações suficientes para o cálculo. Essa condição é esperada, pois a metodologia depende diretamente da presença de sinais mensuráveis nas blindagens para realizar o cálculo da posição estimada.

A Figura 5.7 apresenta os demais pontos amostrados durante o experimento, assim como os resultados obtidos para as raízes do algoritmo de localização. A comparação gráfica entre os valores estimados e os pontos de falha previamente definidos permite verificar a correspondência entre a resposta teórica e a resposta experimental. Essa análise fornece subsídios para avaliar a robustez do método em diferentes condições de operação e reforça a importância da coleta simultânea das grandezas elétricas nas blindagens metálicas para a validação do processo de localização de falhas.

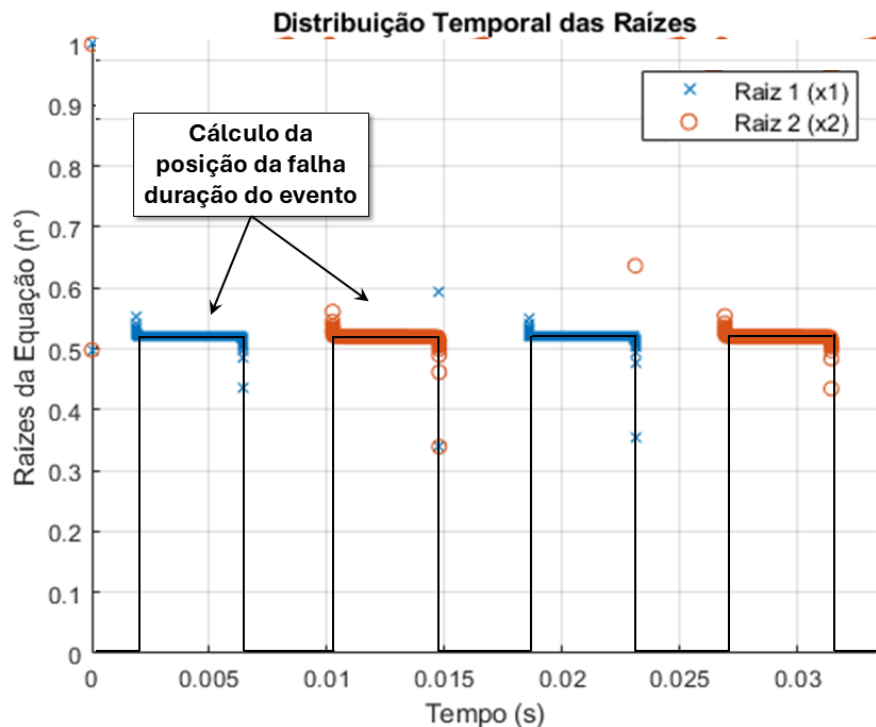


Figura 5.7 – Gráficos de resultados dos cálculos de estimativa de posição das falhas incipientes em todos os pontos coletados do experimento.

Assim, foram realizadas simulações para os quatro pontos de falhas incipientes amostrados no experimento. Foram comparadas as distâncias reais e as calculadas para esses pontos e os resultados são mostrados na Tabela 5.2.

Observa-se que, para todos os pontos de falha avaliados, a metodologia proposta apresentou resultados na estimativa da posição da falha próximos à posição real com erros relativos abaixo de 0,3%. A consistência dos resultados foi mantida em diferentes regiões do cabo, abrangendo tanto os trechos mais próximos quanto os mais distantes da fonte.

Tabela 5.2 – Comparativo entre distâncias reais e calculadas para diferentes pontos de falha, assim como os erros percentuais relativos.

| Real [m] | Percentual [%] | Calculado [m] | Percentual [%] | Erro Relativo [%] |
|----------|----------------|---------------|----------------|-------------------|
| 7,40 | 100,00 | 7,41 | 100,14 | 0,14 |
| 5,33 | 72,03 | 5,34 | 72,16 | 0,14 |
| 3,84 | 51,89 | 3,86 | 52,16 | 0,27 |
| 1,44 | 19,46 | 1,42 | 19,19 | 0,27 |

Adicionalmente, os valores de erro indicam que o modelo computacional implementado no ambiente *MATLAB/Simulink* é capaz de reproduzir as condições reais observadas durante os ensaios.

A aplicação do método aos dados obtidos nos ensaios experimentais resultou em estimativas de posição de falha bastante próximas das distâncias reais. A metodologia demonstrou resultados consistentes mesmo com variações na distância da falha em relação à fonte. Tal comportamento evidencia que a proporcionalidade entre os parâmetros elétricos do condutor principal e da blindagem metálica viabiliza a determinação da posição da falha, independentemente do valor da resistência de falha. Tal fato se deve à configuração do sistema, em que toda a corrente de falha a terra flui preferencialmente pela blindagem metálica.

5.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia proposta em ambientes simulados e experimentais. Foram realizadas coletas de dados em diferentes posições de falha, avaliando a aplicação do cálculo da posição com base nos parâmetros e sinais da blindagem metálica. Os resultados demonstraram a coerência da abordagem proposta, evidenciando a possibilidade de aplicação do método para cálculo da estimativa da posição da falha. As análises aqui conduzidas servem de base para as discussões e considerações finais apresentadas no próximo capítulo.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE

Este trabalho apresentou uma metodologia para o cálculo da posição de falhas incipientes em cabos isolados, utilizando o método de impedância de dois terminais aplicado à blindagem metálica de forma *online*. A abordagem proposta permitiu o desacoplamento da corrente do condutor principal na resolução das equações, eliminando a necessidade de medições de corrente nas fases. Além disso, os resultados obtidos indicaram uma redução média de 55,86% no erro de localização em comparação com a aplicação do método diretamente no condutor principal.

Durante o estudo, realizou-se o levantamento do estado da arte sobre cabos isolados, abrangendo a análise das tecnologias disponíveis e a avaliação das estruturas existentes. Em seguida, foi realizada uma revisão dos fenômenos associados à degradação do meio isolante, bem como das técnicas de diagnóstico utilizadas para a avaliação das condições da isolação. Esse embasamento teórico orientou o início do desenvolvimento da metodologia proposta nesta pesquisa, assegurando a adequação da abordagem adotada às características construtivas dos cabos e às particularidades dos mecanismos de falha observados.

Na etapa seguinte, foi realizada uma revisão da literatura com foco na identificação dos principais conceitos, técnicas e modelos utilizados para a localização de falhas. Esse levantamento permitiu evidenciar lacunas de pesquisa, como a ausência de medições reais na blindagem metálica e a predominância de metodologias dependentes de dados obtidos no condutor principal. Essas constatações direcionaram o foco da pesquisa, motivando o desenvolvimento de uma abordagem alternativa baseada na análise de sinais disponíveis na blindagem metálica.

Por fim, a proposta de desenvolver uma metodologia para o cálculo da posição de falhas em cabos isolados *online* foi concretizada por meio da análise e correlação entre os parâmetros elétricos e os sinais medidos na blindagem metálica. A metodologia foi estruturada com base no desenvolvimento de equações do método de impedância de dois terminais, adaptadas para a estimativa da posição de falhas incipientes a partir das grandezas elétricas disponíveis na blindagem. A validação da abordagem ocorreu por meio da comparação entre os resultados obtidos em simulações e as observações experimentais, evidenciando o potencial da solução proposta.

A aplicação da metodologia proposta resultou em uma abordagem que representa um avanço no campo da localização de falhas incipientes em cabos elétricos isolados por meio de técnicas *online*. Conclui-se, portanto, que o objetivo geral e os objetivos específicos estabelecidos nesta tese foram plenamente alcançados.

6.1 Propostas de Continuidade

A utilização da blindagem metálica como elemento alternativo para localização de falhas de forma *online* representa uma inovação metodológica, que permite investigações mais aprofundadas sobre estes fenômenos contribuindo para o avanço do estado da arte em técnicas não intrusivas de monitoramento e cálculo de posição de falha.

A técnica aqui apresentada pode servir como base para o desenvolvimento de novas ferramentas de monitoramento contínuo, adaptadas a diferentes topologias de rede e condições operacionais, promovendo tanto inovação tecnológica quanto benefícios à gestão de ativos elétricos.

Como propostas para a continuidade dessa pesquisa, propõem-se:

- Especificar sensores, placas eletrônicas e dispositivos de comunicação para confeccionar solução tecnológica para processamento dos sinais e realização do cálculo da localização do ponto de falhas incipientes. Dispositivos devem ser adequados para filtragem de interferências externas ou ruídos.
- Projetar e montar *hardware* para coleta das medições de correntes e tensões nos condutores principais e na blindagem metálica;
- Desenvolver *software* para configuração dos dados, processamento das medições dos parâmetros elétricos e interface gráfica;
- Implantar solução em circuito existente em aplicação real (campo);
- Aperfeiçoar modelo por meio da análise dos dados coletados pela ferramenta em campo e aplicação específica;
- Elaborar projeto e montagem do *hardware* eletrônico em bancada de testes para circuito trifásico;
- Aplicar o algoritmo para localização de falhas incipientes em cabos multipolares;
- Aplicar algoritmo para localização de falhas incipientes em cabos *solid-bonded*;
- Aplicar algoritmo para localização de falhas incipientes em cabos *cross-bonded*;
- Aplicar algoritmo em cabos *single-bonded* que possuam SVL (*Sheath Voltage Limiter*);
- Ampliar a aplicação do algoritmo para falhas em emendas e terminações (falhas de descontinuidade);
- Aplicar registro e análise de tendências dos parâmetros iniciais medidos para um circuito de distribuição com modelo de aprendizagem;

-
- Avaliar impactos no modelo de localização com parâmetros de variação de temperatura e harmônicos;
 - Avaliar impactos no modelo de localização em aplicações com variações elevadas de tensão no tempo com partidas e ciclos de máquinas elétricas, além de aplicações com inversores de frequência.

REFERÊNCIAS

- AFOTEY, S.; ALIADEH, S. M. Investigation into the impact of cable failure localisation methods on the underground cable life time in a medium voltage distribution network. In: IEEE. *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. [S.l.], 2020. p. 898–903.
- AIZENBERG, I. et al. Failure prevention and malfunction localization in underground medium voltage cables. *Energies*, MDPI, v. 14, n. 1, p. 85, 2020.
- AL-ONAZI, Y. et al. Insulation performance analysis of field aged and new mv xlpe cables using various diagnostic techniques. In: EDP SCIENCES. *E3S Web of Conferences*. [S.l.], 2021. v. 294, p. 02008.
- ARGAUT, P. Underground cables. *Springer Handbook of Power Systems*, Springer, p. 759–866, 2021.
- ARUNJOTHI, R.; THIRUMURTHY; MEENA, K. Sheath overvoltage on 220 kv xlpe cable under fault conditions. In: IET. *IET Conference Proceedings CP787*. [S.l.], 2021. v. 2021, n. 15, p. 320–325.
- ASIF, R. M. et al. Smart underground wireless cable fault detection and monitoring system. In: IEEE. *2020 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*. [S.l.], 2020. p. 1–5.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR 7286:2022 – Cabos de potência com isolamento extrudada de borracha etilenopropileno (EPR, HEPR ou EPR 105) para tensões de 1 kV a 35 kV: Requisitos de desempenho*. 2022. Rio de Janeiro: ABNT. Norma Brasileira.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *NBR 7287: Cabos de potência com isolamento extrudada de polietileno termofixo para tensões de 3 kV a 35 kV – Requisitos*. Rio de Janeiro, Brasil, 2003. Norma Brasileira.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV*. Rio de Janeiro, Brasil, 2005. Norma Brasileira.
- BAAYEH, A. G.; KLEEMANN, M. Fault location method for medium voltage cables using measured sheaths current in the presence of renewable energy resources. IET, 2023.
- BAHAROZU, E.; ILHAN, S.; SOYKAN, G. High impedance fault localization: A comprehensive review. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 214, p. 108892, 2023.
- BINDI, M. et al. A comprehensive review of fault diagnosis and prognosis techniques in high voltage and medium voltage electrical power lines. *Energies*, MDPI, v. 16, n. 21, p. 7317, 2023.
- BLACK, R. M. *The history of electric wires and cables*. [S.l.]: IET, 1983.
- BRETAS, A. S. et al. Incipient fault location method for distribution networks with underground shielded cables: A system identification approach. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Wiley Online Library, v. 27, n. 12, p. e2465, 2017.

- BROOKE, R. Distribution diary. *IEEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews)*, IET, v. 132, n. 8, p. 533–542, 1985.
- BUGAJSKA, A.; DESANIUK, T. Impedance-based short circuit-short circuit fault location method in coaxial cables. *IEEE Access*, IEEE, 2023.
- CARMO, E. C.; SILVA, L. A.; MAIA, T. A. Incipient fault localization using sheath and impedance-based method for single-bonded underground cables. *IEEE Access*, IEEE, 2025.
- CARMO, E. C.; SILVA, L. A. da; MAIA, T. A. Survey on incipient fault localization methods in underground cables. *Computers and Electrical Engineering*, Elsevier, v. 123, p. 109961, 2025.
- CARSON, J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *The Bell System Technical Journal*, Nokia Bell Labs, v. 5, n. 4, p. 539–554, 1926.
- CHEN, J.; CHE, R.; ZHANG, M. On-line monitoring and positioning of sheath grounding for high-voltage single-core cable based on pulse difference method. In: IEEE. *2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)*. [S.l.], 2021. p. 27–31.
- CHI, P. et al. A fault diagnosis method of double-layer lstm for 10 kv single-core cable based on multiple observable electrical quantities. *Electrical Engineering*, Springer, v. 104, n. 2, p. 603–614, 2022.
- CHI, Q. et al. Research on the characteristics of transient sheath overvoltage in underground cable lines. In: IEEE. *2020 IEEE International conference on high voltage engineering and application (ICHVE)*. [S.l.], 2020. p. 1–4.
- CHOPRA, S. Sustained and incipient fault location for utility distribution system. 2009.
- CHOUDHARY, M. et al. A review of aging models for electrical insulation in power cables. *Energies*, MDPI, v. 15, n. 9, p. 3408, 2022.
- CLIFTON, A. et al. Research challenges and needs for the deployment of wind energy in hilly and mountainous regions. *Wind Energy Science*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 7, n. 6, p. 2231–2254, 2022.
- CRUZ, J. D. L. et al. Fault location for distribution smart grids: Literature overview, challenges, solutions, and future trends. *Energies*, MDPI, v. 16, n. 5, p. 2280, 2023.
- DAS, A.; REDDY, C. Sheath voltage and sheath current phenomenon for different types of bonding for hv power cable under steady state. In: IEEE. *2022 IEEE 6th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*. [S.l.], 2022. p. 202–206.
- DASHTI, R. et al. A survey of fault prediction and location methods in electrical energy distribution networks. *Measurement*, Elsevier, v. 184, p. 109947, 2021.
- DESHMUKH, S. et al. A review of arduino based underground cable fault detection. *Research Journal of Engineering Sciences ISSN*, v. 2278, p. 9472, 2018.
- Electric Power Research Institute (EPRI). *Underground Transmission Systems Reference Book*. 2006. ed. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 2006. ISBN N/A.

- EMBER; INSTITUTE, E. *Total electricity generation – Ember and Energy Institute*. Ember, Energy Institute, 2024. Dataset. Major processing by Our World in Data. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-generation>.
- FARADE, R. A. et al. Design and implementation of gsm based underground fault detector. In: IEEE. *2022 Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*. [S.l.], 2022. p. 377–380.
- FENG, J.; CHENG, W. Calculation of cable electrical parameters considering proximity effect. In: IEEE. *2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. [S.l.], 2023. p. 2174–2179.
- FILHO, J. M. *Manual de Equipamentos Elétricos*. 5a. edição. ed. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2019.
- GONÇALVES, M. N.; PAULA, H. de; ALZAMORA, A. M. Técnicas para diagnóstico e estimativa de vida útil de cabos subterrâneos: Discussão sobre alternativas, aplicações e potencialidades. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 2, n. 1.
- GOSWAMI, L. et al. Iot based fault detection of underground cables through node mcu module. In: IEEE. *2020 International conference on computer science, engineering and applications (ICCSEA)*. [S.l.], 2020. p. 1–6.
- GUO, F.; ZHU, G.; DONG, X. A method of 20 kv cable line fault location based on sheath grounding current. In: IEEE. *2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. [S.l.], 2015. p. 1–5.
- HE, W. et al. Diagnosis and location of high-voltage cable fault based on sheath current. In: IEEE. *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*. [S.l.], 2018. p. 3353–3359.
- HERRERA-OROZCO, A. R. *Localização de Faltas Incipientes em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Cabos Subterrâneos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Março 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/157880>.
- HIGINBOTHAM, W.; HIGINBOTHAM, K. Review of medium voltage asset failure investigations. In: *Proc. PowerTest Conf.* [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–17.
- IBRAHIM, A. H. M. et al. Incipient fault detection in power distribution networks: review, analysis, challenges and future directions. *IEEE Access*, IEEE, 2024.
- INC., T. M. *MATLAB version: 9.13.0 (R2022b)*. Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks Inc., 2022. Disponível em: <https://www.mathworks.com>.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). *IEEE Standard 575-2014: IEEE Guide for Bonding Shields of High-Voltage Cable Systems for Substations*. [S.l.], 2014. Disponível em: <https://standards.ieee.org/standard/575-2014.html>.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). *IEEE Standard C37.114-2014: Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines*. [S.l.], 2014.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). *IEEE Standard 1234-2019: IEEE Guide for Fault-Locating Techniques on Shielded Power Cable Systems*. [S.l.], 2019.

JAMSHIDIGAHROUEI, A.; NOROUZI, P.; ESFANDIARI, E. Modeling and simulation of underground cable fault location detection with proteus software. *Majlesi Journal of Energy Management*, v. 12, n. 2, p. 1–6, 2023.

JUNLING, Z. et al. Multi-state monitoring system for cables and channels based on intelligent perception technology. In: IEEE. *2023 IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*. [S.l.], 2023. p. 1–4.

KASZTENNY, B.; VOLOH, I.; JONES, C. G. Detection of incipient faults in underground medium voltage cables. In: IEEE. *2009 Power Systems Conference*. [S.l.], 2009. p. 1–12.

KHOA, N. M. et al. Performance comparison of impedance-based fault location methods for transmission line. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, v. 11, n. 3, p. 234–241, 2022.

KULKARNI, S.; SANTOSO, S.; SHORT, T. A. Incipient fault location algorithm for underground cables. *IEEE transactions on smart grid*, IEEE, v. 5, n. 3, p. 1165–1174, 2014.

LAN, T. et al. An online data-efficient hv cable fault localization approach via an ai-enabled recognition of modal wavefront in sheath current. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 38, n. 3, p. 1977–1989, 2023.

LI, J. et al. Experimental research on incipient fault voltage disturbance model of power cable insulation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 145, p. 108687, 2023.

LI, L.; YONG, J.; XU, W. On-line cable condition monitoring using natural power disturbances. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 34, n. 4, p. 1242–1250, 2018.

LI, M.; ZHOU, C.; ZHOU, W. A revised model for calculating hv cable sheath current under short-circuit fault condition and its application for fault location—part 1: The revised model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 34, n. 4, p. 1674–1683, 2019.

LIMA, F. N. *Uma contribuição à estimativa de indicadores de desempenho do estado operacional de cabos isolados sob a ação das arborescências*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Setembro 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14256>.

LOURO, M.; FERREIRA, L. Underground mv network failures' waveform characteristics—an investigation. *Energies*, v. 14, n. 5, 2021. ISSN 1996-1073. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/5/1216>.

LOURO, M.; FERREIRA, L. Estimation of underground mv network failure types by applying machine learning methods to indirect observations. *Energies*, MDPI, v. 15, n. 17, p. 6298, 2022.

LOWCZOWSKI, K. et al. Detection and location of earth fault in mv feeders using screen earthing current measurements. *Energies*, MDPI, v. 13, n. 5, p. 1293, 2020.

- LOWCZOWSKI, K.; OLEJNIK, B. Monitoring, detection and locating of transient earth fault using zero-sequence current and cable screen earthing current in medium voltage cable and mixed feeders. *Energies*, MDPI, v. 15, n. 3, p. 1066, 2022.
- LU, D. et al. Multi-layer model enabled fault location for underground cables in mmc-hvdc grids considering distributed and frequency dependent line parameters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 37, n. 4, p. 3082–3096, 2021.
- LU, H. et al. Cable incipient fault identification method using power disturbance waveform feature learning. *IEEE Access*, IEEE, v. 10, p. 86078–86091, 2022.
- LV, W. et al. A method for medium voltage underground cables incipient faults diagnosis and location using sheath current. In: IEEE. *2023 3rd International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS)*. [S.l.], 2023. p. 753–758.
- MAHMOUD, M. A. et al. The current state of the art in research on predictive maintenance in smart grid distribution network: Fault's types, causes, and prediction methods—a systematic review. *Energies*, MDPI, v. 14, n. 16, p. 5078, 2021.
- MARTINEZ-VELASCO, J. A. *Power system transients: parameter determination*. [S.l.]: CRC press, 2017.
- METWALLY, I.; AL-BADI, A.; FARSI, A. A. Factors influencing ampacity and temperature of underground power cables. *Electrical Engineering*, Springer, v. 95, p. 383–392, 2013.
- METWALLY, I. A. The evolution of medium voltage power cables. *IEEE Potentials*, IEEE, v. 31, n. 3, p. 20–25, 2012.
- MIRSHEKALI, H.; SANTOS, A. Q.; SHAKER, H. R. A survey of time-series prediction for digitally enabled maintenance of electrical grids. *Energies*, MDPI, v. 16, n. 17, p. 6332, 2023.
- MISHRA, S. et al. Parameter estimation for underground cable fault using stochastic optimization. In: IEEE. *IECON 2021–47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.], 2021. p. 1–6.
- MISHRA, S. et al. A review on water tree phenomenon and incipient fault in underground cable. In: IEEE. *2022 Trends in Electrical, Electronics, Computer Engineering Conference (TEECCON)*. [S.l.], 2022. p. 119–112.
- MISHRA, S.; SWAIN, S. C.; DASH, R. Switching transient analysis for low voltage distribution cable. *Open Engineering*, De Gruyter, v. 12, n. 1, p. 29–37, 2022.
- NOVOSEL, D. et al. Fault location using digital relay data. *IEEE Computer Applications in Power*, IEEE, v. 8, n. 3, p. 45–50, 1995.
- OCLÓN, P. et al. Multiobjective optimization of underground power cable systems. *Energy*, Elsevier, v. 215, p. 119089, 2021.
- ORTON, H. History of underground power cables. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 29, n. 4, p. 52–57, 2013.

- PAN, W. et al. Incipient fault location method of cable based on both-end electric quantities. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 219503–219512, 2020.
- PENG, N. et al. Fault location of three-core power distribution cables based on lump-parameter model considering conductor couplings. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 130, p. 106953, 2021.
- PENG, N. et al. Fault section identification of the power cables in urban distribution networks by amplitude differences between the zero-sequence currents and those flowing in cable sheaths and armors. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 14, n. 4, p. 2593–2606, 2022.
- PERSONAL, E. et al. A comparison of impedance-based fault location methods for power underground distribution systems. *Energies*, MDPI, v. 9, n. 12, p. 1022, 2016.
- QU, K. et al. Model-free underground cable incipient fault location using two-terminal zero-sequence measurements. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 140, p. 108057, 2022.
- RITCHIE, H.; ROSADO, P.; ROSER, M. Energy production and consumption. *Our World in Data*, 2020. <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>.
- SAID, A. et al. Deep learning-based fault classification and location for underground power cable of nuclear facilities. *Ieee Access*, IEEE, v. 10, p. 70126–70142, 2022.
- SAMET, H. et al. A similarity-based framework for incipient fault detection in underground power cables. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 133, p. 107309, 2021.
- SCHÖTT-SZYMCZAK, A.; WALCZAK, K. Analysis of overvoltages appearing in one-sidedly ungrounded mv power cable screen. *Energies*, MDPI, v. 13, n. 7, p. 1821, 2020.
- SEYEDI, Y.; PIYASINGHE, L.; SMITH, R. Incipient fault detection in distribution systems using line sensor data: A real-world study. In: IEEE. *2024 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*. [S.l.], 2024. p. 1–5.
- SHINGRUT, R. et al. Underground cable fault detection. *International Journal of Engineering Research and Technology*, v. 9, n. 2, p. 277–280, 2020.
- SIDHU, T. S.; XU, Z. Detection and classification of incipient faults in underground cables in distribution systems. In: IEEE. *2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. [S.l.], 2009. p. 122–126.
- SIDHU, T. S.; XU, Z. Detection of incipient faults in distribution underground cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 25, n. 3, p. 1363–1371, 2010.
- SILVA, F. F. D.; BAK, C. L. *Electromagnetic transients in power cables*. [S.l.]: Springer, 2013.
- SONG, Y. et al. Online multi-parameter sensing and condition assessment technology for power cables: A review. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 210, p. 108140, 2022.

SUGDARE, P. et al. Underground cable fault detector using iot. *International Journal of Modern Developments in Engineering and Science*, v. 2, n. 4, p. 57–60, 2023.

SUWANASRI, T. et al. Induced sheath volt-age investigation under normal and fault conditions for practical underground cable system [j]. *International Electrical Engineering Transactions*, v. 7, n. 1 (12), 2021.

TAKAGI, T. et al. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Transactions on Power apparatus and systems*, IEEE, n. 8, p. 2892–2898, 2007.

TARIQ, R. et al. An optimized solution for fault detection and location in underground cables based on traveling waves. *Energies*, MDPI, v. 15, n. 17, p. 6468, 2022.

TERESA, V. et al. Iot-based underground cable fault detection. In: IEEE. *2022 International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS)*. [S.l.], 2022. p. 1094–1100.

THABET, A.; SALEM, N.; MOHAMED, E. E. Modern electrical insulations for power cables using multi-nanoparticles technique. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, School of Electrical Engineering and Informatics, v. 10, n. 2, p. 271–279, 2018.

THUE, W. A. *Electrical power cable engineering*. [S.l.]: Crc Press, 2017.

WAN, Q.; YAN, X. Fault diagnosis of hv cable metal sheath grounding system based on lstm. *Applied Sciences*, MDPI, v. 13, n. 4, p. 2453, 2023.

WANG, J. et al. Intelligent inspection enabling platform for power distribution network based on 5g wireless communication connected unmanned aerial vehicle. In: IEEE. *2022 5th international conference on energy, electrical and power engineering (CEEPE)*. [S.l.], 2022. p. 574–579.

WANG, L. et al. Cable fault diagnosis based on metal sheath grounding current monitoring technology. In: IEEE. *2023 IEEE 6th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)*. [S.l.], 2023. p. 748–752.

WANG, Y. et al. Waveform vector embedding for incipient fault detection in distribution systems. In: IEEE. *2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*. [S.l.], 2021. p. 3873–3879.

WISCHKAEMPER, J. et al. Identification, location, and remediation of incipient fault and failure conditions using waveform monitoring and automated analysis. In: IEEE. *2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP)*. [S.l.], 2022. p. 1–6.

WU, K.; SO, K. I. Partial discharge measurement for condition assessment of high voltage cables in power system. In: IEEE. *2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. [S.l.], 2019. p. 1–5.

WU, Y. et al. An extendable and accurate high-frequency modelling of three-phase cable for prediction of reflected wave phenomenon. In: IEEE. *2022 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. [S.l.], 2022. p. 944–950.

- WU, Y.; ZHANG, P. A novel online monitoring scheme for underground power cable insulation based on common-mode leakage current measurement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 69, n. 12, p. 13586–13596, 2022.
- XIAO, X. et al. Power disturbance waveform analysis and proactive application in power systems. *Energy Conversion and Economics*, Wiley Online Library, v. 4, n. 2, p. 123–136, 2023.
- XU, Z. *Fault location and incipient fault detection in distribution cables*. Tese (Doutorado) — The University of Western Ontario, Canada, February 2011. Disponível em: <https://ir.lib.uwo.ca/etd/>.
- XU, Z. et al. Detection and identification of underground cable incipient faults based on denoising autoencoder and optimized convolutional neural network. In: IEEE. *2023 International Conference on Power System Technology (PowerCon)*. [S.l.], 2023. p. 1–9.
- YANG, L. Fault location system for radial mv underground distribution cable networks. In: IEEE. *2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. [S.l.], 2018. p. 1–6.
- YEGANEJOU, M. et al. Condition monitoring of underground power cables via power-line modems and anomaly detection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, 2023.
- YIN, Z.; CHEN, H.; WANG, L. Online detection and assessment of cable insulation fault based on time–frequency domain reflectometry. *AIP Advances*, AIP Publishing, v. 14, n. 3, 2024.
- ZHANG, H. Cable fault detection and diagnosis method based on convolutional neural network. In: IEEE. *2023 IEEE International Conference on Image Processing and Computer Applications (ICIPCA)*. [S.l.], 2023. p. 1463–1466.
- ZHANG, W. et al. Multicycle incipient fault detection and location for medium voltage underground cable. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 32, n. 3, p. 1450–1459, 2016.
- ZHANG, Y. et al. Incipient fault detection based active protection of photovoltaic dc integration system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, 2024.
- ZHAO, Y. et al. Active cable sheath current-based protection scheme for an offshore hvac wind transmission system. *Frontiers in Energy Research*, Frontiers Media SA, v. 10, p. 844474, 2022.
- ZHOU, C.; YI, H.; DONG, X. Review of recent research towards power cable life cycle management. *High voltage*, Wiley Online Library, v. 2, n. 3, p. 179–187, 2017.
- ZHU, B. et al. Insulation monitoring and diagnosis of faults in cross-bonded cables based on the resistive current and sheath current. *IEEE Access*, IEEE, v. 10, p. 46057–46066, 2022.
- ZHU, L.; ZHENG, W. Cable fault detection based on svm and wavelet analysis. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2021. v. 2030, n. 1, p. 012073.

A Fenômenos Eletromagnéticos

A.1 Campos Elétricos e Magnéticos

Conforme mostrado na Figura A.1, a distribuição do campo eletrostático está no interior do cabo. R_i representa o raio interno do isolamento e R_o o raio externo. O campo eletrostático externo, para todos os tipos de cabos, é considerado nulo.

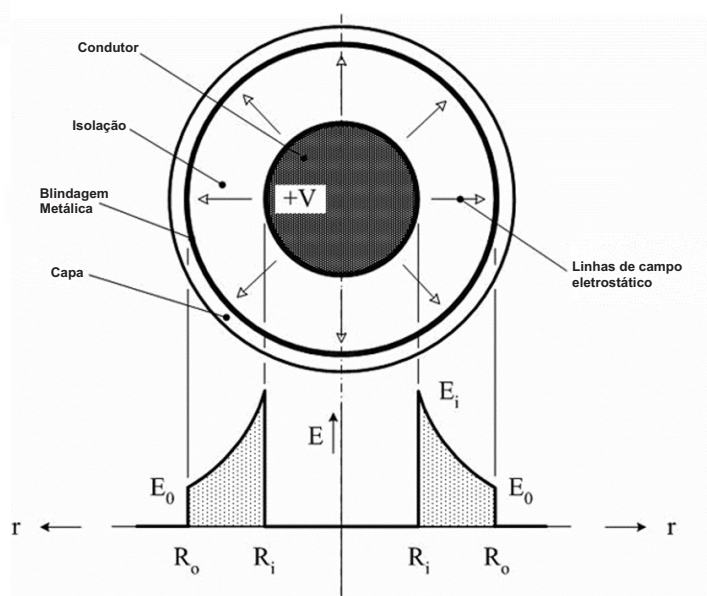


Figura A.1 – Campo elétrico em um condutor isolado (Electric Power Research Institute (EPRI), 2006).

Esse esquema representa a distribuição do campo elétrico ao redor de um condutor cilíndrico isolado. Na seção transversal, observa-se que o condutor central está carregado com um potencial positivo, e o campo elétrico é radial em direção à blindagem externa, que atua como referência de potencial. A variação da intensidade do campo elétrico em função da distância radial mostra que o valor é máximo na superfície do condutor e diminui gradualmente até atingir a blindagem externa.

A.2 Efeitos Proximidade e Pelicular

Os fenômenos eletromagnéticos em cabos isolados incluem os efeitos de proximidade e o efeito pelicular, que exercem influência sobre o comportamento elétrico dos condutores (Electric Power Research Institute (EPRI), 2006). Esses efeitos impactam a distribuição de corrente e a resistência do sistema, e seu conhecimento possibilita ampliar a análise sobre o comportamento dos cabos isolados.

O efeito de proximidade refere-se à não uniformidade na distribuição de corrente ao longo da seção transversal de um condutor. Essa irregularidade é causada pela interação eletromagnética entre condutores próximos. Quando condutores estão localizados em uma configuração adjacente, o campo magnético gerado pela corrente em um condutor induz variações na densidade de corrente nos condutores vizinhos. Como resultado, a densidade de corrente tende a aumentar nas regiões próximas entre os condutores e diminuir nas áreas afastadas. A presença do efeito de proximidade pode levar ao aumento das perdas de potência e influenciar a capacidade de condução de corrente do cabo, tornando-se um aspecto a ser considerado nos cálculos de dimensionamento e eficiência (ARGAUT, 2021).

O efeito pelicular, por sua vez, é um fenômeno intrínseco ao fluxo de corrente alternada no próprio condutor. Nesse caso, a corrente elétrica tende a se concentrar na superfície externa do condutor, ao invés de se distribuir de forma uniforme em sua seção transversal. Esse comportamento ocorre devido à interação entre o campo magnético alternado e o fluxo de corrente, que gera maior impedância no núcleo do condutor. Como consequência, a corrente busca as áreas de menor impedância, ou seja, a superfície, resultando no aumento da resistência efetiva do condutor para correntes alternadas. Esse fenômeno é evidente em condutores de grandes diâmetros e em frequências elevadas.

Ambos os efeitos, proximidade e pelicular, impactam a resistência AC e, conseqüentemente, as perdas no cabo. Esses fenômenos não apenas reduzem a eficiência energética, mas também aumentam a geração de calor no sistema, o que pode comprometer a vida útil do cabo. Para mitigar esses impactos, os valores de correção associados a esses efeitos são incorporados nas fórmulas de cálculo dos parâmetros elétricos de cabos isolados (FILHO, 2019). Esses parâmetros incluem a resistência AC, indutância e capacitância, garantindo que os projetos contemplem essas características operacionais.

A.3 Métodos de Instalação

Os cabos isolados podem ser instalados enterrados diretamente no solo, dispostos em dutos ou canaletas de alvenaria, inseridos em eletrodutos ou organizados em bandejamentos. As configurações de instalação são denominadas como plana ou *flat* e trifólio, conforme ilustrado na Figura A.2.

A disposição de múltiplos condutores em um mesmo duto ou sistema de bandejamento impõe desafios técnicos adicionais à instalação, sobretudo em trechos com curvaturas, onde há aumento da tensão mecânica sobre os cabos (Electric Power Research Institute (EPRI), 2006). Esses fatores influenciam a vida útil operacional do sistema, reforçando a importância de um planejamento criterioso do trajeto e das condições de lançamento, a fim de evitar que as forças de tração excedam os limites especificados e provoquem danos (ARGAUT, 2021).

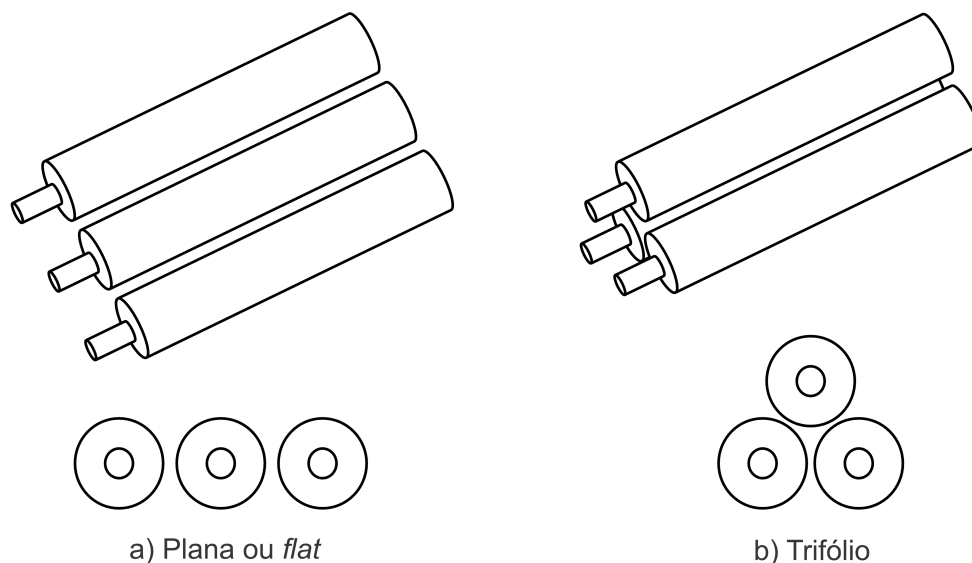


Figura A.2 – Métodos de instalação básicos sendo (a) plana ou *flat* e (b) trifólio (ARGAUT, 2021).

A.4 Proposta de Montagem de Protótipo

Para a aplicação desse método em sistemas de monitoramento em tempo real, são necessários sensores com alta sensibilidade para medir, de forma precisa e sincronizada, a tensão e a corrente na blindagem metálica. Além disso, dispositivos capazes de operar com altas taxas de amostragem são capazes de capturar dados transitórios durante condições de falha. Embora essa configuração envolva um investimento inicial em *hardware*, a simplificação dos requisitos de dados viabiliza a implementação em campo.

A proposta apresentada na Figura A.3 representa um sistema integrado de *hardware* e *software* para localização de falhas em cabos isolados, utilizando dados de tensão e corrente da blindagem metálica e do condutor principal.

Os números (1) (2) (3) representam os três condutores de potência conectados do lado da fonte de alimentação e os números (4) (5) (6) representam os mesmos três condutores conectados do lado oposto ao da fonte, também conhecido como lado carga ou receptor.

Os dispositivos de medição de tensão são representados pelos transformadores de potencial e estão indicados pelas letras (A) (B) (C) respectivamente nas três fases do condutor principal (lado fonte) e pelas letras (G) (H) (I) no condutor principal (lado carga ou receptor).

As medições de corrente na blindagem metálica em cada fase respectivamente são realizadas pelos transformadores de corrente (J) (K) (L). As medições de tensão

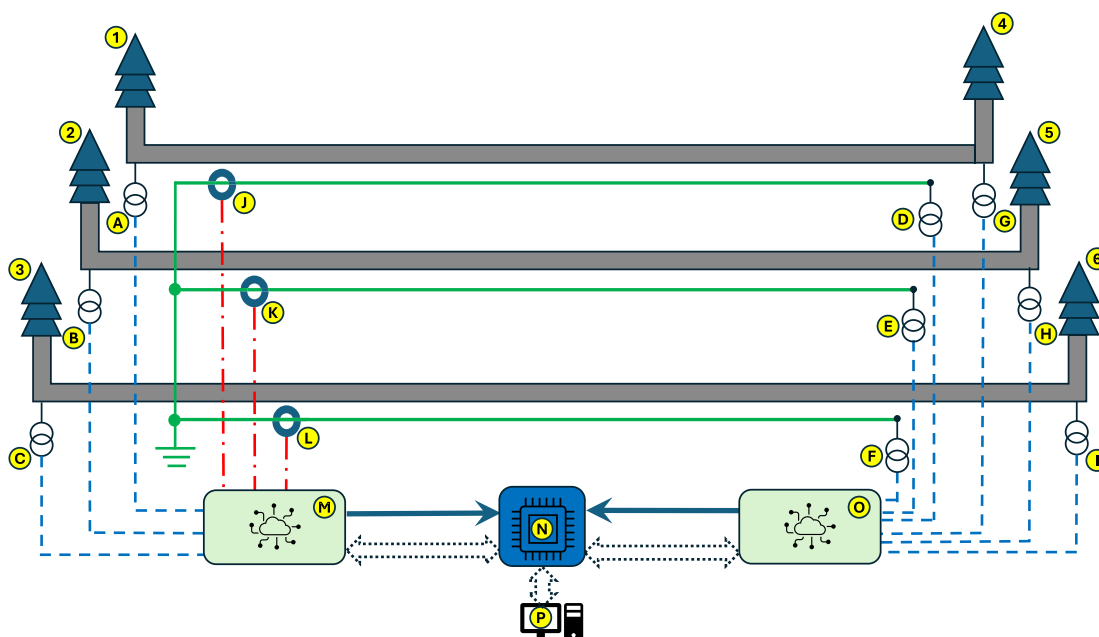


Figura A.3 – Esquema básico da montagem para coleta de dados e processamento dos cálculos da posição de falhas.

na blindagem metálica são realizadas ao lado oposto ao das medições de corrente e são representadas pelos transformadores de potencial identificados como (D) (E) (F).

Para a aquisição dos dados medidos pelos sensores, são utilizadas as interfaces de coleta representadas respectivamente pelas placas eletrônicas identificadas como (M) do lado da fonte e (O) do lado da carga ou receptor. As medições realizadas pelos sensores de tensão e corrente são enviadas para essas placas de aquisição de dados (M) e (O) que conseqüentemente coletam e enviam para as informações ao dispositivo (N) no qual embarca o algoritmo de processamento desses dados que resulta no ponto de localização das falhas incipientes.

O resultado do ponto de localização da falha é enviado para o computador de supervisão denominado (P) que além de emitir alarmes e sinais (visuais ou sonoros) também realiza registros históricos de alarmes e eventos relacionados a solução para posterior análise de tendências.

A Tabela A.1 mostra os dispositivos básicos necessários para montagem de um protótipo de coleta e processamento de dados.

Tabela A.1 – Quantitativos previstos para a montagem de protótipo.

| Dispositivo | Descrição | Quantitativo |
|---------------------|--------------------------------------------|--------------|
| Medição de tensão | Pontas de prova de tensão 0 a 15 kV | 9 |
| Medição de corrente | Pontas de prova de corrente 0 a 1000 A | 3 |
| Aquisição de dados | Placas de aquisição eletrônicas | 2 |
| Processamento | Placas de processamento de dados confiável | 1 |

B Referências de Parâmetros de Cabos Isolados

Os cálculos foram realizados para esse circuito através das linhas de comando no script do *Matlab* considerando os parâmetros estruturais listados nas Tabelas B.1 e B.2.

Tabela B.1 – Principais parâmetros do circuito do alimentador industrial de 13,8 kV do estudo de caso.

| Dados | Especificações |
|--------------------------|-------------------------------------------|
| Condutores | Singelos |
| Seção | 240 mm ² |
| Resistência do condutor | $0,13 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$ |
| Indutância do condutor | $8,036 \times 10^{-8} \text{ H}/\text{m}$ |
| Aterramento | <i>Single-bonded</i> |
| Neutro | Aterrado por resistência de 13,2 Ω |
| Capacitância | $0,32 \times 10^{-6} \text{ F}/\text{km}$ |
| Comprimento | 1.000 m |
| Isolação | EPR |
| Classe | 8,7/15 kV |
| Tensão nominal | 13,8 kV |
| Raio do condutor | 9,1 mm |
| Camada de isolação | 4,5 mm |
| Raio da blindagem | 13,6 mm |
| Resistência da blindagem | $3,146 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$ |
| Indutância da blindagem | $9,44 \times 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$ |

Tabela B.2 – Propriedades dos Cabos de Cobre EPR 8.7/15kV - Seção nominal 240 mm²

| Característica | Valor |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Massa específica a 20°C (g/cm ³) | 8,89 |
| Condutividade mínima a 20°C (IACS) | 97 |
| Resistividade máxima a 20°C (ohm/mm ² /m) ρ_{20C} (1/56 = 0,017857) | 0,017775 |
| Coefficiente de variação da resistência/°C a 20°C | 0,00381 |
| Coefficiente de temperatura (α) | 0,00393 |
| Coefficiente de dilatação linear/°C | $1,69 \times 10^{-5}$ |
| Propriedades elétricas | |
| Rigidez dielétrica EPR C.A. (kV/mm) | 40 |
| Rigidez dielétrica EPR Impulso (kV/mm) | 60 |
| Resistividade térmica (K.m/W) | 5 |
| Limites térmicos °C Permanente | 90 |
| Limites térmicos °C Sobrecarga | 130 |
| Limites térmicos °C Curto Circuito | 250 |
| Constante dielétrica (ϵ) (F/m) | 2,6 |
| Fator de perda tg δ (20°C) | 0,04 |
| Constantes K | |
| K1 encordoamento normal | 1,03 |
| K2 encordoamento normal $\theta \leq 6$ mm | 1,04 |
| K3 cabos singelos | 1 |
| Distância Média Geométrica (DMG) | |
| Cabo em trifólio equilátero (Dmg = D) (mm) | 36,9 |
| Blindagem | |
| Número de fios | 82 |
| Diâmetro dos fios (mm) | 1,97 |
| Resistência ôhmica máx. a 20°C em c.c. (ohm/km) | 0,074 |
| Intensidade máxima de curto-circuito em 1 seg (kA) | 37,2 |
| Condutor principal | |
| Número de fios | 37 |