

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Leonardo Felipe da Silva dos Santos

**EU AINDA NÃO SEI
PRECISO COLOCAR?**

Santa Maria, RS
2025

Leonardo Felipe da Silva dos Santos

**EU AINDA NÃO SEI
PRECISO COLOCAR?**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. João da Silva

Coorientadora: Prof.^a Dra. Maria da Costa

Santa Maria, RS
2025

Leonardo Felipe da Silva dos Santos

**EU AINDA NÃO SEI
PRECISO COLOCAR?**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 25 de setembro de 2025:

**João da Silva, Dr. (AAAA)
(Presidente/Orientador)**

**Maria da Costa, Dra. (AAAA)
(Coorientadora)**

Banca Um, Dr. (AAAA)

Santa Maria, RS
2025

DEDICATÓRIA

Ao fim dos tempos

AGRADECIMENTOS

A mim!

Um grama de ação vale uma tonelada de
teoria.

(ENGELS, Friedrich)

RESUMO

EU AINDA NÃO SEI PRECISO COLOCAR?

AUTOR: Leonardo Felipe da Silva dos Santos
Orientador: João da Silva
Coorientadora: Maria da Costa

Escreva seu resumo aqui! Você pode digitá-lo diretamente neste arquivo ou usar o comando input. O resumo deve ter apenas uma página, desde o cabeçalho até as palavras chave. Caso seu resumo seja maior, use comandos para diminuir espaçamento e fonte (até um mínimo de 10pt) no texto. Segundo a MDT, é preciso que os resumos tenham, no máximo, 250 palavras para trabalhos de conclusão de curso de graduação, pós-graduação e iniciação científica e até 500 palavras para dissertações e teses.

Palavras-chave: Palavra Chave 1. Palavra 2. Palavra 3. (...)

ABSTRACT

I DONT KNOW NEED THIS?

AUTHOR: Leonardo Felipe da Silva dos Santos
ADVISOR: João da Silva
CO-ADVISOR: Maria da Costa

Write your abstract here! As recomendações do resumo também se aplicam ao abstract. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Keywords: Keyword 1. Keyword 2. Keyword 3. (...)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rede Monofásica com Retorno por Terra (MRT).	25
Figura 2 – Rede Monofilar com Retorno por Terra (MRT) com Neutro Parcial.	26
Figura 3 – Rede proposta por Marchesan.	30

LISTA DE GRÁFICOS

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE TABELAS

LISTA DE QUADROS

LISTA DE ABREVIATURAS

SIGLA1	Nome Completo da Sigla 1
SIGLA2	Nome Completo da Sigla 2
SIGLAMAX	Nome Completo da Sigla MAX

LISTA DE SIGLAS

SIGLA1	Nome Completo da Sigla 1
SIGLA2	Nome Completo da Sigla 2
SIGLAMAX	Nome Completo da Sigla MAX

LISTA DE SÍMBOLOS

u_*	Escala de velocidade de fricção
w_*	Escala de velocidade convectiva
$(Re)^2$	Maior simbolo da lista

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	17
1.2	ESCOPO DO TRABALHO	19
1.3	OBJETIVOS DA TESE	20
1.3.1	Objetivo Geral	20
1.3.2	Objetivos Específicos	21
1.4	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	21
1.5	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	21
1.6	DELIMITAÇÃO DA TESE	22
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	24
2.2	REDES MONOFÁSICAS COM RETORNO POR TERRA (MRT)	24
2.2.1	Redes Monofásicas com Retorno por Terra (MRT) Não Isoladas ou Neutro Parcial	26
2.2.2	Redes Monofásicas com Retorno por Terra (MRT) com Transformador Isolador	27
2.2.3	Para Raio Energizado (PRE)	27
2.2.4	Sistema Trifásico a Dois Fios (T2F)	29
2.3	ELO FUSÍVEL	32
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A necessidade da energia elétrica permeia os acontecimentos do cotidiano humano. Desde o despertar até a hora que dormimos necessitamos de energia elétrica. A viabilidade do alcance da energia elétrica se faz necessárias para todos quais os setores da sociedade. A energia elétrica é o principal fator para crescimento demográfico e também de capital da sociedade. Segundo o Programa Nacional de Amostras de Domicílios (PNAD) em 2022, cerca de 12,6% da população brasileira se encontra nas áreas rurais, um decaimento de 2,68% em relação a 2015.

Isso pode ser um acaso da baixa cobertura de serviços públicos, falta de investimento em infraestrutura, segundo o PNAD cerca de 16,12% da população total do Brasil, não tem acesso a rede de água. Grande parte dos quais não tem acesso a rede de abastecimento de água se encontra nas regiões rurais do Brasil. Segundo a (EPE, 2024) o consumo de energia pelas zonas rurais é apenas de 6,5% do total de energia elétrica consumida no Brasil. Isso pode ser um indicativo de que a energia elétrica não é um fator preponderante para o crescimento demográfico e econômico da população rural.

Desde 1980 o Brasil, vive iniciativas públicas e privadas, para implemento da energia elétrica em zonas rurais, com o intuito de promover o desenvolvimento econômico destas áreas. Dentre todas as iniciativas podemos citar, programas como Clic Rural I e II (1984/1989 e 1990); Interluz (1989/1991); PROLUZ I e II (1990/1992 e 1995/1999); PRODEEM (1994). Luz da Terra (1996/2002); Luz no Campo (1999/2003) e Luz para Todos (2003/2025).

Todos estes programas visam a universalização do acesso a energia elétrica, com o intuito de promover o desenvolvimento econômico e social das áreas rurais. Assim como também promover a inclusão social e a redução da pobreza. O programa Luz para Todos, é o maior programa de eletrificação rural do mundo, com mais de 15 milhões de pessoas atendidas, e mais de 4 milhões de ligações elétricas realizadas.

O programa Luz Para Todos, do Ministério de Minas e Energia (MME), é o programa de universalização de Energia Elétrica, tem como objetivo atender 100% da população brasileira, tanto em zonas rurais como em cidades. A universalização da energia elétrica no Brasil, Lei N°10.438/2002, define que os serviços energia elétrica, públicos e privados, devem investir na eletrificação total do Brasil de forma gratuita e universal. Sem ônus aos solicitantes, desde que se atenda aos requisitos listados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sendo eles:

- Enquadramento no Grupo B;
- Carga instalada na unidade consumidora de até 50kW;
- Possa ser efetivada em tensão inferior a 2,3kV, ainda que necessário a extensão da rede primária de tensão igual ou inferior a 138kV, ou se necessário atendida por sistemas isolados;
- Por fim não existta unidade consumidora com fornecimento de energia elétrica na mesma propriedade.

Para unidades consumidoras individuais situadas em comunidades indígenas e quilombolas, a conexão elétrica pode ser gratuita, desde que satisfeitas as condições estipuladas pelas normativas nº 950 e 1000 (ANEEL, 2021)(ANEEL, 2022). A viabilidade econômica da expansão da rede para essas localidades é comprometida pela distância e pelo consumo reduzido. Caso o consumidor precise elevar sua capacidade de carga, seja pela adoção de novas tecnologias agrícolas, pecuárias ou outras, será necessária uma contrapartida financeira à distribuidora. Tal elevação da demanda geralmente implica a utilização de motores trifásicos, notórios por sua maior eficiência em relação aos monofásicos. Existem alternativas para contornar o elevado investimento exigido pelos sistemas de distribuição trifásicos (FANDI, 2013).

As maiores iniciativas da composição dos programas eram voltadas para a expansão da rede elétrica, com redes Monofásicas com Retorno por Terra (MRT). Estas redes quais tem seu fornecimento limitado ao monofásico, qual limita também a corrente e consequentemente o potência entregue ao consumidor final. Esse tipo de fornecimento mesmo que com a utilização de inversores a jusante do Transformador consumidor, para produzir tensão trifásica, não se torna viável, pois seu limite é no transformador monofásico qual a alimenta. Pelo mundo esse tipo de rede que é conhecida por *Single Wire Earth Return* (SWER), é utilizado em regiões remotas, onde a instalação de redes trifásicas é inviável. Esse tipo de rede é utilizado na Nova Zelândia, Austrália, África do Sul e Estados Unidos.

Originárias da Nova Zelândia por volta de 1925, as redes SWER representam uma técnica hoje empregada em nações como Uganda, Brasil, Austrália e Estados Unidos, entre outras (MANDENO, 1947). Mesmo que a restrição na capacidade de potência seja um ponto negativo relevante, esta configuração de rede é uma solução frequente para a eletrificação de áreas remotas. As alternativas de fornecimento de energia elétrica para essas áreas são limitadas, e a instalação de redes monofásicas com retorno por terra é uma opção viável. Essa configuração é especialmente útil em regiões onde o custo de instalação de redes trifásicas é proibitivo, como em áreas rurais ou remotas.

O sistema trifásico a dois fios (T2F), apresentado inicialmente por Borges 2017, surge como uma alternativa para aumentar a capacidade (repotencialização) de sistemas

monofásicos MRT. Caracteriza-se por ser uma rede trifásica não convencional que emprega apenas dois condutores aéreos para a transmissão de potência, utilizando o solo como o caminho para a terceira fase. Assim, somente dois cabos aéreos são necessários ao longo da rede, e no ponto de consumo (lado da carga), a terceira fase é acessada mediante conexão com o aterramento. Esse sistema é uma solução inovadora para a eletrificação rural, pois permite a utilização de motores trifásicos em locais onde a instalação de redes convencionais é inviável. Além disso, o T2F não precisa ser utilizado em conjunto com inversores para fornecer energia elétrica a cargas trifásicas. Naturalmente apenas utilizar as estruturas existentes do MRT fazendo a repotencialização para trifásico apenas com algumas adições.

Uma colaboração em Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) entre a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e a antiga Companhia Estadual de Energia Elétrica - Distribuição (CEEE-D), hoje pertencente ao Grupo Equatorial Energia, foca na concepção de um sistema de distribuição que utiliza a topologia T2F. O projeto visa identificar os parâmetros e limitações dessa tecnologia, buscando simultaneamente reduzir o investimento inicial e o tempo de retorno do capital investido. A aplicação do T2F é direcionada à eletrificação rural, prevendo tanto o aproveitamento de estruturas monofásicas (MRT) existentes quanto a construção de redes novas, e considera fundamental a possibilidade de reutilizar postes, estruturas e ferragens preexistentes.

No sentido de tais apresentações, o trabalho consiste em demonstrar as formas de utilização da Rede T2F em sistemas de distribuição de energia elétrica, com o intuito de aumentar a capacidade de potência e a confiabilidade do sistema. Demonstrando a aplicabilidade do sistema de distribuição trifásico em um sistema teste real repotencializando alguns trechos, formalizado pelo *IEEE 34 bus* (Modelo IEEE 34 Barras), muito utilizado para testes de sistemas de distribuição. O intuito é apresentar a aplicação de fusíveis, religadores e demais formas de controle em caso de curto-circuitos.

1.2 ESCOPO DO TRABALHO

No meio rural, as necessidades de energia variam muito entre os consumidores. Além disso, o dinheiro disponível para levar eletricidade a todos é limitado. Por isso, as companhias de energia geralmente optaram por instalar redes mais simples, chamadas monofásicas. Isso fazia sentido porque, inicialmente, o consumo era baixo, as propriedades rurais ficavam distantes umas das outras (baixa densidade de carga) e poucas usavam muita energia ao mesmo tempo. Assim, o sistema monofásico era a solução mais barata para atender essa demanda inicial.

Com programas como o "Luz para Todos", o objetivo foi garantir que ninguém ficasse sem acesso à energia elétrica. No entanto, a maioria dessas redes rurais mono-

fásicas não foi pensada para um futuro onde o consumo aumentasse. Hoje, com a modernização da agricultura (uso de irrigação, máquinas para processar produtos, etc.), os produtores rurais precisam de mais energia. O problema é que o sistema monofásico atual limita essa capacidade, impedindo que utilizem todo o potencial de novas tecnologias.

Essa necessidade de melhoria já foi discutida publicamente. Em 2015, por exemplo, uma audiência na Assembleia Legislativa do Rio Grande do Sul debateu um programa para qualificar a energia no campo. A ideia era melhorar as redes monofásicas existentes e construir novas redes com maior capacidade (bifásicas e trifásicas). Na época, estimou-se que só no RS havia cerca de 102 mil quilômetros de redes monofásicas precisando de upgrade para trifásicas, um investimento calculado em R\$ 1,6 bilhão. Isso mostra o tamanho do desafio.

É fundamental encontrar maneiras de tornar a energia trifásica (de maior capacidade) mais acessível e viável para as companhias de energia investirem no campo. Contudo, a introdução de sistemas mais potentes, especialmente se forem soluções inovadoras ou não convencionais (como o sistema T2F mencionado anteriormente), traz desafios técnicos. É crucial desenvolver formas seguras de proteger essas novas redes contra problemas como curtos-circuitos. Por isso, análises técnicas detalhadas são indispensáveis antes de implementar essas novas tecnologias em larga escala.

Atualmente a primeira rede T2F se encontra na Universidade Federal de Santa Maria, que em testes se mostra promissora. A proposta de apresentação deste trabalho é que essa rede possa ser aplicada em redes pelo Brasil inteiro, principalmente nas regiões mais remotas. Assim queremos avançar para criação de redes cabeça de série, para assim efetivamente aplica-las em larga escala, promovendo a repotencialização de redes monofásicas já existentes e também a construção de novas redes com essa nova tecnologia.

1.3 OBJETIVOS DA TESE

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar a aplicação do sistema de distribuição trifásico T2F em um sistema teste real, repotencializando alguns trechos do sistema, formalizado pelo *IEEE 34 bus* (Modelo IEEE 34 Barras), muito utilizado para testes de sistemas de distribuição. O intuito é apresentar a aplicação de fusíveis, religadores e demais formas de controle em caso de curto-circuitos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Utilizar os calculos de corrente de curto-circuito para o sistema T2F, para verificar as melhores proteções para cada caso de aplicação;
- Criar um referencial sobre aplicabilidade do sistema de proteção do T2F;
- Investigar os procedimentos para aplicação de Religadores Monofásicos ou Bifásicos;
- Criação de curvas e equações quais possam ser utilizadas para a proteção do sistema T2F por meio de religadores;
- Criar religadores utilizando algoritmos de inteligência artificial, para que o sistema possa se auto regular em caso de curto-circuito;

1.4 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Levar energia elétrica para áreas rurais é um processo caro e muitas vezes faltam recursos financeiros para realizar todos os investimentos necessários. Isso nos obriga a buscar soluções mais inteligentes e eficientes para os sistemas elétricos, que se adaptem melhor à forma como a energia é consumida no campo aqui no Brasil.

Dentro dessas buscas por otimização, um sistema que tem chamado de T2F, consegue fornecer energia trifásica usando apenas dois fios na rede aérea.

Este trabalho específico se dedica a estudar justamente esse sistema T2F. Utilizando métodos e conhecimentos técnicos já estabelecidos, o objetivo é entender como aplicar a rede em sistemas reais e também fornecer metodos de proteção dessa rede em casos de curto-circuitos, afim de não afetar redes adjacentes. A meta final é definir critérios claros para garantir que o sistema T2F possa operar de forma segura no dia a dia, além de poder ser aplicado em larga escala.

1.5 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

A forma que impactamos o mundo atual, principalmente no que diz respeito ao meio ambiente, é um tema muito debatido atualmente. O uso de energia elétrica é um dos principais fatores que afetam a vivência diária humana, desde a forma que utilizamos diversas tecnologias, até a forma que nos alimentamos. Pode-se dizer que após a pandemia de Covid-19, a forma de comunicação e utilização do digital afeta diretamente a forma que a

população se comunica, consome produtos, gerencia o trabalho, a educação, cultura, lazer e saúde. A população evidencia a utilização de tecnologias cada vez mais estabelecidas em redes.

A necessidade de modernização rural, tem seu espaço de interação com a sociedade cada vez mais conectada. A necessidade de acesso a energia elétrica, é um fator preponderante para o caracterizar o setor elétrico como um serviço essencial. Pode-se considerar uma economia mais eletrifica, eficiente, limpa e interconectada. Deste modo, o sistema T2F visa ser uma grande viabilidade econômica para a eletrificação rural, por meio de beneficiar propriedades rurais quais não tem sua capacidade de carga atendidas pelo MRT atual.

Este sistema é uma alternativa viável utilizando as estruturas já existentes dos sistemas monofásicos, quais estes já utilizam um sistema de aterramento, todos previamente implantados. Sendo que com a montagem do sistema T2F, todas as partes do sistema MRT podem ser reutilizadas, visando o melhor aproveitamento do investimento feito anteriormente, com isso se torna um traço bastante atrativo para aplicação.

A partir dessa proposta inovadora, para que essa tecnologia e técnica de transmissão de energia elétrica possa ser aplicada, suprimindo as inseguranças e incertezas visto que utiliza-se o solo como meio condutor e não apenas para retorno de corrente. É necessário a criação de uma metodologia de proteção, referenciamento das curvas propostas e criação de algoritmos de aprendizado de máquina, para que o sistema se auto-regule durante casos de curto-circuitos. Mas também vista ponderar todo o conjunto do sistema, com a aplicação de religadores, fusíveis e demais formas de proteção, visando encontrar o balanço ideal entre custo e segurança do sistema.

Em vista da necessidade, o presente trabalho propõe essa metodologia de proteção, para suprir as expectativas em relação a segurança e confiabilidade do sistema. Também visa aproveitar o máximo as novas tecnologias disponíveis, como algoritmos de aprendizado de máquinas, aplicação de tipos não convencionais de religadores, tipos diferentes de fusíveis, entre outros. Com o intuito de se criar uma metodologia qual seja de fácil aplicação e entendimento, visando consequentemente beneficiar o atendimento adequado dentro das margens de segurança, confiabilidade e além de tudo uma boa repercussão social.

1.6 DELIMITAÇÃO DA TESE

Entre as finalidades desta tese está a disponibilização de toda informação acerca da metodologia de proteção para implantação do sistema não convencional T2F. Esta informações devem ser utilizadas junto a análise técnica da rede proposta, uma vez que garantem a estreita relação sobre o quão apropriada é implantação da tecnologia T2F, para a con-

versão de sistemas monofásicos e bifásicos em sistemas trifásicos. Ou até mesmo para a construção de novas redes, a onde não se encontra viabilidade de construção de redes convencionais.

A técnica é contextualizada, explicada e justificada por meio de cenários de aplicação em um sistema real modelado e qualificado pela *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) qual é chamado de sistema 34 barras. Este sistema é amplamente utilizado para simulações e testes de sistemas elétricos de potência. O modelo IEEE 34 barras é um sistema de distribuição de energia elétrica que representa uma rede elétrica de modelo radial, com características como transformadores, linhas de transmissão, cargas e geradores. Ele é frequentemente usado como referência para estudos e simulações em engenharia elétrica.

Este sistema aplica transmissão de energia elétrica em baixa tensão, com tensões de 4,16kV e 12,47kV. O sistema é composto por 34 barras, 37 linhas de transmissão, 4 transformadores e 38 cargas. O modelo é amplamente utilizado para simulações e testes de sistemas elétricos de potência, permitindo a análise do desempenho da rede em diferentes condições operacionais. Qual utiliza modelo de redes trifásicas convencionais, bifásicas e monofásicas, representando uma rede elétrica típica.

Desta forma não faz parte do escopo deste trabalho, a análise de sistemas de transmissão de energia elétrica em alta tensão, como linhas de transmissão de 138kV ou 230kV. O foco principal é a aplicação do sistema T2F em redes de distribuição de energia elétrica, com ênfase na proteção e confiabilidade do sistema. Sendo estudado caso da aplicação do sistema T2F por meio de simulações e validações utilizando tecnologias de *Hardware-in-the-loop* (HIL) e simulações estáticas por meio de softwares de simulação como o *MATLAB/Simulink* e o *OpenDSS*.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 contém a revisão bibliográfica sobre métodos não tradicionais e alternativas ao sistema trifásico tais como Redes MRT, Para Raio Energizado (PRE), T2F.

No capítulo 3

O capítulo 4

No capítulo 5 é apresentada a conclusão da pesquisa e as propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A jornada da energia elétrica nas áreas rurais do Brasil começou aqui mesmo no Rio Grande do Sul. O primeiro passo foi dado em 1941, numa localidade que hoje pertence ao município de Erechim (na época, era o Oitavo Distrito de José Bonifácio). Uma Cooperativa instalou a rede para fornecer energia à sede de uma associação de colonização judaica (Jewish Colonization and Association) que já estava estabelecida na região desde 1911, conforme registros históricos (FECOERGS, 2016).

Muita coisa mudou e evoluiu nos sistemas de distribuição de energia desde aquele tempo, não só no Brasil mas no mundo todo. No entanto, quando olhamos para o campo brasileiro, a forma mais comum de levar eletricidade às propriedades ainda é através das redes monofásicas. Mesmo com toda a tecnologia disponível, fatores técnicos e principalmente os custos envolvidos ainda fazem com que essa seja a solução mais utilizada para as características do meio rural.

Entendendo esse contexto, desde o início histórico até a predominância atual das redes monofásicas, este capítulo vai agora detalhar as diferentes configurações de redes elétricas que existem. O foco será apresentar como essas diferentes formas são usadas para atender às necessidades de energia dos consumidores localizados nas áreas rurais.

2.2 REDES MONOFÁSICAS COM RETORNO POR TERRA (MRT)

Há mais de 70 anos, uma solução inteligente chamada MRT (Monofásico com Retorno pela Terra) tem sido usada para levar energia elétrica a áreas rurais em muitos países. A ideia surgiu graças a Mandeno (1947), na Nova Zelândia, com o objetivo claro de tornar mais barata a expansão das redes elétricas para o campo. Os estudos iniciais de Mandeno (1947) foram tão importantes que fizeram do MRT uma referência mundial para atender consumidores rurais. Internacionalmente, esse sistema também é conhecido como *SWER* (*Single Wire Earth Return*).

O sistema MRT usa basicamente um único fio condutor que pode se estender por dezenas ou até centenas de quilômetros. Ao longo desse condutor, vários transformadores são instalados para levar a energia às propriedades. A "mágica" acontece porque, em vez de um segundo condutor para o retorno da corrente elétrica, o sistema utiliza a própria terra. A corrente sai do condutor, passa pelo transformador, entra na terra através de uma

conexão com o aterramento e viaja de volta pelo solo até o ponto inicial da rede, fechando o circuito.

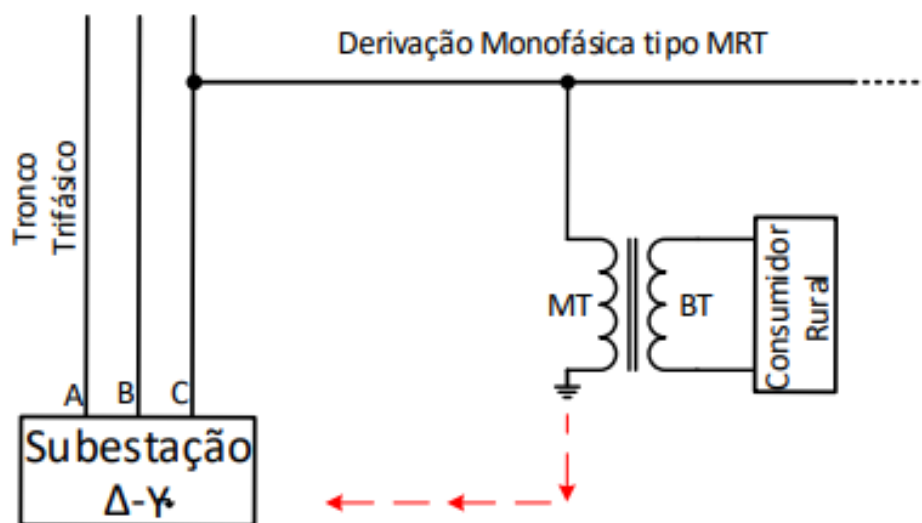
Mandeno (1947) desenvolveu os cálculos que provaram que usar a terra como condutor era viável. O sistema SWER/MRT foi criado para facilitar o acesso à eletricidade no campo. Sua grande vantagem, especialmente para as companhias de energia, é a construção muito mais simples e barata, afinal é apenas um único condutor. Isso tornou economicamente mais interessante levar energia a pequenos consumidores rurais que, de outra forma, talvez não fossem atendidos.

O MRT foi fundamental para melhorar a qualidade de vida em muitas áreas rurais isoladas. Até hoje, é uma técnica bastante usada no mundo. No entanto, com o avanço da tecnologia e da produção agrícola, a demanda por energia no campo aumentou. Muitos consumidores rurais agora precisam de mais potência do que o sistema MRT consegue fornecer facilmente. O problema é que atualizar essas redes para sistemas trifásicos convencionais ainda é muito caro, devido a necessidade básica de re-instalar os postes ao longo da rede qual se vai aplicar o Trifásico.

Aqui no Brasil, esse sistema ficou conhecido como MRT. Sua implementação foi incentivada pela Eletrobras, e normas técnicas nacionais surgiram por volta dos anos 80. Vale notar que algumas concessionárias, como a COPEL do estado do Paraná, já tinham suas próprias normas para o MRT desde a década de 70.

Geralmente, um sistema MRT não é totalmente independente. Ele é fazer derivação da rede, ou seja, pega-se de uma única fase de uma rede trifásica, qual já é existente, normalmente a que passa mais perto do ponto a ser atendido. Naturalmente esse sistema é limitado pelo seu aterramento, capacidade de corrente do fio condutor e dos transformadores instalados como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Rede Monofásica com Retorno por Terra (MRT).



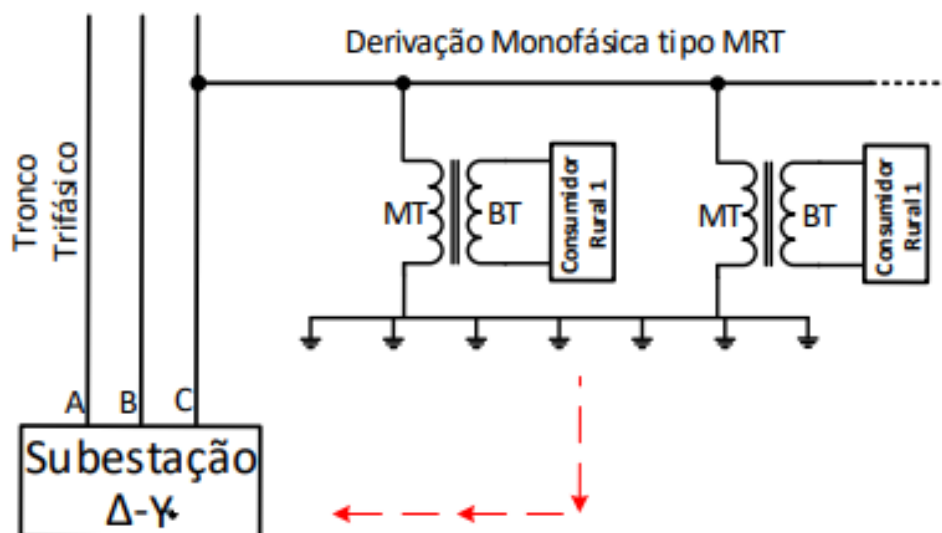
Fonte: Adaptado de (FANDI, 2013)

2.2.1 Redes Monofásicas com Retorno por Terra (MRT) Não Isoladas ou Neutro Parcial

As redes Monofásicas com Retorno pela Terra (MRT) são sistemas eletricamente não isolados, caracterizados por sua derivação direta de uma única fase de um alimentador trifásico. A funcionalidade do circuito de retorno via solo é dependente da configuração da subestação de origem, a qual deve possuir uma conexão em estrela com neutro solidamente aterrado. Nos transformadores de distribuição instalados ao longo da linha MRT, o enrolamento primário estabelece a conexão entre o condutor de fase e o sistema de aterramento local.

Embora esta topologia apresente vantagens significativas devido à sua simplicidade construtiva e operacional, sua aplicação exige uma análise criteriosa do balanceamento de fases na rede trifásica de suprimento. Tal avaliação é fundamental para prevenir a introdução de desequilíbrios de carga excessivos na rede originária. Como medida para assegurar a operação adequada e mitigar potenciais desequilíbrios, a potência instalada em ramais MRT é comumente limitada – um valor referencial frequentemente adotado é de 25 kVA. Adicionalmente, a performance e a segurança da topologia podem ser otimizadas através da implementação de múltiplos pontos de aterramento distribuídos ao longo do circuito conforme visto na Figura 2.

Figura 2 – Rede Monofilar com Retorno por Terra (MRT) com Neutro Parcial.



Fonte: Adaptado de (FANDI, 2013)

2.2.2 Redes Monofásicas com Retorno por Terra (MRT) com Transformador Isolador

Uma variante das redes Monofásicas com Retorno pela Terra (MRT) emprega um transformador isolador. Diferentemente da derivação direta de uma única fase, esta configuração é alimentada por duas fases da rede trifásica de suprimento. O transformador isolador, frequentemente com relação de espiras de 1:1, tem seu enrolamento primário conectado entre essas duas fases. O enrolamento secundário fornece uma única fase de saída e possui um terminal conectado a um sistema de aterramento local dedicado. Uma vantagem primordial desta topologia é a redução significativa do percurso da corrente de retorno pelo solo, confinando-a essencialmente ao circuito secundário do transformador isolador, o que contribui para a segurança operacional.

Adicionalmente, o uso do transformador isolador apresenta benefícios técnicos relevantes. Ele previne a dessensibilização dos dispositivos de proteção de neutro da rede trifásica principal (localizados a montante), garantindo que estes atuem corretamente para faltas fase-terra que ocorram fora do ramal MRT. Outra vantagem reside na possibilidade de um melhor controle de tensão no circuito monofásico, incluindo o ajuste fino através dos taps do próprio transformador isolador.

Entretanto, a implementação desta configuração acarreta desvantagens. Primeiramente, há um custo adicional associado tanto ao transformador isolador quanto ao seu sistema de aterramento específico. Do ponto de vista da proteção elétrica, o trecho MRT após o isolador torna-se uma "zona cega" (fora do alcance) para relés sensíveis a faltas para terra situados a montante do transformador. Consequentemente, a proteção para faltas internas nesse trecho depende primariamente de dispositivos de sobrecorrente de fase, também localizados a montante. Por fim, a complexidade do sistema é incrementada, especialmente no que concerne ao projeto e execução do aterramento do transformador isolador, o qual, dependendo de suas características, pode impor limitações à potência máxima transferível ao ramal monofásico.

2.2.3 Para Raio Energizado (PRE)

O sistema Monofásico com Retorno pela Terra (MRT), concebido por Mandeno (1947), não apenas solucionou desafios da época, mas também estimulou a pesquisa em novas tecnologias para transmissão e distribuição de energia elétrica. Inspirados por essa premissa, Iliceto et al. (1989) desenvolveram um sistema inovador denominado Para-Raios Energizado (PRE). A concepção original baseou-se na isolação e energização dos cabos para-raios (originalmente destinados apenas à proteção contra descargas atmosféricas) de uma linha de transmissão de 161 kV em Gana. O sistema PRE demonstrou flexibilidade, podendo operar em quatro configurações distintas.

As configurações descritas por Iliceto et al. (1989) são:

- **Monofásica com Retorno pelo Solo:** Apenas um cabo para-raios é energizado, utilizando o solo como caminho de retorno, similar ao MRT.
- **Monofásica com Retorno Metálico:** Ambos os cabos para-raios são energizados, um servindo como condutor de fase e o outro como retorno.
- **Trifásica em Delta Aberto:** Ambos os cabos são energizados, alimentando transformadores em conexão V (delta aberto) para cargas trifásicas, porém com limitações (tipicamente restrito a cargas fase-neutro).
- **Trifásica com Retorno pelo Solo:** Os dois cabos para-raios atuam como duas fases, e o solo é utilizado como terceiro condutor de fase. Esta configuração, apesar de apresentar complexidades relacionadas à impedância do solo e acoplamentos capacitivos entre condutores e solo, é considerada a mais adequada para o suprimento de cargas trifásicas.

O sistema PRE de Iliceto et al. (1989), derivado conceitualmente do MRT de Mandeno (1947), representa um avanço tecnológico significativo para atender à crescente demanda energética em áreas rurais próximas a linhas de transmissão existentes.

No Brasil, a quarta configuração do PRE (trifásica com retorno pelo solo) foi implementada no estado de Rondônia, através de um projeto colaborativo entre a Eletronorte e as Centrais Elétricas de Rondônia (Ceron). A análise dos dados operacionais deste sistema, realizada por Rose (1997), demonstrou sua viabilidade técnica e econômica como alternativa para a universalização do acesso à energia. O estudo concluiu que o PRE possibilita o fornecimento a pequenas comunidades ou cargas isoladas adjacentes às linhas de transmissão, onde a extensão de redes convencionais seria economicamente proibitiva.

Os resultados encorajadores do PRE Rondônia estimularam pesquisas complementares. Ramos (2010) conduziu um estudo detalhado sobre as interrupções do sistema, avaliando seu desempenho frente a descargas atmosféricas e estabelecendo índices operacionais específicos. Além disso, analisou o fenômeno da tensão induzida por acoplamento capacitivo e documentou a implementação de um regulador de tensão baseado em sintonização de ressonância para mitigar esse efeito. Em conjunto, os estudos de Rose (1997) e Ramos (2010) indicam que a tecnologia PRE, quando implementada segundo seus conceitos fundamentais, atende aos requisitos essenciais de qualidade e segurança para o fornecimento de energia elétrica.

2.2.4 Sistema Trifásico a Dois Fios (T2F)

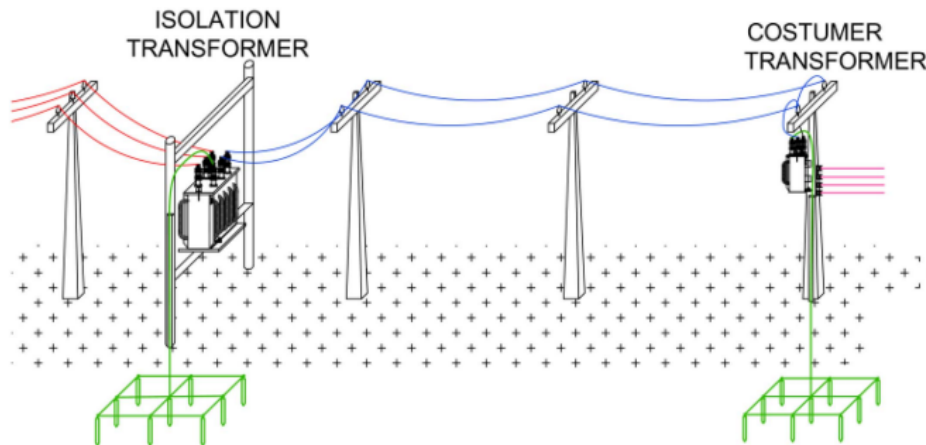
O sistema Monofásico com Retorno pela Terra (MRT) fundamenta-se na utilização de um único condutor aéreo para a fase, enquanto o retorno da corrente se efetua através de sistemas de aterramento localizados em cada ponto de transformação (transformador de distribuição). Esta configuração intrinsecamente simplifica a construção da rede, tornando-a mais rápida e economicamente vantajosa (KRÄULICH, 2024). As principais vantagens derivam dessa simplicidade: estações transformadoras menos complexas e de menor custo, transformadores com apenas uma bucha de alta tensão, e, consequentemente, a exigência de somente um para-raios e uma chave fusível monofásica por unidade transformadora.

Contudo, o cenário de aumento de carga nas propriedades rurais frequentemente impõe a necessidade de migração de sistemas monofásicos para trifásicos. A conversão de uma rede MRT existente para uma trifásica convencional representa um desafio considerável para as concessionárias. O custo elevado da construção de uma nova infraestrutura trifásica é um fator primordial, especialmente porque nem sempre é estruturalmente viável simplesmente adicionar dois condutores aéreos à estrutura de postes originalmente projetada para o sistema MRT.

Nesse contexto, o sistema Trifásico a Dois Fios (T2F) apresenta-se como uma alternativa tecnológica para a repotencialização de redes MRT. Uma característica chave do T2F é o aproveitamento da infraestrutura existente: ele utiliza um dos aterramentos já presentes na rede MRT e permite, em muitos casos, a manutenção da estrutura de postes. A adaptação envolve a instalação de um transformador isolador trifásico específico, que possui uma das fases secundárias aterrada e as outras duas conectadas aos condutores aéreos (o original e um adicional). Com isso, a estrutura básica do SWER/MRT pode ser mantida, necessitando apenas de um isolador e uma chave fusível adicionais em relação ao sistema monofásico original.

A implementação e operação do sistema T2F, esquematizado na Figura 3, demandam atenção a aspectos de segurança relacionados à injeção de corrente no solo, inerente ao seu princípio de funcionamento com retorno parcial ou total pela terra. É fundamental realizar análises de segurança contra choque elétrico, seguindo padrões internacionais como a norma IEEE Std 80. Esta norma estabelece metodologias para avaliar os gradientes de potencial gerados pelo fluxo de corrente no solo nas proximidades dos eletrodos de aterramento. O guia da IEEE aborda conceitos essenciais para essa avaliação, como a corrente máxima tolerável pelo corpo humano, cenários de aterramento acidental e os critérios para determinação das tensões de segurança toleráveis (tensões de toque e passo).

Figura 3 – Rede proposta por Marchesan.



Fonte: Adaptado de (MARCHESAN et al., 2023)

Embora o sistema Trifásico a Dois Fios (T2F) possua similaridades com outras tecnologias como o PRE, ele apresenta características particulares que são cruciais para sua correta implementação e operação, conforme destacado por Marchesan et al. (2023) pela Figura 3. Destacam-se os seguintes pontos:

- **Transformador de Isolação Mandatário:** A implementação do T2F requer obrigatoriamente um transformador de isolamento específico. Este atua como interface entre a rede de suprimento trifásica convencional e a linha T2F não convencional.
- **Configuração do Transformador:** O primário deste transformador é alimentado por tensão trifásica simétrica. No secundário, uma das três fases é solidamente aterrada no local, enquanto as outras duas fases são conectadas aos condutores aéreos da linha T2F.
- **Capacidade de Suprimento Trifásico:** O sistema T2F é capaz de suprir cargas trifásicas balanceadas (até 100% da capacidade) utilizando transformadores de distribuição Média Tensão/Baixa Tensão (MT/BT) convencionais, desde que estes possuam conexão primária em delta (ou outra que não exija neutro) e secundária em estrela-aterrada. Isso permite, por exemplo, a alimentação de motores de indução trifásicos de maior porte, essenciais para diversas atividades rurais.
- **Segurança do Aterramento:** A circulação de corrente pelo solo, inerente à topologia, exige um projeto criterioso do sistema de aterramento. É imperativo garantir a segurança de seres humanos e animais (controle de tensões de toque e passo), prevenir aquecimento excessivo do solo e evitar interferência eletromagnética em sistemas de comunicação adjacentes.

O objetivo primário da instalação do transformador isolador é isolar galvanicamente o circuito T2F da rede de alimentação principal. Essa isolação restringe a propagação de correntes de falta (especialmente as de sequência zero) para a rede a montante, o que facilita o controle das tensões de passo e de toque no trecho T2F durante condições anormais. Dada a criticidade do sistema de aterramento, recomenda-se o monitoramento periódico da sua integridade, tanto no ponto do transformador isolador quanto nos pontos de aterramento dos transformadores dos consumidores.

Finalmente, as condições de alimentação no primário do transformador isolador T2F são compatíveis com os níveis de tensão de média tensão (MT) padronizados e usualmente empregados pelas concessionárias para alimentar redes trifásicas convencionais em zonas rurais.

Segundo (MARCHESAN et al., 2023), qual consegue identificar em seu trabalho a aplicabilidade do sistema T2F, verificando o desequilíbrio de tensão através do espaçamento correto entre os condutores. Esse método visa eliminar a necessidade de compensação reativa em série, reduzindo assim o custo de instalação e manutenção do sistema. Com isso (MARCHESAN et al., 2023) afirma que pode-se utilizar o sistema com desequilíbrio geralmente menor que 2%, esse perfil qual atende os padrões de qualidade necessários.

Já (KRÄULICH et al., 2023) aponta a análise do custo aprofundada do T2F, demonstrando os custos de construção e operação do sistema, comparando com o sistema convencional. A tese descreve quatro tipos de comparativos sendo eles conversão de redes SWER existentes (com reutilização de materiais), construção de redes totalmente novas e conversão de redes bifásicas existentes, sempre comparando o T2F com o sistema trifásico convencional. Segundo (KRÄULICH, 2024) demonstra, que o sistema T2F é de fato mais barato que o sistema convencional, mesmo com a necessidade de um transformador isolador, o custo de instalação e operação do sistema é menor. Além desta informação (KRÄULICH, 2024) também demonstra que o valor do T2F, com tamanho mínimo entre 4 e 5 km, ainda é mais econômico quando construído do zero em relação ao sistema trifásico convencional.

Segundo (MARTINS, 2022) os potenciais perigosos de toque e passo, gerados por redes elétricas quais utilizam o solo como meio condutor, devem seguir a IEEE Std 80 (2015), qual o autor trabalhou de modo a revisar esta norma e aplicar os conceitos de segurança para o sistema T2F. Segundo (MARTINS, 2022) foi utilizado valores reais de resistividade do solo, de onde hoje é a primeira rede protótipo do sistema T2F, localizada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Também é demonstrado os potenciais gerados de toque e passo, para uma corrente de 10A, qual o sistema permanece seguro. Contudo o autor resalta que em tipos de solo diferentes, deve-se fazer uma nova análise de segurança, visto que a resistividade do solo pode variar muito entre regiões. Assim como recomenda-se a medição do sistema de forma continua para monitoramento dos valores

de resistividade do solo e do sistema de aterramento. Visto que esses valores podem variar conforme a umidade do solo, temperatura e outros fatores climáticos da sazonalidade encontrada na região.

Visto em (SILVEIRA et al., 2024) uma nova forma de abordagem para mitigação do desequilíbrio de tensão no sistema T2F, onde o autor propõe uma nova equação simplificada para calcular a compensação capacitiva linha-a-linha. O objetivo deste trabalho é minimizar o desequilíbrio de tensão através da introdução apenas dos elementos de impedâncias necessários, baseadas no construtivo da rede T2F. Além disso apresenta a metodologia computacional precisa para determinar os valores ótimos de impedância de compensação, visando garantir a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores. Segundo (SILVEIRA et al., 2024) a metodologia computacional proposta é eficaz na redução do desequilíbrio de tensão para redes T2F maiores de 50km. Sendo esse algoritmo proposto uma ferramenta útil para otimizar a compensação, onde o cálculo matemático simplificado pode ser menos preciso.

2.3 ELO FUSÍVEL

O elo fusível é um dispositivo de proteção utilizado em sistemas elétricos para interromper a corrente elétrica em caso de sobrecarga ou curto-circuito. Ele é projetado para se fundir e abrir o circuito quando a corrente ultrapassa um determinado limite, protegendo assim os equipamentos e os condutores contra danos.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL No 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021.** 2021.

_____. **RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL No 1.042, DE 20 DE SETEMBRO DE 2022.** 2022.

BORGES, P. et al. Repowering rural single-phase distribution network: A non-conventional proposal using two overhead wires and the ground as the third phase. **Electric Power Systems Research**, v. 150, p. 105–117, set. 2017. ISSN 03787796. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779617301876>.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2024.** 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>.

FANDI, J. Sistema de Distribuição de Energia Elétrica a Dois Condutores para Atendimento a Cargas Rurais Trifásicas. 2013.

FECOERGS. **História da Eletrificação Rural.** 2016. Disponível em: <https://www.fecoergs.com.br/pagina.php?cont=historiaEletrificacao>.

IEEE. **IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.** IEEE, 2015. ISBN: 9780738188508. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7109078/>.

ILICETO, F. et al. New concepts on MV distribution from insulated shield wires of HV lines: operation results of an experimental system and applications in Ghana. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 4, p. 2130–2144, out. 1989. ISSN 08858977. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/35640/>.

KRÄULICH, L. **ANÁLISE TÉCNICA E DE CUSTO-BENEFÍCIO DO SISTEMA NÃO CONVENCIONAL TRIFÁSICO A DOIS FIOS PARA A DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM MÉDIA TENSÃO NO MEIO RURAL.** 2024. Tese (Doutorado), 2024.

KRÄULICH, L. et al. Cost analysis for transforming rural electrical distribution networks into three-phase: Three-phase two-wire versus conventional three-phase. **Electric Power Systems Research**, v. 225, p. 109854, dez. 2023. ISSN 03787796. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779623007423>.

MANDENO, L. RURAL POWER SUPPLY, ESPECIALLY IN BACK COUNTRY AREAS. **RURAL POWER SUPPLY, ESPECIALLY IN BACK COUNTRY AREAS**, v. 33, 1947.

MARCHESAN, G. et al. Three-Phase-Two-Wire Rural Distribution Network: Influence of Design Characteristics on Voltage Unbalance. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 38, n. 1, p. 620–630, fev. 2023. ISSN 0885-8977, 1937-4208. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9851219/>.

MARTINS, M. S. **ANÁLISE DE POTENCIAIS PERIGOSOS GERADOS EM REDES ELÉTRICAS QUE USAM O SOLO COMO MEIO CONDUTOR.** 2022.

RAMOS, J. E. **Universalização da energia elétrica através da tecnologia cabos pára-raios energizados (PRE)**. abr. 2010. Tese (Doutorado em Energia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, abr. 2010. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-22082010-114031/>.

ROSE, E. H. **Alimentação de pequenas cargas ao longo de linhas de transmissão por meio de pára-raios energizados**. dez. 1997. Tese (Dissertação) — Universidade Federal de Itajubá, dez. 1997. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2923>.

SILVEIRA, L. et al. A new approach for mitigating voltage unbalance in a three-phase two-wire rural distribution network. **Electric Power Systems Research**, v. 237, p. 111042, dez. 2024. ISSN 03787796. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779624009283>.