

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

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
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20

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 (??) 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); PRO-DEEM (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.

Atualmente o programa Luz Para Todos, do Ministério de Minas e Energia (MME), atualmente 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 necessá-

rios 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 apresentar 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, 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 MOTIVAÇÃO

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>.

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

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