

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS - CAMPUS JATAÍ
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

FILIPPE SEGURADO DE FARIA

**ALOCÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EM REDE
DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO A INCERTEZA DAS
CARGAS ELÉTRICAS**

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Filipe Segurado de Faria

Matrícula: 20201020040130

Título do Trabalho: ALOCAÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO A INCERTEZA DAS CARGAS ELÉTRICAS.

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Jatui 20/02/25
Local Data

Filipe Segurado de Faria

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS - CAMPUS JATAÍ
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

FILIPPE SEGURADO DE FARIA

**ALOCÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EM REDE
DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO A INCERTEZA DAS
CARGAS ELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Jataí, como requisito para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Marcelo Semensato

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Faria, Filipe Segurado de.

Alocação ótima de dispositivos de proteção em rede de distribuição considerando a incerteza das cargas elétricas [manuscrito] / Filipe Segurado de Faria. - Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2025.

67 f.; il.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Semensato.
Bibliografias.

1. Algoritmo de otimização. 2. Dispositivos de proteção. 3. Distribuição de energia elétrica. 4. Energia não suprida. 5. Incerteza nas cargas elétricas. 5. Seletividade. I. Semensato, Marcelo. II. IFG, Câmpus Jataí. III. Título.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E
TECNOLOGICA INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS CÂMPUS JATAÍ

Folha de Aprovação

FILIPPE SEGURADO DE FARIA

ALOCÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO A INCERTEZA DAS CARGAS ELÉTRICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Monografia defendida e aprovada, em 06 de fevereiro de 2025, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Semensato
Presidente da banca / Orientadora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus Jataí

Prof. Dr. Fernando Silva Pereira
Membro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus Jataí

Prof. Dr. José Antônio Lambert
Membro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus Jataí

Jataí – GO
2025

Documento assinado eletronicamente por:

- Jose Antonio Lambert, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 19/02/2025 23:33:10.
- Fernando Silva Pereira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/02/2025 20:42:45.
- Marcelo Semensato, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 13/02/2025 22:21:22.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/02/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 614916

Código de Autenticação: 3a8664754e



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Av. Presidente Juscelino Kubitschek,, 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714
(64) 3514-9579 (ramal: 9579)

AGRADECIMENTOS

Filipe Segurado de Faria:

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder forças, sabedoria e perseverança ao longo de toda esta jornada. Sua orientação foi essencial para que eu superasse os desafios e conquistasse esta etapa.

Aos meus pais, Werlen de Souza e Silva e Mércia Felizarda de Faria Silva, meu eterno agradecimento pelo amor incondicional, apoio constante e confiança. Sem vocês, não teria chegado até aqui. Vocês são a base que me sustenta e me impulsiona a sempre seguir em frente.

Aos meus amigos e colegas de curso, agradeço pela parceria, pelas trocas de experiências e pelas horas de estudo compartilhadas.

Ao meu irmão, Paulo Segurado, sou imensamente grato não apenas por sua presença como irmão, mas também por ser um grande amigo e parceiro.

À minha avó, Raimunda de Souza, que é um pilar fundamental da minha família. Sua força, carinho e sabedoria sempre foram uma fonte de inspiração para mim.

À minha namorada, Cellynna Victória, agradeço profundamente por sua paciência, amor e incentivo inabaláveis. Sua confiança e apoio foram fundamentais para que eu mantivesse o foco e a motivação durante toda a conclusão deste trabalho.

Aos meus primos, que me auxiliaram com tanto carinho durante a minha mudança e estadia em Jataí, agradeço pela generosidade e pela amizade, que tornaram esse período mais leve e agradável.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Marcelo Semensato, pela orientação valiosa, paciência e pelos ensinamentos que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência e dedicação foram cruciais para que eu pudesse alcançar este objetivo.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste TCC. Cada apoio, gesto de carinho e palavra de incentivo foi importante para que eu pudesse chegar até aqui.

"Porque Deus amou o mundo de tal maneira que deu o seu Filho unigênito, para que todo aquele que nele crê não pereça, mas tenha a vida eterna."

João 3:16

RESUMO

A proposta do trabalho é a alocação de dispositivos de proteção na rede de distribuição de energia elétrica de 134 barras para otimizar a confiabilidade da rede em caso de faltas. O objetivo é minimizar a soma dos custos da Energia Não Suprida (ENS) devido às faltas permanentes, os custos devido às faltas temporárias e os custos dos dispositivos de proteção. Um índice de confiabilidade da rede de distribuição é a ENS calculada durante a falta na rede, quanto menor este índice mais confiável é a proteção. A ENS é o custo da interrupção de energia elétrica para a concessionária de energia por causa das faltas na rede elétrica. A proteção é alocada na rede para um horizonte de um ano, sendo os dispositivos de proteção dimensionados para a carga elétrica do último ano. A incerteza das cargas na rede é dada pela curva normal de distribuição cujo valor médio é a potência ativa média consumida em uma determinada barra. A seletividade é garantida pelos fusíveis alocados nos ramos do alimentador principal (alimentadores secundários), portanto, as faltas permanentes são interrompidas pelo dispositivo mais próximo a montante da falta. Apenas religadores automáticos são alocados no alimentador principal e um fusível é obrigatoriamente alocado no início dos ramos secundários. No projeto é considerada a falta temporária e a falta permanente. Na falta temporária é considerada uma penalidade ou custo, para penalizar o religamento (transitório) das cargas elétricas localizadas após o religador e justificar a alocação de religadores, além do localizado na subestação de energia, já que as faltas temporárias são a grande maioria na rede. Os estudos deste trabalho ajudará a concessionária de energia elétrica local na alocação otimizada de dispositivos de proteção com confiabilidade e redução dos custos.

Palavras-chave: Algoritmo de Otimização; Dispositivos de proteção; Distribuição de energia elétrica; Energia Não Suprida; Incerteza nas cargas elétricas; Seletividade.

ABSTRACT

The purpose of this work is to allocate protection devices in a 134-bus electrical distribution network to optimize grid reliability in the event of faults. The objective is to minimize the sum of the costs of Unsupplied Energy (ENS) due to permanent faults, the costs due to temporary faults, and the costs of protection devices. An index of reliability of the distribution network is the ENS calculated during a fault in the grid; the lower this index, the more reliable the protection. The ENS is the cost of the interruption of electrical power to the energy provider due to faults in the electrical grid. The protection is allocated in the grid for a one-year horizon, with the protection devices being sized for the electrical load of the last year. The uncertainty of the loads in the grid is given by the normal distribution curve whose average value is the average active power consumed in a given bar. Selectivity is guaranteed by the fuses allocated in the branches of the main feeder (secondary feeders), therefore, permanent faults are interrupted by the device closest to the upstream of the fault. Only automatic reclosers are allocated to the main feeder and a fuse is mandatory allocated at the beginning of the secondary branches. The project considers temporary and permanent faults. In the case of temporary faults, a penalty or cost is considered to penalize the (transient) reconnection of electrical loads located after the recloser and justify the allocation of reclosers, in addition to the one located at the power substation, since temporary faults are the vast majority in the network. The studies in this work will help the local electric power utility in the optimized allocation of protection devices with reliability and cost reduction.

Keywords: Optimization Algorithm; protective devices; Distribution of electrical energy; Unsupplied Energy; Uncertainty in electrical loads; Selectivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Problemas de qualidade de energia elétrica	26
Figura 2 - Curto fase-terra	28
Figura 3 - Curto dupla fase com impedância entre fases	29
Figura 4 - Curto dupla-fase-terra.....	30
Figura 5 - Curto trifásico	31
Figura 6 - Coordenação fusível-fusível	37
Figura 7 - Coordenação entre os tempos de operação da característica 50 dos relés/religadores	38
Figura 8 - Representação de uma função hipotética com um máximo local e outro global	40
Figura 9 - Estrutura de funcionamento de um AG tradicional.....	41
Figura 10 - Rede de distribuição de 134 barras	43
Figura 11 - Indivíduo gerado.....	46
Figura 12 - Representação do indivíduo alocado.....	46
Figura 13 - Indivíduo gerado conforme o caso 1.....	47
Figura 14 - Indivíduo gerado conforme o caso 2.....	47
Figura 15 - Indivíduo gerado conforme o caso 3.....	48
Figura 16 - Representação do indivíduo ótimo de acordo com o AG	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correntes elétricas dos religadores.....	49
Tabela 2 - Valores para dimensionamento dos religadores	49
Tabela 3 - Características elétricas dos religadores.....	50
Tabela 4 - Correntes elétricas dos fusíveis	51
Tabela 5 - Valores para dimensionamento dos fusíveis	52
Tabela 6 - Valores preferenciais para fusíveis tipo K	53
Tabela 7 - Dimensionamento dos fusíveis	53
Tabela 8 - Dados de linha do sistema de 134 barras	58
Tabela 9 - Dados de barra do sistema de 134 barras	63

LISTA DE SIGLAS

%	Porcentagem;
A	Ampère;
AG	Algoritmo Genético;
CA	Cabo de Alumínio;
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de Aço;
COM	Component Object Model;
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz;
DEC	Duração Equivalente de Interrupção de Carga;
DLL	Biblioteca de Vínculo Dinâmico;
ENS	Energia Não Suprida;
EQTL	Equatorial Energia;
FDP	Função de Densidade de Probabilidade;
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção de Carga;
h	Hora;
INBRAEP	Instituto Brasileiro de Ensino Profissionalizante;
km	Quilômetro;
kV	Quilovolt;
kVA	Quilovolt-ampère;
kVAr	Quilovolt-ampère-reativo;
m	Metro;
Min	Minutos;
MW	Megawatt;
MWh	Megawatt-hora;
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora;
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico;
P	Potência Ativa;
PU	Por Unidade;
Q	Potência Reativa;
s	Segundos;
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica;
SEP	Sistema Elétrico de Potência;
SMC	Simulação Monte Carlo;
UPS	Uninterruptible Power Supply;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL.....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	19
2.1.1 CIRCUITOS TRIFÁSICOS	20
2.1.2 GRANDEZAS DE UM SISTEMA ELÉTRICO.....	21
2.1.3 SISTEMAS DE VALORES POR UNIDADE (PU).....	21
2.2 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	22
2.2.1 NÍVEIS DE TENSÃO DE DISTRIBUIÇÃO	22
2.2.2 REDE DE DISTRIBUIÇÃO AÉREA	22
2.2.3 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO.....	23
2.3 QUALIDADE DE ENERGIA	24
2.3.1 CURTO-CIRCUITO	26
2.3.2 CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO	27
2.3.3 CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO	28
2.3.4 CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO-TERRA	29
2.3.5 CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO	30
2.3.6 CURTO-CIRCUITO PROBABILÍSTICO.....	32
2.3.7 MÉTODO MONTE CARLO	32
2.4 INDICADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA.....	33
2.4.1 ENERGIA NÃO SUPRIDA (ENS).....	33
2.4.2 FREQUÊNCIA EQUIVALENTE DE INTERRUPÇÃO DE CARGA (FEC)	33
2.4.3 DURAÇÃO EQUIVALENTE DE INTERRUPÇÃO DE CARGA (DEC)	33
2.5 INTERRUPÇÃO DE ENERGIA	34
2.5.1 INTERRUPÇÃO TEMPORÁRIA	34
2.5.2 INTERRUPÇÃO PERMANENTE	34
2.6 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO.....	34
2.6.1 FUSÍVEIS	35
2.6.2 RELIGADORES AUTOMÁTICOS.....	35
2.7 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE.....	36
2.7.1 SELETIVIDADE ENTRE ELOS FUSÍVEIS.....	36
2.7.2 COORDENAÇÃO FUSÍVEL-FUSÍVEL	37
2.7.3 COORDENAÇÃO RELÉ/RELIGADOR-RELÉ/RELIGADOR.....	38
2.8 SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	39
2.8.1 OPENDSS	39
2.9 SISTEMA DE COMPUTAÇÃO NUMÉRICA.....	39
2.9.1 SOFTWARE MATLAB	39
2.9.2 USOS GERAIS DO MATLAB	40

2.10	ALGORITMO GENÉTICO.....	40
2.10.1	DEFINIÇÃO	40
2.10.2	ESTRUTURA BÁSICA.....	41
3	METODOLOGIA.....	42
3.1	REDE ELÉTRICA UTILIZADA	42
3.2	DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO CUSTO	43
3.3	APLICAÇÃO AO PROBLEMA.....	45
4	RESULTADOS	47
4.1	DIMENSIONAMENTO DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	48
4.1.1	DIMENSIONAMENTO DOS RELIGADORES.....	49
4.1.2	DIMENSIONAMENTO DOS FUSÍVEIS.....	50
5	CONCLUSÃO.....	55
6	REFERÊNCIAS	56
	ANEXO A	58
	ANEXO B	63

1 INTRODUÇÃO

A dependência da sociedade moderna em relação à energia elétrica é evidente em praticamente todos os aspectos da vida cotidiana. Desde o funcionamento de residências e indústrias até a comunicação e o transporte, a eletricidade é uma força motriz que sustenta o desenvolvimento econômico e o bem-estar social. A iluminação das cidades, a operação de dispositivos eletrônicos e o funcionamento de serviços essenciais, como hospitais e sistemas de abastecimento de água, revelam como a eletricidade se tornou uma necessidade básica. Além disso, a crescente digitalização e a ascensão das tecnologias inteligentes ampliam ainda mais essa dependência, tornando a interrupção do fornecimento elétrico um desafio significativo que pode impactar a segurança e a qualidade de vida das pessoas. Em suma, a energia elétrica é um pilar fundamental da sociedade contemporânea, cuja ausência acarretaria consequências profundas e abrangentes.

De acordo com Kagan; Oliveira; Robba, (2005) os sistemas elétricos de potência têm a principal função de fornecer energia elétrica aos consumidores, sejam eles grandes ou pequenos, com a qualidade apropriada e no momento em que for necessário. Como o armazenamento de energia não é viável, o sistema deve ter capacidade suficiente de produção e transporte para atender ao fornecimento de energia em um determinado período e à demanda máxima instantânea de potência ativa. Portanto, é essencial ter sistemas de controle da produção para garantir que, a cada momento, seja gerada a quantidade necessária para atender à demanda e às perdas.

No entanto a alocação ótima de dispositivos de proteção nas redes de distribuição apresenta uma série de desafios complexos, decorrentes da necessidade de equilibrar segurança, eficiência e custo. Esses dispositivos, essenciais para minimizar danos em caso de curtos-circuitos ou sobrecargas, devem ser posicionados de maneira estratégica para garantir uma resposta rápida e eficaz a incidentes. Porém, a variabilidade das cargas elétricas, a topologia das redes e a crescente integração de fontes de energia renováveis complicam ainda mais essa tarefa. Além disso, as limitações orçamentárias e a necessidade de minimizar interrupções no fornecimento de energia tornam a busca por uma solução ideal ainda mais desafiadora. Assim, a alocação eficiente desses dispositivos exige uma abordagem multidisciplinar, que combine técnicas avançadas de modelagem, simulações e análises de risco, visando

não apenas a proteção da infraestrutura elétrica, mas também a continuidade do serviço para os consumidores.

Este trabalho aborda esses desafios no intuito da minimização dos custos operacionais em uma rede de distribuição elétrica de 134 barras sem a integração de geradores distribuídos. O fluxo de potência e os curtos-circuitos na rede elétrica serão calculados pelo *software* OpenDSS.

Em busca de sustentação para a proposta foi realizada análise da base bibliográfica sobre o tema. Pois segundo Sato; Freitas, (2015) o objetivo de um sistema de potência é fornecer energia elétrica a uma variedade de locais para diferentes usos. Esse sistema deve ser planejado e gerido de maneira a garantir que a energia seja entregue de acordo com dois princípios fundamentais: qualidade e economia. Embora esses princípios possam parecer opostos, é possível conciliá-los através de conhecimento técnico e bom senso.

1.1 OBJETIVO GERAL

Propor uma metodologia para minimizar os custos de energia não suprida e dos dispositivos alocados, em uma rede de distribuição elétrica de 134 barras, por meio da alocação ótima de fusíveis e religadores automáticos, considerando a incerteza das cargas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Ademais, o presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Alocar religadores automáticos e fusíveis na rede de distribuição, garantindo a seletividade entre os dispositivos instalados.
- Desenvolver um plano de alocação com um horizonte de um ano, considerando as incertezas da carga elétrica.
- Simular e analisar os resultados da alocação dos dispositivos de proteção na rede elétrica local, identificando melhorias na confiabilidade e eficiência.
- Compreender e aplicar o conceito de confiabilidade em redes de distribuição de energia elétrica, avaliando o impacto das alocações propostas.
- Dimensionar corretamente os dispositivos de proteção a serem

alocados, levando em consideração as características específicas da rede.

- Realizar estudos de fluxo de potência e análise de curto-circuito na rede local de 134 barras.
- Implementar o algoritmo genético para encontrar a melhor solução na alocação dos dispositivos de proteção, considerando as variáveis da rede.
- Promover um estudo que favoreça a parceria entre o Instituto e a concessionária de energia elétrica, visando aumentar a confiabilidade da rede elétrica de distribuição.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em quatro etapas principais, estruturadas objetivando o alcance dos objetivos aos quais este se propõe, tão como o alcance de respostas às questões identificadas na pesquisa.

Inicialmente, na seção de Fundamentação Teórica, serão abordados os conceitos e princípios fundamentais relacionados à alocação de dispositivos de proteção em redes de distribuição elétrica. Serão discutidos os principais tipos de dispositivos, como religadores automáticos e fusíveis, além da importância da seletividade e confiabilidade nas operações da rede. Também serão exploradas as teorias relacionadas ao fluxo de potência, estudos de curto-circuito e a utilização de algoritmos de otimização, como o algoritmo genético, para resolver problemas complexos na alocação de dispositivos. Essa fundamentação teórica servirá como base para a análise e interpretação dos dados obtidos nas etapas seguintes.

Em seguida, a metodologia descreverá o passo a passo da pesquisa, incluindo a definição do escopo do estudo e a escolha da rede elétrica de 134 barras como objeto de análise. Serão detalhados os procedimentos utilizados para a simulação e análise da alocação dos dispositivos, bem como a abordagem para o dimensionamento adequado dos mesmos, assim como a implementação do algoritmo genético. Esta seção também incluirá a descrição das ferramentas e *softwares* utilizados para a realização dos estudos de fluxo de potência e curto-circuito. As incertezas relacionadas à carga elétrica e seu impacto na alocação serão consideradas nesta fase.

Na seção de resultados, serão apresentados os resultados obtidos a partir das simulações e análises realizadas. Esta seção será dividida em subcapítulos que tratarão da alocação inicial dos dispositivos, das simulações realizadas e dos dados coletados. Os resultados serão comparados com as expectativas teóricas e discutidos em relação à confiabilidade da rede. Além disso, serão representações visuais que auxiliarão na interpretação dos dados. Essa análise crítica permitirá a identificação de oportunidades de melhoria e ajustes na alocação dos dispositivos.

Finalizando o presente, o capítulo de conclusões sintetizará os principais achados da pesquisa, refletindo sobre a eficácia da alocação dos dispositivos de proteção na rede de distribuição estudada. Serão discutidas as implicações dos resultados para a confiabilidade e eficiência da rede elétrica, assim como as contribuições do trabalho para a área de engenharia elétrica. Além disso, serão apresentadas recomendações para futuros estudos e a importância da parceria entre instituições acadêmicas e empresas do setor elétrico. As conclusões buscarão evidenciar a relevância do trabalho e sua aplicação prática, destacando o potencial impacto na melhoria da infraestrutura elétrica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este trabalho se justifica pela análise da vasta literatura disponível sobre temas essenciais, como a importância da continuidade da energia e os resultados da descontinuidade do fornecimento de energia. Esses fatores estão transformando o panorama do sistema elétrico de potência (SEP), o que tem impulsionado estudos recentes. A fundamentação teórica do estudo se baseia em autores amplamente citados na área, garantindo a relevância e a consistência da pesquisa.

2.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

De acordo com Bichels, (2018) o aumento da demanda por cargas e a necessidade de geradores com maior potência, tornou-se essencial desenvolver usinas hidrelétricas ou termelétricas em locais mais distantes, o que exigiu maiores investimentos e custos. Esse cenário incentivou os potenciais consumidores próximos a esses projetos a se unirem para aproveitar as vantagens de escala, garantindo um fornecimento mais confiável devido à conexão entre os centros de consumo e as usinas. Isso marcou o início de um sistema elétrico, que, desde essa fase, exigiu a

unificação da frequência e a padronização das tensões para viabilizar as interconexões e reduzir custos.

Segundo Sato; Freitas, (2015) embora o sistema interligado exija um planejamento e operação mais complexos e possa levar à propagação de distúrbios locais para outras partes da rede, ele oferece várias vantagens que superam esses desafios. Entre essas vantagens estão o aumento no número de unidades geradoras, a redução da necessidade de capacidade de reserva para emergências e a possibilidade de intercâmbio de energia entre regiões com diferentes padrões sazonais. Essa abordagem é amplamente utilizada em todo o mundo e foi implementada no Brasil no final da década de 1950.

Portanto um Sistema Elétrico de Potência (SEP) bem projetado deve cumprir três requisitos fundamentais: primeiro, deve garantir uma operação adequada em condições normais, sem interrupções no fornecimento, curtos-circuitos ou desligamentos. Em segundo lugar, é essencial a prevenção de falhas, o que envolve a manutenção eficiente de equipamentos e instalações, bem como a substituição de componentes desgastados ou danificados. Por fim, é importante a mitigação dos impactos de falhas, de modo que suas consequências sejam minimizadas ou inexistentes, evitando que se propaguem por todo o sistema e causem interrupções significativas, como apagões, com danos graves BICHELS, (2018).

2.1.1 CIRCUITOS TRIFÁSICOS

Segundo Oliveira *et al.*, (2000), as primeiras linhas de transmissão de energia elétrica surgiram no final do século XIX, inicialmente destinadas apenas ao fornecimento de sistemas de iluminação. Com a introdução de motores elétricos, as "companhias de luz" passaram a se transformar em "companhias de força e luz". Esses sistemas operavam com baixa tensão e corrente contínua, sendo rapidamente substituídos por linhas monofásicas de corrente alternada. A mudança se deveu a vários fatores, como: (i) a introdução de transformadores, que permitiram a transmissão de energia elétrica em tensões muito maiores do que as usadas na geração e na carga, reduzindo as perdas e possibilitando a transmissão a longas distâncias; e (ii) o desenvolvimento de geradores e motores de corrente alternada, que são mais simples e mais econômicos do que os de corrente contínua. Entre os sistemas de corrente alternada, o trifásico tornou-se o mais eficiente tanto técnica

quanto economicamente. Assim, tornou-se o padrão para geração, transmissão e distribuição de energia em corrente alternada. Em sistemas trifásicos, as cargas podem ser trifásicas ou monofásicas. As cargas trifásicas geralmente são equilibradas, por outro lado, as cargas monofásicas, podem causar desequilíbrios no sistema, resultando em cargas trifásicas desequilibradas.

2.1.2 GRANDEZAS DE UM SISTEMA ELÉTRICO

Na análise de circuitos elétricos em regime permanente, geralmente se utiliza de redes que possuem impedâncias fixas e conhecidas, tensões ou correntes fixas e conhecidas, resultando em um sistema linear de equações possibilitando encontrar correntes ou tensões do sistema. No entanto, ao resolver uma rede elétrica no contexto de um problema de fluxo de potência, a abordagem é um pouco diferente (ZANETTA JÚNIOR, 2005).

2.1.3 SISTEMAS DE VALORES POR UNIDADE (PU)

Conforme Oliveira *et al.*, (2000) os valores percentuais e os valores por unidade, conhecidos também como valores pu, representam uma alteração na escala das grandezas principais em sistemas elétricos, como tensão, corrente, potência e impedância. Essa abordagem simplifica significativamente o cálculo das redes, especialmente quando transformadores estão presentes nos sistemas analisados.

De acordo com Sato; Freitas, (2015) algumas das vantagens deste método são:

- A impedância em valor por unidade (pu) de um transformador permanece constante, independentemente de estar no lado de alta ou baixa tensão.
- A impedância em valor pu de um transformador trifásico (ou de um banco de transformadores monofásicos) não varia com o tipo de conexão.
- O método pu não depende dos níveis de tensão e do deslocamento angular através de transformadores, uma vez que as tensões base nos enrolamentos são proporcionais ao número de espiras.
- Os fabricantes geralmente especificam a impedância dos equipamentos em pu ou em %, com base em seus dados nominais (potência em kVA ou MVA e tensão em kV). Assim, a impedância nominal pode ser usada diretamente se as bases escolhidas forem os valores nominais.
- Os valores das impedâncias em pu para equipamentos de diferentes

capacidades variam dentro de uma faixa estreita, enquanto os valores em ohms podem variar bastante; portanto, mesmo sem conhecer os valores reais de um equipamento, os valores pu podem ser estimados com boa precisão.

- Reduz-se a possibilidade de confundir potências monofásicas e trifásicas, ou tensões de linha e de fase.
- O método pu ou % é utilizado para simular comportamentos em regime permanente e transitório de sistemas de potência em computadores digitais.

2.2 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

2.2.1 NÍVEIS DE TENSÃO DE DISTRIBUIÇÃO

Conforme Barros; Borelli; Gedra, (2014) as redes de distribuição englobam circuitos de média e baixa tensão, e apresentam diferentes níveis de tensão, que podem variar conforme a região. Os valores mais frequentes nas redes de distribuição primária incluem: 11,9 kV, 13,2 kV, 13,8 kV, 20 kV e 34,5 kV .

2.2.2 REDE DE DISTRIBUIÇÃO AÉREA

Segundo INBRAEP, (2022) as redes de distribuição aéreas, sustentadas por postes e comuns em ruas e avenidas das cidades brasileiras, podem ser classificadas em três tipos:

- Rede de Distribuição Aérea Convencional: É formada por condutores nus de alumínio, que são apoiados em isoladores de vidro ou porcelana e fixados a cruzetas de madeira ou concreto, podendo operar em circuitos de alta ou baixa tensão.
- Rede de Distribuição Aérea Compacta: Ao contrário da convencional, essa rede é composta por um cabo de aço, conhecido como cabo mensageiro, e cabos cobertos ou protegidos, que são fixados em estruturas com braços metálicos, espaçadores losangulares ou separadores de fase feitos de material polimérico. Embora os condutores protegidos sejam revestidos, eles não são eletricamente isolados, pois não confinam o campo elétrico.
- Rede de Distribuição Aérea Isolada: Utiliza três condutores isolados, trançados e agrupados ao redor de um cabo mensageiro neutro que suporta a estrutura. Esses condutores possuem camadas semicondutoras e são conhecidos como

cabos multiplexados. Diferente da rede compacta, esses cabos são bem protegidos e isolam o campo elétrico internamente.

As redes aéreas são montadas com postes de concreto em áreas urbanas e de madeira tratada em zonas rurais. No topo dos postes, há uma cruzeta, geralmente de madeira e com cerca de dois metros de comprimento, onde são fixados os isoladores de pino. Os condutores usados podem ser de alumínio com núcleo de aço (CAA), apenas de alumínio (CA), nus ou protegidos, e em alguns casos, condutores de cobre são empregados. Os cabos protegidos têm uma capa externa isolante para evitar contato acidental com objetos, como galhos de árvores, mas não isolam os condutores em si. Com o avanço tecnológico, a cruzeta tem sido substituída por estruturas isolantes, como o sistema *spacer cable*, que suporta os cabos protegidos. Esse novo tipo de construção é mais caro por quilômetro em comparação ao método anterior, mas oferece a vantagem de reduzir significativamente a taxa de falhas e permite a passagem da linha por áreas onde a linha convencional com cruzeta não seria viável devido a obstáculos (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

2.2.3 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

A maneira como os componentes elétricos estão conectados e a configuração da rede elétrica têm um impacto significativo nos cálculos de curto-circuito e nos esquemas de proteção (SATO; FREITAS, 2015).

- **Configuração Em Anel:** As redes de distribuição em anel são um tipo de sistema de distribuição de energia elétrica ou dados, onde os componentes da rede formam um circuito fechado, permitindo que a energia ou os dados circulem em ambas as direções ao longo do anel. Essa estrutura oferece maior confiabilidade, pois, se ocorrer uma falha em um ponto da rede, a corrente ou o sinal pode ser redirecionado pela outra direção do anel, minimizando interrupções no serviço. Esse tipo de rede é amplamente utilizado em áreas com grande demanda por alta disponibilidade, como em sistemas de telecomunicações e em redes de distribuição de energia elétrica em zonas urbanas. Além de melhorar a robustez, as redes em anel também permitem um controle mais eficiente do tráfego e uma distribuição de energia mais equilibrada, reduzindo a carga nos pontos críticos da rede.

- **Configuração Radial:** Um sistema radial é uma configuração em que uma única fonte de energia alimenta várias cargas, sendo frequentemente usado em sistemas de distribuição. A construção deste tipo de sistema é relativamente barata, mas sua confiabilidade é limitada, pois a falha da fonte resulta na interrupção do fornecimento de energia para todos os consumidores. Em termos de proteção, um sistema radial é menos complexo, já que a corrente de curto-circuito flui sempre na mesma direção, ou seja, da fonte até o ponto onde ocorre a falha.

2.3 QUALIDADE DE ENERGIA

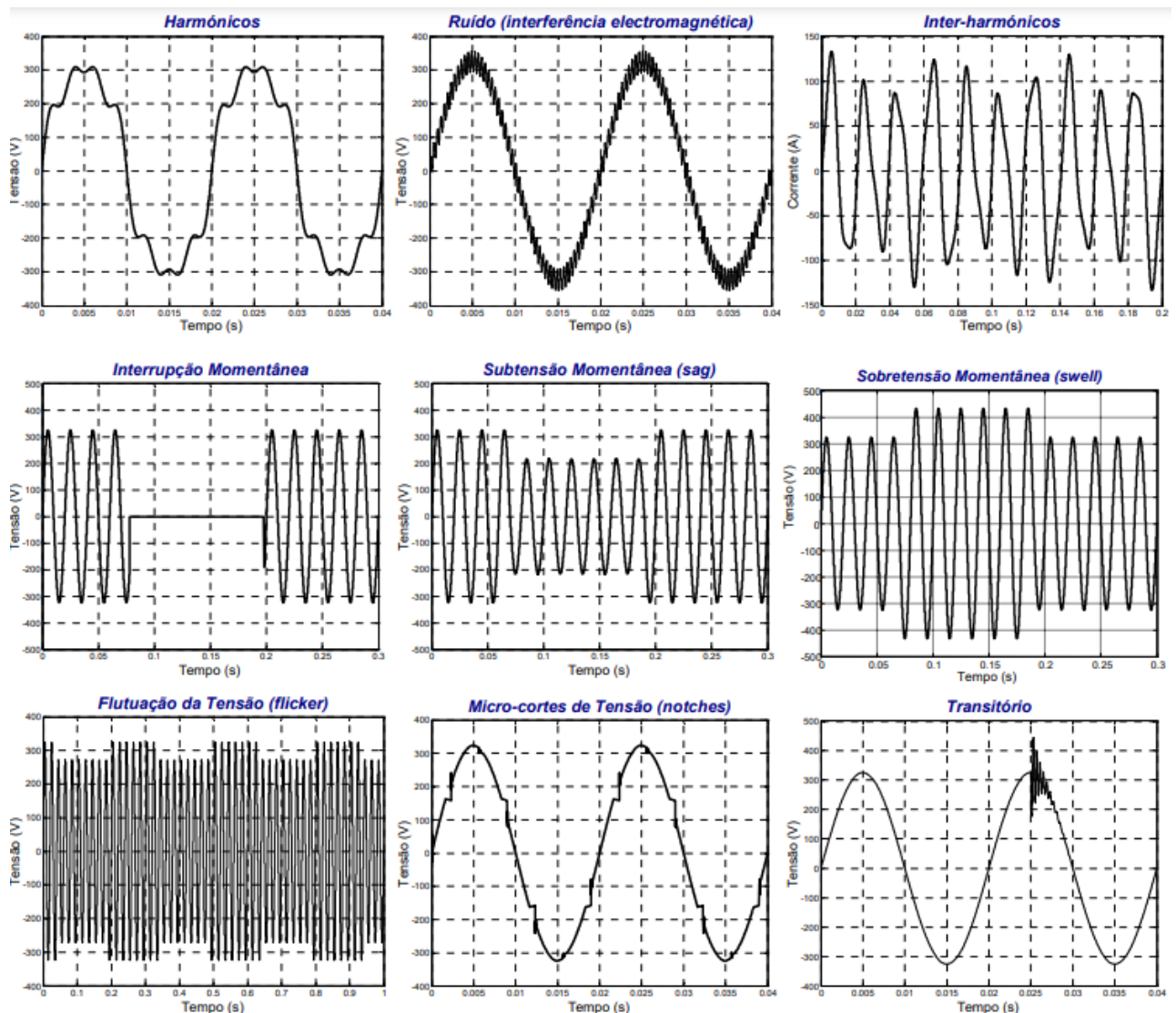
Conforme Martinho, (2009) a qualidade da energia elétrica é um conceito abrangente que se relaciona com várias áreas do sistema elétrico, abrangendo desde a geração, transmissão e distribuição até o consumo. Ela envolve problemas que podem afetar o funcionamento de equipamentos, comunicação, telefonia, dados, entre outros. Em essência, o termo refere-se a qualquer variação na amplitude, frequência ou deformação da forma de onda das grandezas elétricas, tanto em condições transitórias quanto permanentes, que possa causar falhas ou mau funcionamento dos equipamentos elétricos.

Na visão de Afonso; Martins, (2003) dentre os problemas relacionados à qualidade da energia, a interrupção do fornecimento é, sem dúvida, o mais grave, pois afeta todos os equipamentos conectados à rede elétrica, exceto aqueles alimentados por sistemas de alimentação ininterrupta (UPS) ou geradores de emergência. No entanto, outros problemas de qualidade de energia, como os mencionados a seguir e ilustrados na figura 1, podem não apenas causar o funcionamento inadequado de alguns equipamentos, mas também danificá-los, sendo elas:

- **Distorção harmônica:** ocorre quando cargas não lineares estão conectadas à rede elétrica, fazendo com que a corrente nas linhas contenha harmônicos. As quedas de tensão causadas por esses harmônicos nas impedâncias das linhas distorcem também as tensões de alimentação.
- **Ruído (interferência eletromagnética):** refere-se ao ruído eletromagnético de alta frequência, frequentemente gerado pelas comutações rápidas de conversores eletrônicos de potência.

- Inter-harmônicos: surgem quando há componentes de corrente que não estão associadas à componente fundamental (50 Hz), podendo ser gerados por fornos a arco ou cicloconvertidores (equipamentos que, alimentados por 50 Hz, geram tensões e correntes de saída com frequência inferior).
- Interrupção momentânea: acontece, por exemplo, quando um sistema elétrico utiliza disjuntores com religador, que abrem no momento de um curto-circuito e se fecham automaticamente após alguns milissegundos, permanecendo fechados se o curto-circuito for extinto.
- Subtensão momentânea (*voltage sag*): também chamada de "cava de tensão", pode ser causada por um curto-circuito temporário em outro alimentador do mesmo sistema elétrico, que é corrigido após alguns milissegundos com a abertura do disjuntor do ramal em curto.
- Sobretenção momentânea (*voltage swell*): pode ser ocasionada por falhas ou operações de comutação de equipamentos conectados à rede elétrica.
- Flutuação da tensão (*flicker*): ocorre devido a variações intermitentes de determinadas cargas, gerando flutuações nas tensões de alimentação, o que pode resultar em oscilações na intensidade da iluminação elétrica.
- Micro-cortes de tensão (*notches*): são causados por curto-circuitos momentâneos que acontecem durante os intervalos de comutação dos semicondutores de potência dos retificadores.
- Transitórios: surgem devido a fenômenos transitórios, como a comutação de bancos de condensadores ou descargas atmosféricas.

Figura 1 - Problemas de qualidade de energia elétrica



Fonte: (AFONSO; MARTINS, 2003)

Portanto a qualidade da energia está diretamente relacionada às alterações no padrão de energia gerada, ou seja, às mudanças na onda senoidal de frequência constante (60 Hz no Brasil). Essas alterações podem afetar a amplitude e a frequência da energia, manifestando-se através de interrupções, ruídos, distúrbios, ou a presença de frequências diferentes da fundamental (60 Hz)(MARTINHO, 2009).

2.3.1 CURTO-CIRCUITO

Segundo Sato; Freitas, (2015) os sistemas de potência frequentemente

enfrentam eventos que causam perturbações em seu funcionamento normal, resultando em alterações nas grandezas elétricas, como corrente, tensão, frequência e potências. Essas perturbações podem provocar violações significativas das restrições operativas e comprometer a integridade dos equipamentos e das instalações. Para mitigar ou solucionar os efeitos desses distúrbios, são necessárias ações preventivas e/ou corretivas.

Entre as perturbações mais comuns e severas estão os curtos-circuitos, que ocorrem devido à descargas atmosféricas, queda de árvores sobre a linha, falta do isolamento entre as fases ou entre uma fase e a terra, além de entre outros motivos. A intensidade da corrente de curto-circuito é influenciada por diversos fatores, como o tipo de curto-circuito, a capacidade de geração do sistema, a configuração da rede elétrica (SATO; FREITAS, 2015).

Na visão de Kagan; Oliveira; Robba, (2005) o estudo de curto-circuito tem como principal objetivo calcular as correntes e tensões em um sistema elétrico de potência quando ocorre um defeito em algum de seus pontos. Determinar as sobrecorrentes e sobretensões é crucial para:

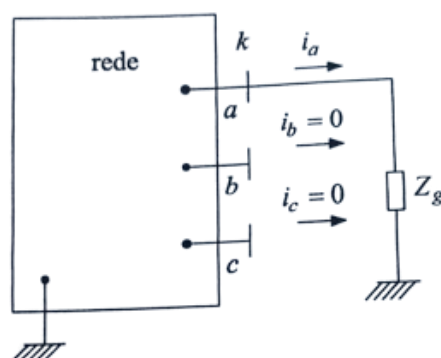
- Proteger os componentes do sistema, como transformadores e linhas, contra sobrecorrentes.
- Especificar adequadamente os equipamentos de proteção, como disjuntores, relés e fusíveis.
- Garantir a segurança das pessoas, especialmente em casos de defeitos que envolvem a terra.
- Analisar as sobretensões que surgem no sistema durante curtos-circuitos, especialmente em relação ao rompimento das isolação dos equipamentos.

2.3.2 CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO

Um curto-circuito monofásico é um tipo de falha elétrica que ocorre em sistemas elétricos e envolve a conexão direta de um condutor ativo (fase) com o condutor neutro ou com a terra, criando um caminho de baixa resistência para a corrente elétrica. Isso resulta em um fluxo de corrente elétrica alto, o que pode causar sérios danos ao sistema elétrico, como sobrecarga dos componentes e risco de incêndios.

A figura 2 é a representação de um curto-circuito monofásico.

Figura 2 - Curto fase-terra



Fonte: (ZANETTA JÚNIOR,2005)

a – Fase a

i_a – Corrente da fase a

b – Fase b

i_b – Corrente da fase b

c – Fase c

i_c – Corrente da fase c

k – Nó genérico

Z_g – Impedância de Falta

A corrente de curto-circuito fase-terra é expressa pela equação (1):

$$I_{ccft} = \frac{3\dot{E}_a}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + 3\dot{Z}_g} \quad (1)$$

Onde:

I_{ccft} – Corrente de curto-circuito fase-terra ;

$\dot{E}_a$ – Tensão pré-falta;

$\dot{Z}_0$ – Impedância associada ao gerador e a rede, de sequência nula;

$\dot{Z}_1$ – Impedância associada ao gerador e a rede, de sequência positiva;

$\dot{Z}_2$ – Impedância associada ao gerador e a rede, de sequência negativa;

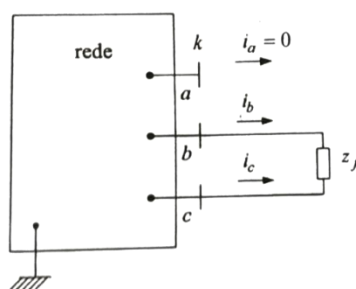
$\dot{Z}_g$ – Impedância de falta.

2.3.3 CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO

Um curto-circuito bifásico ocorre em sistemas elétricos bifásicos, onde há duas fases de corrente alternada. Esse tipo de curto-circuito envolve um contato entre as duas fases, criando um caminho de baixa resistência para a corrente elétrica, resultando em um fluxo de corrente muito maior do que o nominal.

A figura 3 é a representação de um curto-circuito bifásico.

Figura 3 - Curto dupla fase com impedância entre fases



Fonte: (ZANETTA JÚNIOR,2005)

a – Fase a	i_a – Corrente da fase a
b – Fase b	i_b – Corrente da fase b
c – Fase c	i_c – Corrente da fase c
k – Nó genérico	Z_f – Impedância de Falta

A corrente de curto-circuito bifásico é expressa pela equação (2):

$$I_{ccff} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2)$$

Onde:

I_{ccff} – Corrente de curto-circuito bifásica ;

E_a – Tensão pré-falta;

Z_1 – Impedância associada ao gerador e a rede, de sequência positiva;

Z_2 – Impedância associada ao gerador e a rede, de sequência negativa;

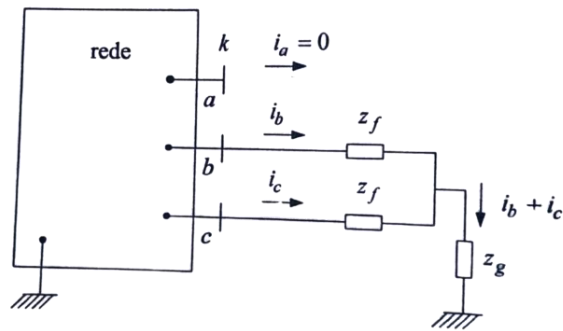
Z_f – Impedância de falta.

2.3.4 CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO-TERRA

O curto-circuito bifásico-terra é uma falha elétrica que ocorre em sistemas bifásicos, onde há duas fases de corrente alternada, e envolve a interação simultânea das duas fases com a terra. Esse tipo de curto-circuito ocorre quando as duas fases entram em contato com a terra (ou qualquer condutor aterrado), criando um caminho de baixa resistência para a corrente elétrica, o que resulta em um aumento significativo da corrente no circuito.

A figura 4 é a representação de um curto-circuito bifásico-terra.

Figura 4 - Curto dupla-fase-terra



Fonte: (ZANETTA JÚNIOR,2005)

a – Fase a

b – Fase b

c – Fase c

k – Nó genérico

Z_f – Impedância associada ao gerador e a rede

i_a – Corrente da fase a

i_b – Corrente da fase b

i_c – Corrente da fase c

$i_b + i_c$ – Corrente da fase b + Corrente da fase c

Z_g – Impedância de Falta

A corrente de curto-circuito bifásico-terra é expressa pela equação (3):

$$I_{ccfft} = \frac{\dot{E}_a}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 // (3\dot{Z}_g + \dot{Z}_0)} \quad (3)$$

Onde:

I_{ccfft} – Corrente de curto-circuito bifásica-terra ;

$\dot{E}_a$ – Tensão pré-falta;

$\dot{Z}_0$ – Impedância associada ao gerador e a rede, de sequência nula;

$\dot{Z}_1$ – Impedância associada ao gerador e a rede, de sequência positiva;

$\dot{Z}_2$ – Impedância associada ao gerador e a rede, de sequência negativa;

$\dot{Z}_g$ – Impedância de falta.

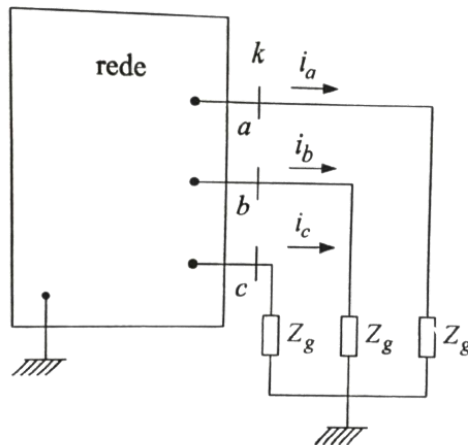
2.3.5 CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

Um curto-circuito trifásico ocorre em sistemas elétricos e envolvem a interação entre as três fases de corrente alternada do sistema. Esse tipo de curto-circuito acontece quando as três fases entram em contato entre si ou com um condutor de terra ou neutro, criando um caminho de baixa resistência para a corrente elétrica, o

que resulta em um aumento muito significativo da corrente no circuito. Esse tipo de falha é considerado um dos mais graves em sistemas trifásicos.

A figura 5 é a representação de um curto-circuito trifásico.

Figura 5 - Curto trifásico



Fonte: (ZANETTA JÚNIOR,2005)

a – Fase a

b – Fase b

c – Fase c

k – Nó genérico

i_a – Corrente da fase a

i_b – Corrente da fase b

i_c – Corrente da fase c

Z_g – Impedância de Falta

A corrente de curto-circuito trifásico é expressa pela equação (4):

$$I_{cc3f} = \frac{\dot{E}_a}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_g} \quad (4)$$

Onde:

I_{cc3f} – Corrente de curto-circuito trifásica;

$\dot{E}_a$ – Tensão pré-falta;

$\dot{Z}_1$ – Impedância associada ao gerador e a rede, de sequência positiva;

$\dot{Z}_g$ – Impedância de falta.

2.3.6 CURTO-CIRCUITO PROBABILÍSTICO

Conforme Sato; Freitas, (2015) as correntes de curto-circuito são afetadas por diversos fatores, alguns dos quais são constantes e outros que variam de forma imprevisível. Portanto, as correntes de curto-circuito dependem principalmente de:

- Características estruturais do sistema, como as impedâncias dos diferentes componentes e os comprimentos das linhas de transmissão, que são geralmente bem conhecidas e permanecem constantes.
- Características operacionais do sistema, que são determinadas pelo nível de carga e pela configuração da rede no momento do curto-circuito. Assim, o número de geradores, transformadores e linhas de transmissão em operação pode variar aleatoriamente.
- Tipo, duração e localização do curto-circuito, que também podem variar de forma imprevisível.

2.3.7 MÉTODO MONTE CARLO

O método de Simulação Monte Carlo (SMC) é amplamente utilizado na literatura para modelar as incertezas nos componentes de um sistema. Nesse método, todas as variáveis relevantes que apresentam algum nível de incerteza são associadas a uma Função de Densidade de Probabilidade (FDP). A partir dessas FDPs, são gerados números aleatórios que representam os possíveis estados do sistema. Em seguida, o fluxo de potência determinístico é calculado para cada um dos valores aleatórios obtidos (SOUZA *et al.*, 2020).

2.4 INDICADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA

2.4.1 ENERGIA NÃO SUPRIDA (ENS)

O indicador de energia não suprida (ENS) mede a continuidade do fornecimento de energia para os consumidores. Em termos de qualidade de energia elétrica, a ENS é uma métrica diretamente relacionada à confiabilidade do sistema elétrico. Ela reflete o impacto das falhas no fornecimento e é expressa em termos de energia(geralmente em MWh ou kWh) não entregue durante um período específico (ONS, 2024).

Podendo ser expresso pela equação (5).

$$ENS = \sum_{i=1}^n P_i * t_i \quad (5)$$

Onde:

P_i – É a potência não suprida durante uma interrupção i ;

t_i – É a duração da interrupção i ;

n – É o número total de interrupções.

2.4.2 FREQUÊNCIA EQUIVALENTE DE INTERRUPÇÃO DE CARGA (FEC)

A frequência equivalente de interrupção de carga (FEC) é um indicador de confiabilidade do sistema elétrico que mede o número de interrupções que afetam os consumidores conectados a uma determinada carga durante um período específico. Ele é utilizado para avaliar a frequência com que os consumidores sofrem interrupções no fornecimento de energia elétrica (ONS, 2024).

Podendo ser expresso pela equação (6).

$$FEC = \frac{\text{Número total de interrupções}}{\text{Número total de consumidores atendidos}} \quad (6)$$

2.4.3 DURAÇÃO EQUIVALENTE DE INTERRUPÇÃO DE CARGA (DEC)

O DEC (duração equivalente de interrupção de carga) é um indicador de confiabilidade do sistema elétrico que mede o tempo médio acumulado, em horas, durante o qual os consumidores ficaram sem o fornecimento de energia em um determinado período. Ele avalia o impacto da duração das interrupções sobre os

consumidores, sendo uma métrica fundamental para a qualidade do fornecimento de energia (ONS, 2024).

Podendo ser expresso pela equação (7).

$$DEC = \frac{\text{Soma das durações das interrupções}}{\text{Número total de consumidores atendidos}} \quad (7)$$

2.5 INTERRUPÇÃO DE ENERGIA

De acordo com Rodrigues; Mantovani, (2020) grande parte das interrupções no sistema de energia são atribuídas a falhas que ocorrem no sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE), sendo essas falhas classificadas como permanentes ou temporárias.

2.5.1 INTERRUPÇÃO TEMPORÁRIA

Para falhas temporárias, o dispositivo de proteção também entra em ação, mas o defeito na rede se resolve rapidamente. Quando o dispositivo de proteção, que possui a função de religamento, retorna ao seu estado normal, o fornecimento de energia elétrica é automaticamente restabelecido (RODRIGUES; MANTOVANI, 2020).

2.5.2 INTERRUPÇÃO PERMANENTE

Quando ocorre uma falha permanente, o dispositivo de proteção age isolando a parte do sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE) afetada pela falha. Após isolar a seção com problema, o sistema é restaurado, minimizando os impactos da falha no fornecimento de energia (RODRIGUES; MANTOVANI, 2020).

2.6 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

De acordo com Mamede Filho; Mamede, (2013) a função primordial de um sistema de proteção é garantir a desconexão total do sistema elétrico sempre que ele apresentar anormalidades que o façam operar fora dos limites estabelecidos, ou de uma parte dele. Em segundo plano, o sistema de proteção deve fornecer as

informações necessárias para que os operadores possam identificar os defeitos e proceder com a recuperação adequada.

2.6.1 FUSÍVEIS

Conforme Rodrigues; Mantovani, (2020) dispositivo de proteção mais comum para sistemas radiais é frequentemente utilizado em conjunto com uma chave fusível. Quando a corrente que passa por ele excede sua capacidade de interrupção, o fusível se rompe, e geralmente a chave fusível se desarma, o que facilita a identificação do fusível queimado e a localização do problema. Em circunstâncias especiais, as chaves fusíveis podem ser usadas como interruptores manuais, mas neste contexto elas são usadas exclusivamente para proteção. O fusível mais usado em sistemas de distribuição possui uma curva de atuação do tipo K (ação rápida).

Conforme Conceição, (2018) os valores nominais dos fusíveis são definidos com base em dois critérios. O primeiro utiliza 1,5 vezes a corrente de carga para escolher fusíveis adequados e coordena-os com os religadores a montante. E o segundo critério, ajusta o valor nominal usando 25% da corrente mínima de falta à terra. Fusíveis com valores mais altos favorecem a coordenação, enquanto o critério da corrente máxima assegura a sensibilidade da proteção. Isto é representado pela equação (8):

$$1,5 * I_{carga} \leq I_{elo} \leq 0,25 * I_{CC\ ft\ mín} \quad (8)$$

Onde:

I_{carga} - corrente nominal de operação (A);

I_{elo} - corrente nominal de fusão do elo fusível (A);

$I_{CC\ ft\ mín}$ - mínimo valor de corrente de curto-circuito fase-terra do ramo protegido (A).

2.6.2 RELIGADORES AUTOMÁTICOS

O religador automático é um dispositivo de proteção que pode realizar

manobras e detectar sobrecargas tanto entre fases quanto fase-terra. Ele interrompe o fluxo de corrente nas seções a jusante onde está instalado por um período predefinido. Após esse tempo, o religador restabelece a corrente e monitora se a sobrecarga persiste. Se o curto-circuito continuar, o religador tenta restabelecer a corrente novamente até atingir o número máximo de operações instantâneas definido. Se o problema não for resolvido, o religador muda para uma curva de operação mais lenta até interromper definitivamente o fluxo de corrente, seja através de um fusível de proteção ou do próprio religador. Essa característica é particularmente útil para minimizar perdas de carga em seções do sistema de distribuição elétrica com alta frequência de faltas temporárias, especialmente entre fases e terra (RODRIGUES; MANTOVANI, 2020).

Sendo assim Conceição, (2018) diz que a corrente de operação fase-fase é estabelecida como o dobro do valor da corrente de carga no ramal de instalação do religador, enquanto as correntes de operação fase-terra dos religadores são determinadas com base na corrente de carga no ponto de instalação do equipamento.

2.7 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE

De acordo com CPFL, (2016) a finalidade da coordenação é prevenir que falhas temporárias acionem dispositivos de proteção que não possuem religamento automático e, em caso de falhas permanentes, garantir que apenas a menor parte possível da rede seja desligada. Por outro lado, a finalidade da seletividade é assegurar que o equipamento de proteção mais próximo ao local do defeito seja ativado, independentemente de a falha ser temporária ou permanente.

2.7.1 SELETIVIDADE ENTRE ELOS FUSÍVEIS

Segundo CPFL, (2016) e conforme a NBR 7282, a seletividade entre dois fusíveis em série é assegurada se o tempo de interrupção do fusível protetor (o que está mais distante da subestação e que deve queimar em caso de falha) for, no máximo, 75% do tempo mínimo necessário para a fusão do fusível protegido (o que está mais próximo da subestação e que não deve queimar).

2.7.2 COORDENAÇÃO FUSÍVEL-FUSÍVEL

Conforme Conceição, (2018) considerando uma falha na zona de proteção do dispositivo protetor *FU2*, verifica-se que a coordenação entre os fusíveis *FU1* e *FU2* ocorre quando a corrente de falha, representada pela interseção da curva máxima de interrupção de *FU2* com a curva mínima de fusão de *FU1* multiplicada por 0,75, é atingida. Esse critério é modelado matematicamente pela equação (9).

$$t_{FU2}^{MI}(I_{FU2}^{CC}) \leq 0,75t_{FU1}^{MF}(I_{FU2}^{CC}) \quad (9)$$

Onde:

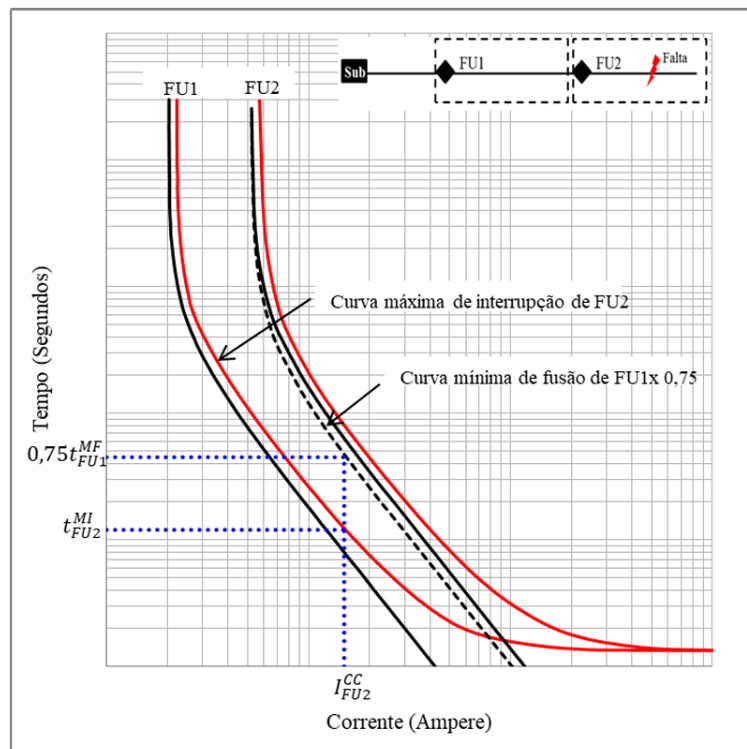
t_{FU2}^{MI} - tempo máximo de interrupção do fusível primário *FU2* (s);

I_{FU2}^{CC} - maior corrente de curto-circuito de fase-fase ou fase-terra na zona de proteção de *FU2*(A);

t_{FU1}^{MF} - tempo mínimo de fusão do fusível de retaguarda *FU1* (s).

A figura 6 mostra as curvas de atuação de *FU1* e *FU2*.

Figura 6 - Coordenação fusível-fusível

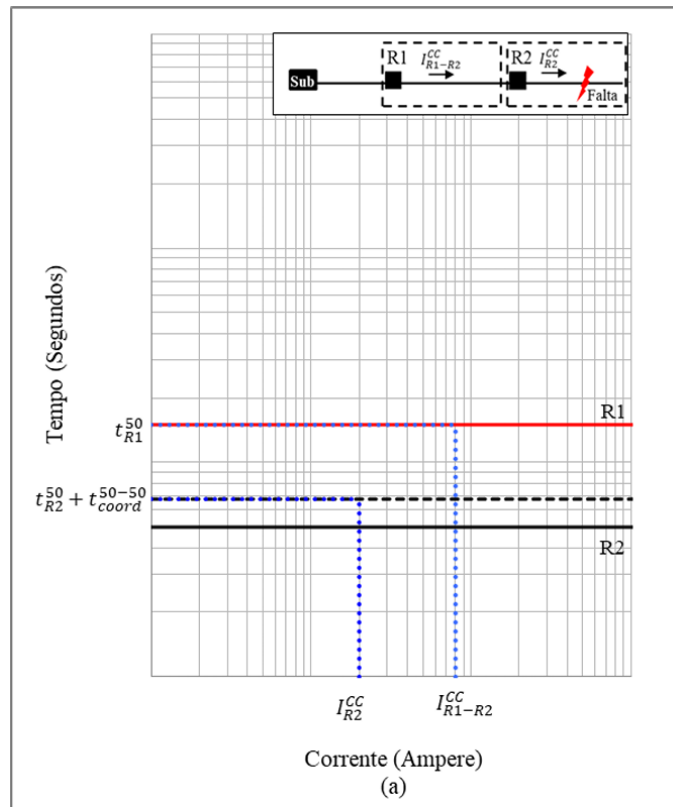


Fonte: (CONCEIÇÃO, 2018)

2.7.3 COORDENAÇÃO RELÉ/RELIGADOR-RELÉ/RELIGADOR

Assim como Conceição, (2018) a coordenação entre os religadores/relés é obtida ao se manter uma margem de tempo entre suas curvas de operação, funcionando como uma tolerância para os erros relacionados aos transformadores de corrente, ao tempo de resposta dos dispositivos e à eliminação da falha. É essencial garantir que a coordenação entre os religadores/relés seja eficaz em uma rede, e independentemente da localização dos dispositivos, seja a montante, a jusante ou entre os dispositivos coordenados, como ilustrado na figura 7 .

Figura 7 - Coordenação entre os tempos de operação da característica 50 dos relés/reliadores



Fonte: (CONCEIÇÃO, 2018)

Observa-se que, havendo coordenação entre R1 e R2, a ocorrência de uma falta permanente na zona de proteção de R2, leva à operação de R1—50 após as duas operações de R1—50 . Este critério é expresso matematicamente pela equação (10).

$$t_{R1}^{50}(I_{R1-R2}^{CC}) \geq t_{R2}^{50}(I_{R2}^{CC}) + t_{coord}^{50-50} \quad (10)$$

Onde:

t_{R1}^{50} - tempo de operação na característica 50 do religador R1 (s);

t_{R2}^{50} - tempo de operação na característica 50 do religador R2 (s);

I_{R1-R2}^{CC} - corrente de curto-circuito que ocorre na seção do R2 mas sensibiliza o religador R1 (A);

I_{R2}^{CC} - corrente de curto-circuito que sensibiliza o religador R2 (A);

t_{coord}^{50-50} - tempo de coordenação entre as características 50 dos religadores (s).

2.8 SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.8.1 OPENDSS

O *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS) é um *software* projetado para simular sistemas elétricos de distribuição de energia. O OpenDSS está disponível em duas versões: uma como um programa executável independente e outra como um servidor COM (*Component Object Model*) desenvolvido a partir de uma DLL. A versão independente inclui uma interface de usuário que facilita a descrição de circuitos, a resolução de problemas e a visualização dos resultados. Por outro lado, a versão baseada em servidor COM permite que o OpenDSS seja controlado por diversas plataformas de *software* existentes (SEXAUER, 2016).

De acordo com Sexauer, (2016) abaixo estão os principais modos de solução disponíveis no OpenDSS:

- Fluxo de potência instantâneo
- Fluxo de potência diário
- Fluxo de potência anual
- Análise harmônica
- Análise dinâmica
- Estudo de curto-circuitos

2.9 SISTEMA DE COMPUTAÇÃO NUMÉRICA

2.9.1 SOFTWARE MATLAB

MATLAB é uma linguagem de programação de alto desempenho voltada para computação técnica. Ela combina computação, visualização e programação em um ambiente intuitivo onde problemas e soluções são expressos em notação matemática

familiar (MATHWORKS, 2024).

2.9.2 USOS GERAIS DO MATLAB

De acordo com Mathworks, (2024) os usos comuns do MATLAB incluem:

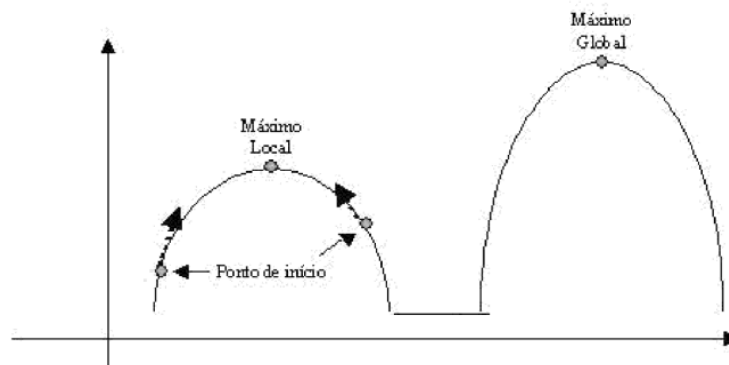
- Matemática e cálculos.
- Desenvolvimento de algoritmos.
- Modelagem, simulação e prototipagem.
- Análise, exploração e visualização de dados.
- Criação de gráficos científicos e de engenharia.
- Desenvolvimento de aplicativos, incluindo a criação de interfaces gráficas de usuário.

2.10 ALGORITMO GENÉTICO

2.10.1 DEFINIÇÃO

Para Linden, (2008) Algoritmos genéticos (AGs) são uma categoria de algoritmos evolucionários e, portanto, podem ser descritos como uma técnica de busca inspirada na metáfora do processo biológico de evolução natural. Esses algoritmos são abordagens heurísticas para otimização global. Os AGs se distinguem de métodos como a subida de gradiente, que seguem a derivada de uma função para encontrar o máximo, pois podem facilmente ficar presos em máximos locais, como ilustrado na figura 8.

Figura 8 - Representação de uma função hipotética com um máximo local e outro global



Fonte: (LINDEN, 2008)

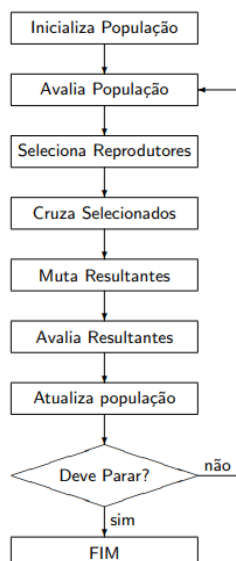
2.10.2 ESTRUTURA BÁSICA

Conforme Lucas, (2002) um algoritmo genético funciona criando uma população inicial de possíveis soluções para o problema em questão. Em seguida, essa população passa por um processo de evolução composto pelas seguintes etapas:

- Avaliação: a aptidão de cada solução (indivíduo da população) é analisada para determinar como elas atendem ao problema proposto.
- Seleção: indivíduos são escolhidos para reprodução com base em sua aptidão, sendo que a probabilidade de uma solução ser selecionada é proporcional à sua qualidade.
- Cruzamento: características das soluções selecionadas são combinadas para criar novos indivíduos.
- Mutação: algumas características dos indivíduos resultantes da reprodução são alteradas, introduzindo diversidade na população.
- Atualização: os novos indivíduos gerados são incorporados à população existente.
- Finalização: verifica se as condições de término da evolução foram atendidas; se não, o processo retorna à etapa de avaliação, e se sim, a execução é encerrada.

A figura 9 ilustra a estrutura de um AG tradicional.

Figura 9 - Estrutura de funcionamento de um AG tradicional



Fonte: (LUCAS, 2002)

3 METODOLOGIA

A proteção da rede elétrica deve ser capaz de identificar e atuar tanto em falhas temporárias quanto em falhas permanentes, garantindo a estabilidade do sistema. Para isso, os religadores são posicionados estrategicamente no alimentador principal, enquanto os fusíveis são utilizados nos ramais secundários, evitando que problemas temporários no alimentador principal resultem em danos aos fusíveis. A instalação obrigatória de fusíveis no ponto de origem de cada ramal secundário, aliada ao uso de religadores no início do alimentador principal, tem como objetivo proporcionar uma proteção adicional, aumentando a segurança e a confiabilidade da rede, minimizando interrupções no fornecimento de energia.

O fluxo de potência na rede de distribuição é calculado utilizando o *software* OpenDSS, enquanto o algoritmo genético (AG) para alocar os dispositivos de proteção nas barras da rede é desenvolvido no MatLab. O objetivo que o AG busca minimizar, é composta pelo custo da ENS e pelos custos dos dispositivos de proteção (religador e fusível). O melhor resultado é alcançado após um número definido de iterações do algoritmo, com a simulação representando um período de um ano (CARNEIRO, 2019).

Uma vez que a carga máxima consumida em uma residência pode variar conforme os dias da semana, a incerteza nas cargas elétricas conectadas à rede é considerada por meio de variações de 20% nas cargas: 100%, 90% e 80%. A probabilidade de ocorrência de cada cenário varia: o primeiro, com 100% da carga, tem 50% de chance; o segundo, com 90%, tem 25%, e o terceiro, com 80%, também ocorre com 25% de probabilidade (LAUTENSCHLEGER, 2018).

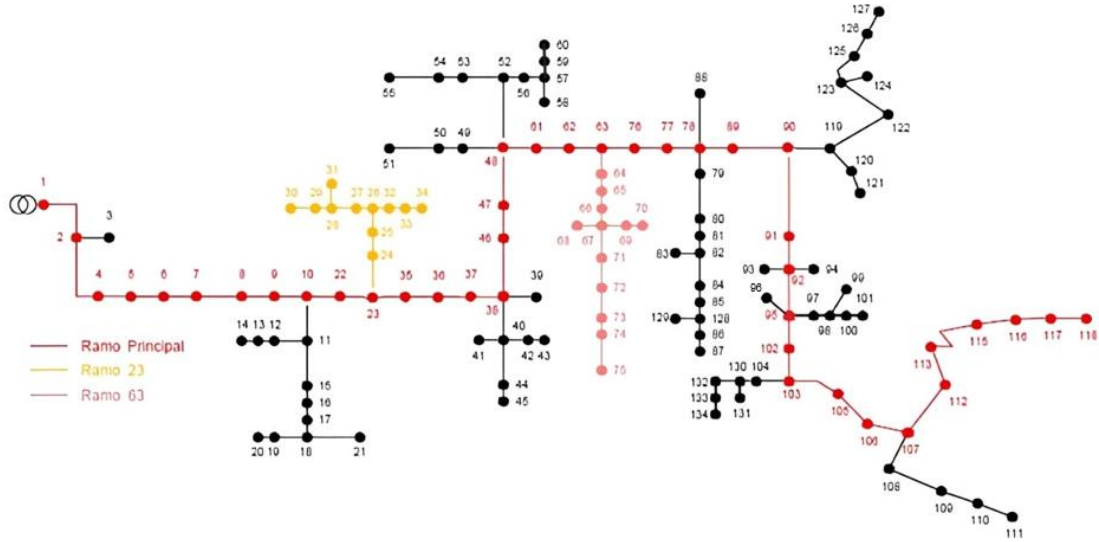
3.1 REDE ELÉTRICA UTILIZADA

A rede elétrica de distribuição, 13,8 kV, de 134 barras utilizada no estudo representa uma configuração complexa e abrangente, com múltiplos pontos de conexão e distribuição de energia. Cada barra na rede serve como um ponto de interligação de cargas, permitindo uma análise detalhada do fluxo de energia, das tensões e das correntes em diversos pontos da rede. O estudo com essa rede possibilita uma avaliação aprofundada de parâmetros como estabilidade, capacidade de distribuição e confiabilidade do sistema elétrico, simulando diferentes cenários operacionais, falhas e ajustes na configuração para otimizar o desempenho da rede e garantir a continuidade

do fornecimento de energia.

A rede elétrica utilizada se trata de um sistema real (CRUZ, 2016), distribuído de forma radial e aérea. A figura 10 demonstra a configuração desta rede:

Figura 10 - Rede de distribuição de 134 barras



Fonte: (CRUZ, 2016)

Os dados de linha deste sistema são apresentados no anexo A e os dados de cada barra deste sistema são apresentados no anexo B.

3.2 DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO CUSTO

A função objetivo de Interrupção $C_{interrupção}$ é determinada pela minimização da soma dos custos associados: o custo da interrupção devido a falhas permanentes $C_{Permanente}$, o custo da interrupção devido a falhas temporárias $C_{Temporária}$, e o custo de alocação ou realocação dos equipamentos $C_{Equipamentos}$, sendo expressa pela equação (11).

$$C_{interrupção} = \text{Min}(C_{Permanente} + C_{Temporária} + C_{Equipamentos}) \quad (11)$$

O custo da interrupção causado por falhas permanentes na rede da concessionária envolve a avaliação do impacto da interrupção do fornecimento em todo o sistema. Isso inclui a seção afetada pela falha, bem como as seções a montante e a jusante do ponto de falha, com uma análise detalhada das diferentes seções do sistema (RODRIGUES;

MANTOVANI, 2020), sendo expressa pela equação (12), com base na ENS:

$$C_{Permanente} = \sum_{k=1}^{sc} \lambda_k * l_k * CPS_k \quad (12)$$

Onde:

sc – Número total de seções;

λ_k – Taxa da média anual de falta permanente(0,072 falta/km/ano);

l_k – Comprimento da Seção k (km);

CPS_k – Custo devido à falta permanente na seção k;

O valor de CPS_k é dado pela equação (13).

$$CPS_k = Cf_k * TP * Ce \quad (13)$$

Onde:

Cf_k – Carga total afetada pela falta na seção k em MWh;

TP – Tempo médio de reparação da falta permanente (4h);

Ce – Preço da tarifa de energia elétrica (180,00 R\$/MWh)

O custo de interrupção devido às falhas temporárias, embora difícil de quantificar, reflete, conforme a abordagem adotada na concepção do modelo, um custo de natureza social. (RODRIGUES; MANTOVANI, 2020), sendo expressa pela equação (14), com base na ENS:

$$C_{Temporária} = \sum_{k=1}^{sc} \lambda_k * l_k * CTS_k \quad (14)$$

Onde:

sc – Número total de seções;

λ_k – Taxa da média anual de falta temporária(0,98 falta/km/ano);

l_k – Comprimento da Seção k (km);

CTs_k – Custo devido à falta temporária na seção k;

O valor de CTs_k é dado pela equação (15).

$$CTs_k = Cf_k * TT * Ce \quad (15)$$

Onde:

Cf_k – Carga total afetado pela falta na seção k em MWh;

TT – Tempo médio de reparação da falta temporária (0,17h);

Ce – Preço da tarifa de energia elétrica (180,00 R\$/MWh)

O custo dos equipamentos é o somatório dos equipamentos alocados pelo algoritmo genético, juntamente com os pré-definidos, de forma a ser expresso pela equação (16).

$$C_{Equipamentos} = \sum_{n=1}^{Qr} C_{Religador} + \sum_{n=1}^{Qf} C_{Fusível} \quad (16)$$

Onde:

Qr – Quantidade de religadores presentes na solução;

Qf – Quantidade de fusíveis presentes na solução;

$C_{Religador}$ – Custo unitário do religador automático (R\$ 125.000,00);

$C_{Fusível}$ – Custo unitário do fusível (R\$ 5.000,00);

3.3 APLICAÇÃO AO PROBLEMA

O estudo foi realizado utilizando o algoritmo genético, especificamente a função GA do MatLab (MATHWORKS, 2024). Esse processo foi fundamental para aumentar as chances de identificar um indivíduo de melhor qualidade. Para isso, utilizou-se de um indivíduo com 8 genes: 2 correspondentes à alocação de religadores no alimentador

principal e 6 à alocação de fusíveis nos ramos secundários, caso necessário, com o objetivo de minimizar o valor da função de custo em (11).

Além disso, para permitir maior variabilidade entre os indivíduos gerados, foi inserido um valor fictício que representava a ausência de alocação de dispositivos de proteção na solução. Também foram definidas barras pré-alocadas, ou seja, barras que, obrigatoriamente, deveriam ter um dispositivo de proteção alocado. Sendo assim, a barra 1 precisa obrigatoriamente de um religador, pois é a barra inicial do alimentador principal, enquanto as barras 3, 11, 24, 39, 40, 49, 52, 64, 79, 88, 93, 94, 96, 97, 104, 108 e 119 exigiam um fusível para a proteção do ramal secundário, uma vez que são barras de derivação do ramal principal. Excluindo as barras pré-alocadas são um total de barras de alocação do AG: 44 para os religadores e 86 para os fusíveis.

A figura 11 retrata um indivíduo gerado, para ser utilizado nos cálculos.

Figura 11 - Indivíduo gerado

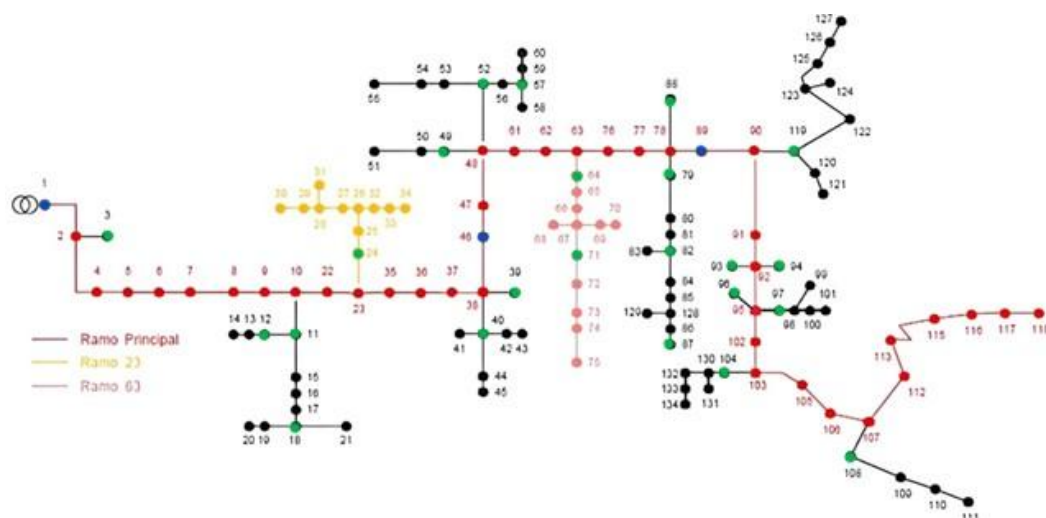
barras =

89	46	82	18	87	71	57	12
----	----	----	----	----	----	----	----

Fonte: Próprio Autor

A figura 12 representa visualmente a representação deste indivíduo na rede de 134 barras. Para auxiliar a visualização os religadores são representados na cor azul e os fusíveis na cor verde, juntamente com as proteções pré-alocadas.

Figura 12 - Representação do indivíduo alocado



Fonte: Próprio Autor

4 RESULTADOS

A aplicação do algoritmo genético (AG) para a alocação de religadores e fusíveis no sistema de distribuição resultou em soluções eficientes para a minimização da função de custo, atendendo às restrições e garantindo a proteção adequada dos ramais principais e secundários. São definidos 8 genes para um indivíduo e a porcentagem da população que é mantida para a próxima geração é de 5%.

Ainda visando maior variabilidade, considerou-se três diferentes casos para o AG, sendo estes:

1. Número de gerações até a parada: 200; Número de indivíduos de uma população: 100; Número mínimo de gerações sem alterações do melhor indivíduo até a parada: 200.
2. Número de gerações até a parada: 1000; Número de indivíduos de uma população: 200; Número mínimo de gerações sem alterações do melhor indivíduo até a parada: 300.
3. Número de gerações até a parada: 1500; Número de indivíduos de uma população: 50; Número mínimo de gerações sem alterações do melhor indivíduo até a parada: 200.

Os resultados obtidos para estes 3 diferentes casos, foram:

Figura 13 - Indivíduo gerado conforme o caso 1

```
barras =  
46 89 0 0 0 0 0 0
```

Fonte: Próprio Autor

Figura 14 - Indivíduo gerado conforme o caso 2

```
barras =  
46 89 0 0 0 0 0 0
```

Fonte: Próprio Autor

Figura 15 - Indivíduo gerado conforme o caso 3

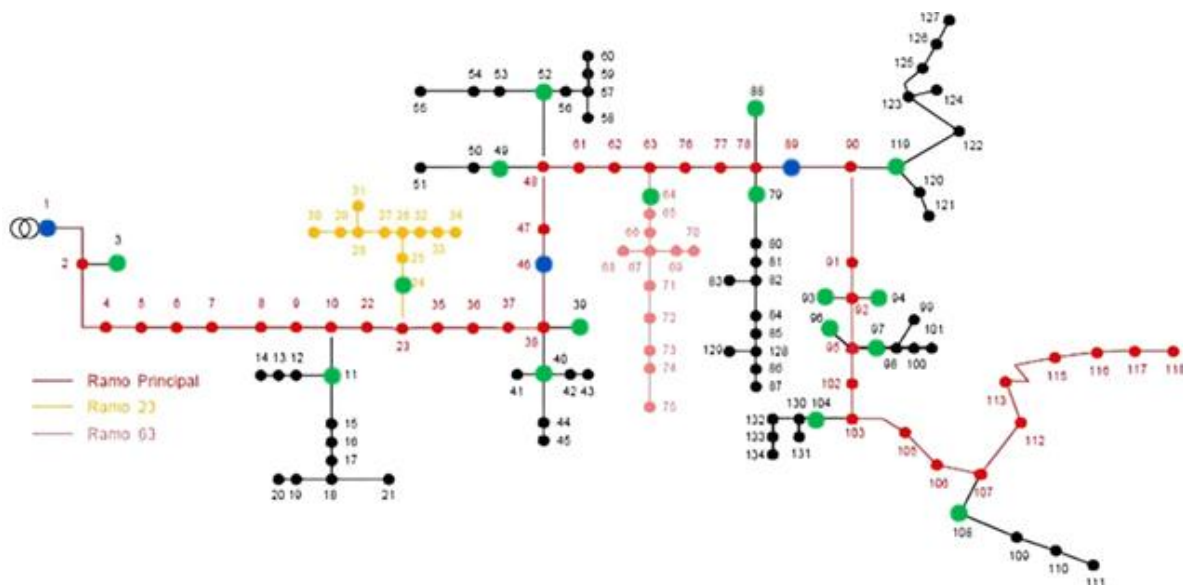
```
barras =
    46    89    0    0    0    0    0    0
```

Fonte: Próprio Autor

O tempo gasto em cada simulação foram: 3 horas e 42 minutos para o caso 1, 11 horas e 28 minutos para o caso 2 e 1 hora e 58 minutos para o caso 3. Como todos os 3 casos obtiveram o mesmo indivíduo decodificado, todos chegaram em um valor de função custo mínimo de R\$1.881.500,00.

A figura 16 representa a alocação deste melhor indivíduo na rede de 134 barras.

Figura 16 - Representação do indivíduo ótimo de acordo com o AG



Fonte: Próprio Autor

4.1 DIMENSIONAMENTO DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

O dimensionamento dos dispositivos de proteção, como religadores e fusíveis, identificados pelo algoritmo genético (AG), é um processo crucial para garantir a operação segura e eficiente do sistema de distribuição. O AG, ao gerar soluções para a alocação desses dispositivos, fornece as localizações ideais, mas o dimensionamento adequado depende de uma análise detalhada de vários fatores operacionais e técnicos.

4.1.1 DIMENSIONAMENTO DOS RELIGADORES

Para dimensioná-los adequadamente, utilizou-se do *software* OpenDSS para calcular os dados de correntes em cada ramo, os dados obtidos são mostrados na tabela 1.

Tabela 1 - Correntes elétricas dos religadores

Ramo de Instalação do Religador	I(A)
1-2	139,17
46-47	88,29
89-90	42,92

Fonte: Próprio Autor

Assim como o item 2.6.2 a seleção dos religadores em sistemas de distribuição deve ser igual ou superior ao dobro da corrente de carga deste ramo. Tais valores foram calculados e estão dispostos na tabela 2.

Tabela 2 - Valores para dimensionamento dos religadores

Barras de Instalação do Religador	$2 \cdot I(A)$	E(KV)
1-2	278,34	13,80
46-47	176,58	13,71
89-90	85,84	13,70

Fonte: Próprio Autor

De acordo com a norma técnica ET.00019.EQTL, (EQTL, 2024) os religadores são classificados conforme o grau de tensão a que cada dispositivo está exposto, conforme a tabela 3.

Tabela 3 - Características elétricas dos religadores

ITEM	CLASSE DE TENSÃO	TENSÃO				Nº DE FASES	CORRENTE NOMINAL	CAPACIDADE DE INTERRUPÇÃO NOMINAL
		NOMINAL	MÁXIMA	À FREQUÊNCIA INDUSTRIAL (A SECO E SOB CHUVA)	IMPULSO ATMOSFÉRICO			
	(KV)	(KV)	(KV)	(KV)	(KV)	(Un)	(A)	(KA)
1	15	13,8	15,5	50	110	3	630/800	12,5/16
2	24,2	23,1	27	60	125(150)			
6	36,2	34,5	38	70	170		800	16

Fonte: Equatorial Energia ET.00019.EQTL, 2024.

Portanto o item 1 da tabela 3 atende aos requisitos de tensão e corrente à que cada religador é submetido. Porém assim como o item 2.7.3 a coordenação entre religadores é alcançada ao estabelecer uma margem de tempo entre suas curvas de operação, o que serve como uma tolerância para erros de transformadores de corrente, tempo de resposta dos dispositivos e eliminação de falhas. A eficácia dessa coordenação é fundamental em uma rede, independentemente da localização dos dispositivos. Como os religadores são dispositivos eletrônicos, o tempo de atuação de cada um pode ser ajustado de forma individualizada, permitindo que cada religador opere de maneira otimizada conforme as necessidades específicas da rede. Esse ajuste garante que o religador protetor tenha um tempo de atuação inferior ao do religador protegido, evitando que a falha se propague e assegurando a operação eficaz do sistema de proteção. Essa coordenação precisa entre os dispositivos é fundamental para minimizar o tempo de interrupção do fornecimento de energia e aumentar a confiabilidade da rede elétrica, permitindo uma resposta rápida e adequada a falhas.

4.1.2 DIMENSIONAMENTO DOS FUSÍVEIS

Para dimensionar os fusíveis alocados, utilizou-se do *software* OpenDSS para calcular os dados de correntes de barra e as correntes de curto-circuito mínima em cada ramo, os dados obtidos são mostrados na tabela 4.

Tabela 4 - Correntes elétricas dos fusíveis

Ramo de Instalação do Fusível	I(A)	Icc(A)
2-3	0,94	13.300,00
10-11	14,10	9.386,00
23-24	15,72	9.536,00
38-39	0,08	9.184,00
38-40	7,51	8.995,00
48-49	5,81	8.155,00
48-52	7,91	7.909,00
63-64	13,59	7.713,00
78-79	15,63	7.171,00
78-88	1,58	6.587,00
92-93	0,49	6.208,00
92-94	1,58	6.006,00
95-96	0,12	5.863,00
95-97	6,30	5.426,00
103-104	8,02	5.681,00
107-108	5,89	4.436,00
90-119	5,51	6.382,00

Fonte: Próprio Autor

Assim como o item 2.6.1 a seleção dos fusíveis em sistemas de distribuição deve atender a dois critérios principais. O primeiro critério sugere que o valor nominal do fusível seja escolhido com base em 1,5 vezes a corrente de carga, a fim de promover a proteção adequada e a coordenação com os religadores. O segundo critério propõe um ajuste considerando 25% da corrente mínima de falta à terra, assegurando uma resposta rápida a falhas enquanto evita disparos indesejados. Esses critérios visam equilibrar a proteção e a coordenação no sistema de distribuição. Tais valores foram calculados e estão dispostos na tabela 5.

Tabela 5 - Valores para dimensionamento dos fusíveis

Ramo de Instalação do Fusível	$1,5 \cdot I(A)$	$0,25 \cdot I_{cc}(A)$
2-3	1,41	3.325,00
10-11	21,15	2.346,50
23-24	23,58	2.384,00
38-39	0,12	2.296,00
38-40	11,26	2.248,75
48-49	8,71	2.038,75
48-52	11,86	1.977,25
63-64	20,38	1.928,25
78-79	23,44	1.792,75
78-88	2,37	1.646,75
92-93	0,73	1.552,00
92-94	2,37	1.501,50
95-96	0,18	1.465,75

95-97	9,45	1.356,50
103-104	12,03	1.420,25
107-108	8,83	1.109,00
90-119	8,26	1.595,50

Fonte: Próprio Autor

Os valores nominais recomendados para elos fusíveis tipo K foram retirados da norma técnica ET.00126.EQTL, (EQTL, 2024) e são mostrados na tabela 6.

Tabela 6 - Valores preferenciais para fusíveis tipo K

Valores nominais preferenciais de fusíveis do tipo K
6 A, 10 A, 15 A, 25 A, 40 A, 65 A e 100 A

Fonte: Equatorial Energia ET.00126.EQTL, 2024.

Sendo assim, o dimensionamento é mostrado pela tabela 7.

Tabela 7 - Dimensionamento dos fusíveis

Ramo de Instalação do Fusível	Corrente Nominal do Fusível (A)
2-3	6
10-11	25
23-24	25
38-39	6
38-40	15
48-49	10
48-52	15

63-64	25
78-79	25
78-88	6
92-93	6
92-94	6
95-96	6
95-97	10
103-104	15
107-108	10
90-119	10

Fonte: Próprio Autor

Como o melhor indivíduo encontrado alocou apenas religadores na rede, não foi necessário realizar a coordenação entre os fusíveis, uma vez que cada fusível está instalado em um ramal distinto.

5 CONCLUSÃO

A alocação otimizada de dispositivos de proteção desempenha um papel crucial na melhoria do desempenho das redes de distribuição de energia elétrica, permitindo que as concessionárias reduzam os custos decorrentes de interrupções de energia, tanto em termos de índices de confiabilidade quanto nas tarifas de energia pagas pelos consumidores. A falta de estudos e investimentos em sistemas de proteção pode resultar em falhas que afetam um número significativo de consumidores, acarretando danos substanciais, como perdas de produção e até mesmo riscos à segurança. Contudo, uma alocação eficaz de dispositivos de proteção pode minimizar esses impactos.

Este trabalho demonstrou que é possível aumentar a confiabilidade da rede elétrica, ao mesmo tempo em que se reduzem os custos de investimento para as concessionárias, por meio da aplicação de um algoritmo genético na alocação otimizada de dispositivos de proteção. Observou-se que, mesmo ao variar o número de iterações na simulação, o custo total convergia para um mesmo valor, mantendo um tempo de simulação relativamente baixo. A aplicação do cálculo do fluxo de potência foi fundamental para o dimensionamento adequado dos fusíveis e para o estudo da seletividade na proteção da rede.

Os resultados obtidos neste estudo podem contribuir diretamente para que a concessionária de energia elétrica local melhore a confiabilidade de sua rede frente a falhas temporárias e permanentes, além de otimizar os custos com a alocação de dispositivos de proteção. A implementação das soluções propostas tem o potencial de trazer benefícios significativos em termos de eficiência e segurança operacional, impactando positivamente a qualidade do fornecimento de energia à população.

6 REFERÊNCIAS

- AFONSO, J. L.; MARTINS, J. S. **A qualidade da energia eléctrica na indústria.** Euveo, 2003. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/1499>. Acesso em: 08 de agosto de 2024.
- BARROS, B. F.; BORELLI, R.; GEDRA, R. L. **Geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica.** São Paulo: Érica, 2014.
- BICHELS, Arlei. **Sistemas elétricos de potência: métodos de análise e solução.** Curitiba: Edutpr, 2018. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/4610>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- CARNEIRO, M. S. **Utilização do software opendss para cálculo das perdas técnicas em redes de distribuição.** Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil, 2019.
- COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ - CPFL. **GED-2912: Proteção de Redes Aéreas de Distribuição Sobrecorrente.** São Paulo: 2016. 98 p. Disponível em: https://www.cpfl.com.br/sites/cpfl/files/2021-12/GED-2912%20-%20Proteção%20de%20Redes%20Aéreas%20de%20Distribuição%20-%20Sobrecorrente_0.pdf. Acesso em: 08 jul. 2024.
- CONCEIÇÃO, K. P. **Uma nova metodologia para o desenvolvimento de projetos de proteção de redes ativas de distribuição de energia elétrica.** 2018. 147 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018.
- CRUZ, H. M. O. **Alocação otimizada de sensores indicadores de falta em redes de distribuição de energia elétrica.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista - Unesp, São Paulo, Brasil, 2016.
- EQUATORIAL ENERGIA - EQTL. **ET.00019.EQTL: RELIGADORES TRIFÁSICOS 15 kV, 24,2 kV e 36,2 kV PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO.** 2024. 104 p. Disponível em: <https://ma.equatorialenergia.com.br/wp-content/uploads/2024/11/ET.00019.EQTL-03-Religadores-Trifasicos-de-15-kV-242-kV-e-362-kV-para-Redes-de-Distribuicao.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- EQUATORIAL ENERGIA - EQTL. **ET.00126.EQTL: ELOS FUSÍVEIS DE DISTRIBUIÇÃO.** 2024. 32 p. Disponível em: <https://ma.equatorialenergia.com.br/wp-content/uploads/2024/07/ET.00126.EQTL-02-Elos-Fusiveis-de-Distribuicao.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE ENSINO PROFISSIONALIZANTE (Brasil) - INBRAEP. **Tipos de Redes de Distribuição.** Santa Catarina: Equipe INBRAEP, 18 de fevereiro de 2022. Disponível em: <https://inbraep.com.br/publicacoes/tipos-de-redes-de-distribuicao/>. Acesso em: 08 de agosto de 2024.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** 1. ed. São Paulo: Blucher, 2005.

LAUTENSCHLEGER, A. H. **Análise da operação de sistemas de distribuição considerando as incertezas da carga e da geração distribuída**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, 2018.

LINDEN, R. **Algoritmos genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.

LUCAS, D. C. **Algoritmos Genéticos: uma Introdução**. 2002.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: Ltc, 2013.

MARTINHO, E. **Distúrbios da Energia Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2009.

MATHWORKS. MathWorks, **MatLab**. Disponível em: https://www.mathworks.com/help/gads/ga.html?searchHighlight=ga&s_tid=srchtitle_ga_1. Acesso em: 6 jun. 2024.

OLIVEIRA, C. C. B. et al. **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência - Componentes Simétricas**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2000.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Indicadores de Desempenho do Sistema Interligado Nacional**. 2024. Disponível em: https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/NOVOSITE_Relatório%20dos%20Indicadores%202024_07_Julho-resumido.pdf. Acesso em: 8 ago. 2024.

RODRIGUES, B. R.; MANTOVANI, J. R. S. **Proposta de uma metodologia para alocação de dispositivos de manobra e proteção em redes de distribuição para melhoria dos índices de continuidade**. Congresso Brasileiro de Automática, v. 2, n.1, 2020.

SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia Elétrica: Fundamentos e Prática**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SEXAUER, J. **Introdução ao OpenDSS**. 2016. Disponível em: <https://ifgjatai.eu5.org/OpenDSS.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2024.

SOUZA, J. S. et al. **Análise Probabilística Considerando Incertezas Como Cargas e Geração**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, vol. 1, no 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2209>.

ZANETTA JÚNIOR, L. C. **Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

ANEXO A

Na tabela 8 são mostrados os dados de linha da rede de distribuição de 134 barras, onde:

De – Barra inicial;

Para – Barra final;

R – Resistência da linha;

X – Reatância da linha;

m – Comprimento da linha;

Tabela 8 - Dados de linha do sistema de 134 barras

De	Para	R(ohm/m)	X(ohm/m)	m
1	2	0,000367889	0,000479556	900
2	3	0,00105	0,00053	50
2	4	0,000368	0,00048	100
4	5	0,0003675	0,00048	40
5	6	0,00368	0,004795	20
6	7	0,00368	0,004795	20
7	8	0,00368	0,004795	20
8	9	0,00037	0,00048	10
9	10	0,000368	0,00048	50
10	11	0,001597	0,000527	100
11	12	0,001596667	0,000526667	60
12	13	0,001596667	0,000526667	30
13	14	0,0015975	0,00052625	160
11	15	0,001596667	0,000526667	30
15	16	0,0016	0,00053	10
16	17	0,001595	0,000525	20
17	18	0,0015975	0,0005275	40
18	19	0,00105	0,00053	40

19	20	0,00105	0,00053	50
18	21	0,00105	0,00053	150
10	22	0,000366667	0,00048	30
22	23	0,000368571	0,00048	70
23	24	0,001598	0,000526	50
24	25	0,001595	0,000525	20
25	26	0,001596667	0,000526667	30
26	27	0,000525	0,000265	120
27	28	0,0021	0,00106	20
28	29	0,00105	0,00053	20
29	30	0,0252	0,01272	5
28	31	0,00084	0,000424	25
26	32	0,000531667	0,000175	60
32	33	0,0002	0,000065	40
33	34	0,001995	0,00066	20
23	35	0,00037	0,00048	10
35	36	0,000368571	0,00048	70
36	37	0,00037	0,00048	10
37	38	0,00037	0,00048	10
38	39	0,000368571	0,00048	70
38	40	0,000368	0,00048	100
40	41	0,001596667	0,000526667	60
40	42	0,001598	0,000526	50
42	43	0,0016	0,00053	10
40	44	0,000366667	0,00048	30
44	45	0,0003675	0,00048	40
38	46	0,000368333	0,00048	60
46	47	0,00037	0,00048	20
47	48	0,0003675	0,000479167	120
48	49	0,000368	0,00048	50
49	50	0,00037	0,00048	20
50	51	0,000367647	0,000479412	170
48	52	0,000368	0,00048	100

52	53	0,001596667	0,000526667	60
53	54	0,001596667	0,000526667	30
54	55	0,001596923	0,000526154	130
52	56	0,001595	0,000525	20
56	57	0,0015975	0,00052625	80
57	58	0,00105	0,00053	50
57	59	0,00105	0,0053	60
59	60	0,00105	0,00053	20
48	61	0,0003675	0,00048	40
61	62	0,00037	0,00048	10
62	63	0,000368	0,00048	50
63	64	0,000696667	0,000526667	30
64	65	0,000695	0,000525	20
65	66	0,000696667	0,000526667	30
66	67	0,000695	0,000525	20
67	68	0,001596667	0,000526667	30
67	69	0,001595	0,000525	20
69	70	0,001595	0,000525	20
67	71	0,000696	0,000526	50
71	72	0,000695	0,000525	40
72	73	0,000695	0,000525	40
73	74	0,000695	0,000525	20
74	75	0,000696364	0,000525455	110
63	76	0,00037	0,00048	20
76	77	0,000366667	0,00048	30
77	78	0,000368	0,00048	50
78	79	0,000368571	0,00048	70
79	80	0,000368571	0,00048	70
80	81	0,000366667	0,00048	30
81	82	0,000366667	0,00048	30
82	83	0,001598	0,000526	50
82	84	0,000368	0,00048	50
84	85	0,000366667	0,00048	30

128	86	0,000366667	0,00048	30
86	87	0,00037	0,00048	20
78	88	0,00273	0,001378	50
78	89	0,000141538	0,000184615	130
89	90	0,000368	0,00048	50
90	91	0,000367778	0,000479444	180
91	92	0,00037	0,00048	20
92	93	0,00105	0,00053	30
92	94	0,00105	0,00053	70
92	95	0,000368	0,00048	100
95	96	0,00105	0,00053	40
95	97	0,00105	0,00053	50
97	98	0,00105	0,00053	60
98	99	0,001597273	0,000526364	110
98	100	0,00105	0,00053	40
100	101	0,00105	0,00053	110
95	102	0,000368333	0,00048	60
102	103	0,0003675	0,00048	40
103	104	0,000696667	0,000526667	30
103	105	0,000696	0,000525333	150
105	106	0,00069619	0,000525238	210
106	107	0,000696667	0,000526667	30
107	108	0,000696	0,000525	100
108	109	0,001597	0,000527	100
109	110	0,001596667	0,000526667	30
110	111	0,001595	0,000525	20
107	112	0,000367647	0,000479412	170
112	113	0,000368182	0,000479091	110
113	114	0,001597273	0,000526364	110
113	115	0,001064667	0,000351	300
115	116	0,001597	0,0005265	200
116	117	0,001597	0,0005265	200
117	118	0,001597	0,0005265	200

90	119	0,00105	0,00053	110
119	120	0,000368571	0,00048	70
120	121	0,000368571	0,00048	70
119	122	0,00105	0,00053	70
122	123	0,001596923	0,000526154	130
123	124	0,001595	0,000525	20
123	125	0,001595	0,000525	20
125	126	0,0015975	0,0005275	40
126	127	0,0015975	0,0005275	40
85	128	0,00037	0,00048	20
128	129	0,00105	0,00053	60
104	130	0,000695714	0,000525714	70
130	131	0,00037	0,00048	20
130	132	0,000696	0,000525	100
132	133	0,000695	0,000525	40
133	134	0,000695	0,000525	40

Fonte: (CRUZ, 2016)

ANEXO B

Na tabela 9 são mostrados os dados de cada barra da rede de distribuição de 134 barras, onde:

P – Potência ativa da barra;

Q – Potência reativa da barra;

Tabela 9 - Dados de barra do sistema de 134 barras

BARRA	P (kW)	Q(kVAr)
1	0	0
2	0	0
3	20,7	8,82
4	0	0
5	34,5	14,695
6	34,5	14,695
7	51,75	22,045
8	34,5	14,695
9	34,5	14,695
10	0	0
11	0	0
12	3,955	1,685
13	34,5	14,695
14	34,5	14,695
15	51,75	22,045
16	20,7	8,82
17	51,75	22,045
18	0	0
19	34,5	14,695
20	51,75	22,045
21	51,75	22,045
22	51,75	22,045
23	0	0

24	1,38	0,59
25	20,7	8,82
26	0	0
27	51,75	22,045
28	0	0
29	34,5	14,695
30	51,75	22,045
31	51,75	22,045
32	51,75	22,045
33	51,75	22,045
34	51,75	22,045
35	0	0
36	5,705	2,43
37	51,75	22,045
38	0	0
39	1,38	1,38
40	0	0
41	34,5	14,695
42	34,5	14,695
43	34,5	14,695
44	51,75	22,045
45	20,7	8,82
46	0,46	0,195
47	51,75	22,045
48	0	0
49	51,75	22,045
50	34,5	14,695
51	51,75	22,045
52	0	0
53	0,55	0,235
54	51,75	22,045
55	34,5	14,695
56	34,5	14,695

57	0	0
58	4,6	1,96
59	51,75	22,045
60	1,75	0,745
61	1,38	0,59
62	2,53	1,08
63	0	0
64	34,5	14,695
65	34,5	14,695
66	1,61	0,685
67	0	0
68	51,75	22,045
69	3,22	1,37
70	51,75	22,045
71	34,5	14,695
72	3,91	1,665
73	0,875	0,37
74	51,75	22,045
75	51,75	22,045
76	51,75	22,045
77	2,715	1,155
78	0	0
79	34,5	14,695
80	51,75	22,045
81	51,75	22,045
82	0	0
83	34,5	14,695
84	34,5	14,695
85	51,75	22,045
86	51,75	22,045
87	34,5	14,695
88	34,5	14,695
89	20,7	8,82

90	0	0
91	51,75	22,045
92	0	0
93	10,81	4,605
94	34,5	14,695
95	0	0
96	2,76	1,175
97	10,81	4,605
98	0	0
99	34,5	14,695
100	51,75	22,045
101	51,75	22,045
102	34,5	14,695
103	0	0
104	34,5	14,695
105	34,5	14,695
106	49,91	21,26
107	0	0
108	0	0
109	51,75	22,045
110	51,75	22,045
111	34,5	14,695
112	13,8	5,88
113	0	0
114	0	0
115	13,8	5,88
116	13,8	5,88
117	13,8	5,88
118	13,8	5,88
119	0	0
120	25,3	10,78
121	13,8	5,88
122	0	0

123	0	0
124	7,13	3,035
125	20,7	8,82
126	7,13	3,035
127	7,13	3,035
128	0	0
129	20,7	8,82
130	0	0
131	51,75	22,045
132	0	0
133	51,75	22,045
134	51,75	22,045

Fonte: (CRUZ, 2016)