

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ

BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

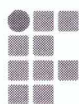
HEDUARDAH CAROLYNNE DE SOUZA

VITÓRIA LEAL ALMANÇA DE CARVALHO

**ALOCÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EM REDE DE
DISTRIBUIÇÃO LOCAL**

JATAÍ - GO

2022



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

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: Heduardah Carolynne de Souza, Vitória Leal Almança de Carvalho.

Matrícula: 20171020040193, 20172020040043

Título do Trabalho: Alocação ótima de dispositivo de proteção em rede de distribuição local.

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:

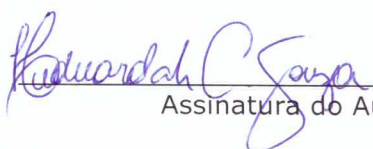
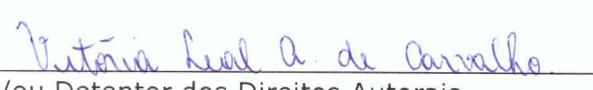
- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

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 inclusos 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.

Jataí, 12/08/2022.

 
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

HEDUARDAH CAROLYNNE DE SOUZA
VITÓRIA LEAL ALMANÇA DE CARVALHO

**ALOCÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EM REDE DE
DISTRIBUIÇÃO LOCAL**

Trabalho de Conclusão de Curso sob orientação do professor Dr. Marcelo Semensato, submetido ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG) – Câmpus Jataí como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

JATAÍ - GO

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Souza, Heduardah Carolynne de.

Alocação ótima de dispositivo de proteção em rede de distribuição local [manuscrito] / Heduardah Carolynne de Souza, Vitória Leal Almança de Carvalho. -- Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2022.

71 f.; il.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Semensato.

Bibliografias.

1. Dispositivos de proteção. 2. Energia Não Suprida 3. Algoritmo genético. 4. Rede de distribuição de energia elétrica. I. Carvalho, Vitória Leal Almança de. II. Semensato, Marcelo. III. IFG, Câmpus Jataí. IV. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Aquisição e Tratamento da Informação.
Bibliotecária - Rosy Cristina O. Barbosa - CRB 1/2380 – C. Jataí. Cód. F044/2022-1.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

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

Folha de Aprovação

Heduardah Carolynne de Souza e Vitória Leal Almança de Carvalho

ALOCÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO LOCAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a 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 14 de julho de 2022, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Semensato
Presidente da banca / Orientador
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. Dra. Jaqueline Oliveira Rezende
Membro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus Jataí

Documento assinado eletronicamente por:

- **Fernando Silva Pereira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/08/2022 16:41:26.
- **Jaqueline Oliveira Rezende**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/08/2022 18:41:26.
- **Marcelo Semensato**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 04/08/2022 20:39:37.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 05/07/2022. 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: 300226

Código de Autenticação: d1fbfeaa3d



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Av. Presidente Juscelino Kubitschek, nº 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714
(64) 3605-0843 (ramal: 843)

AGRADECIMENTOS

HEDUARDAH

Agradeço minha família e meus amigos por todo o carinho, amor e força. Sou grata a minha mãe, Helizabeth, que tanto lutou pela minha educação e nunca me deixou perder a fé.

Obrigada as minhas irmãs, Anah e Lunna, por me ouvirem nos momentos mais difíceis e nunca soltarem minha mão. E, também, a Deus por cada momento de sabedoria e luz colocado no meu caminho.

AGRADECIMENTOS

VITÓRIA

Agradeço aos meus pais Gislene e Brasil, por todo o amor, exemplo, esforços e sacrifícios que fizeram para que eu tivesse as melhores oportunidades. Agradeço por terem me mostrado desde cedo a importância da educação.

A minha irmã Amanda, meu sobrinho Miguel e meus avós José Jerônimo, Zilda e Zulmira por todo carinho, apoio e incentivo.

Aos meus amigos e namorado Nisã pelo companheirismo, paciência, apoio e por trazerem alegria para o meu dia-a-dia.

A minha colega de graduação e amiga Heduardah, por compartilhar comigo horas de dedicação e estudo no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do IFG, por todos ensinamentos e contribuições para minha formação pessoal e profissional. Em especial, ao professor Dr. Marcelo Semensato pela orientação, dedicação e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho da Raízen, por compartilharem comigo conhecimento e experiência. Ao meu líder Silvanez Bezerra por toda paciência, compreensão e disposição em me formar como profissional.

*“Os cientistas dizem que somos
feitos de átomos, mas um
passarinho me diz que somos
feitos de histórias.”*

Eduardo Galeano

RESUMO

A proposta do trabalho é a alocação de dispositivos de proteção na rede de distribuição de energia elétrica local de 143 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, temporárias e os custos dos dispositivos de proteção. A alocação de dispositivos de proteção de forma otimizada possibilita melhoria da confiabilidade da rede e redução da ENS, trazendo benefícios a concessionárias e consumidores. Na proposta foram alocados religadores automáticos nos ramos principais e fusíveis nos ramos secundários, considerando um horizonte de planejamento de dez anos e garantindo a seletividade e coordenação entre os fusíveis. Para a otimização do problema foi utilizado o algoritmo genético, cuja função objetivo considerou a minimização do custo da ENS e investimentos em equipamentos. Além disso, os fusíveis alocados foram dimensionados a partir do cálculo do fluxo de potência gerado no OpenDSS. Ao final deste trabalho, os resultados gerados a partir das simulações foram discutidos e poderão auxiliar a concessionária de energia elétrica local na alocação otimizada de dispositivos de proteção com confiabilidade e redução dos custos.

Palavras-chaves: Dispositivos de proteção, Energia Não Suprida, Algoritmo genético, Rede de distribuição de energia elétrica.

ABSTRACT

The proposal of the work is the allocation of protection devices in the local electric power distribution network of 143 buses to optimize the reliability of the network in case of faults. The objective is to minimize the sum of Unsupplied Energy Costs (ENS) due to permanent and temporary faults and the costs of protection devices. The optimal allocation of protection devices makes it possible to improve network reliability and reduce ENS, bringing benefits to concessionaires and consumers. In the proposal, automatic reclosers were allocated to the main branches and fuses to the secondary branches, considering a planning horizon of ten years and ensuring selectivity and coordination between fuses. For the optimization of the problem, the genetic algorithm was used, whose objective function considered the minimization of the cost of the ENS and investments in equipment. In addition, the fuses allocated were sized from the calculation of the power flow generated in OpenDSS. At the end of this work, the results generated from the simulations were discussed and may help the local electric utility in the optimized allocation of protection devices with reliability and cost reduction.

Keywords: Protection devices, Unsupplied Energy, Genetic Algorithm, Electricity distribution network.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema elétrico de potência	18
Figura 2 - Curto circuito fase-terra	23
Figura 3 - Curto-circuito fase-fase.....	24
Figura 4 - Curto-circuito fase-fase-terra.....	24
Figura 5 - Curvas características de elos fusíveis preferenciais do tipo K.....	27
Figura 6 - Coordenação fusível-fusível	29
Figura 7 - Circuito equivalente rede de distribuição	32
Figura 8 – Exemplo de declaração do circuito da fonte e dados da primeira linha no OpenDSS.	34
Figura 9 - Exemplo de declaração das cargas das barras 1 a 3 no OpenDSS.....	35
Figura 10 – Etapas do algoritmo genético	39
Figura 11 - Exemplo de codificação	40
Figura 12 - Exemplo de recombinação.....	41
Figura 13 - Exemplo de mutação.....	42
Figura 14 - Diagrama da rede com alocação de dispositivos	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de coordenação entre elos fusíveis tipo K	30
Tabela 2 - Custo fixo dos dispositivos	43
Tabela 3 - Barras com alocação pré-determinada de fusíveis	44
Tabela 4 - Alocação para 400 iterações	44
Tabela 5 - Alocação para 1000 iterações	44
Tabela 6 - Alocação para 2000 iterações	45
Tabela 7 - Corrente elétricas	47
Tabela 8 - Razões para dimensionamento dos fusíveis	48
Tabela 9 - Valores recomendados para elos fusíveis tipo K	48
Tabela 10 - Dimensionamento de fusíveis	49
Tabela 11 - Dados da rede de distribuição local	54
Tabela 12 - Correntes das barras	59

LISTA DE SIGLAS

A	Ampere;
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica;
AWG	American Wire Gauge;
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de aço;
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica;
CELG D	CELG Distribuição S.A. – CELG D;
CENS	Custo social da energia não suprida;
CI	Custo da interrupção;
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz;
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;
DIC	Duração de interrupção individual por unidade consumidora;
DICRI	Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão;
DMIC	Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou ponto de conexão;
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;
FIC	Frequência de interrupção individual por unidade consumidora;
h	Hora;
kV	quilovolt;
kVA	quilovolt-amper;
MVA	megavolt-amper;
MW	mega-watt;
MWh	megawatt-hora;
NTC	Norma Técnica CELG;
PLD	Preço da Liquidação das Diferenças;
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional;
pu	por unidade;
V	Volts;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo geral	16
1.2	Objetivos específicos	16
1.3	Organização do trabalho	17
2	REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	18
2.1	Componentes elétricos das redes de distribuição	19
2.2	Caracterização da rede local	19
2.3	Operação das redes de distribuição.....	20
2.3.1	Custo da interrupção de energia	21
2.3.2	Tipos de faltas.....	21
2.4	Curto-circuitos	22
2.4.1	Curto-circuito fase-terra	22
2.4.2	Curto-circuito fase-fase	23
2.4.3	Curto-circuito fase-fase-terra.....	24
2.4.4	Consequências de um curto-circuito.....	25
3	SISTEMAS DE PROTEÇÃO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	26
3.1	Fusíveis	26
3.1.1	Especificação de fusíveis.....	28
3.1.2	Coordenação fusível-fusível.....	28
3.2	Religadores	30
4	CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA EM REDE RADIAL	32
4.1	Cálculo de fluxo de potência no OpenDSS	33
5	ALGORITMO GENÉTICO.....	36
5.1	Formulação do problema	36
5.2	Função objetivo.....	36

5.2.1	Custo de faltas permanentes	36
5.2.2	Custo das faltas temporárias	37
5.2.3	Custos dos dispositivos.....	38
6	DESCRIÇÃO DO ALGORÍTMO GENÉTICO APLICADO AO PROBLEMA...	39
6.1	Codificação dos indivíduos.....	40
6.2	População Inicial.....	40
6.3	Seleção e recombinação	40
6.4	Mutação	41
7	RESULTADOS	43
7.1	Dimensionamento dos fusíveis	47
8	CONCLUSÃO	51
	ANEXO A	54
	ANEXO B	59
	ANEXO C	63
	ANEXO D	68

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição são responsáveis por distribuir energia elétrica recebida do sistema de transmissão aos grandes, médios e pequenos consumidores. As redes que compõem esse sistema estão sujeitas a falhas temporárias e permanentes. As falhas temporárias tem origem transitória, como o contato momentâneo de um condutor ao outro, ou uma descarga atmosférica, por exemplo. As falhas permanentes perduram enquanto o problema existir, como o rompimento de um cabo.

Cerca de 80 % das faltas nas redes de distribuição são temporárias (GERS; HOLMES, 1998). A proteção na rede elétrica deve atuar tanto na falta permanente quanto na falta temporária, o mais rápido e próximo da falta possível. Na falta temporária o dispositivo de proteção deve atuar temporariamente na rede eliminando a corrente de curto-circuito até que o sistema seja restabelecido à operação normal, como é o caso dos religadores automáticos. Nas faltas permanentes o dispositivo deve atuar para eliminar o defeito, sendo que este dispositivo é religado manualmente após a falta ser eliminada, o que ocasiona interrupção de energia elétrica durante este tempo de restabelecimento, como é o caso do fusível e o religador atuando na curva lenta.

Para esta eficiência na atuação do dispositivo de proteção é preciso estabelecer a coordenação e seletividade entre estes dispositivos alocados. A coordenação e a seletividade garantem a confiabilidade do sistema elétrico. A energia não suprida (ENS) é um índice de confiabilidade que mede a energia elétrica interrompida na rede durante as faltas permanentes e temporárias por um período de tempo determinado, de acordo com a duração da falta e tempo de restabelecimento. No entanto a redução da ENS na rede deve ser de tal forma que compense os custos de investimentos nos dispositivos de proteção e suas manutenções.

A proposta do trabalho é a alocação de dispositivos de proteção em rede de distribuição de energia elétrica minimizando a somatória dos custos da ENS e dos dispositivos de proteção. A minimização na ENS e dos custos dos equipamentos não leva em conta a seletividade e coordenação dos fusíveis, que será realizada posteriormente. A rede simulada é uma rede distribuição local de 143 barras, sem considerar geradores distribuídos e com consumidores rurais (GORGEN, 2014). O planejamento é para um horizonte de dez anos e os valores nominais dos dispositivos são adequados para o último ano de planejamento, ou seja, o cenário de maior carga elétrica.

Na proposta são alocados religadores automáticos e fusíveis. Os religadores são alocados no alimentador principal e os fusíveis alocados nos ramais, ou seja, nos alimentadores secundários. Os religadores são destinados a eliminarem faltas transitórias e permanentes, enquanto os fusíveis destinados a eliminarem as faltas permanentes. Neste trabalho é garantida a seletividade e coordenação entre os fusíveis de acordo com as tabelas de seletividade presente em normas das concessionárias (FILHO, J. M; MAMEDE, D. R, 2013).

Na alocação de dispositivos de proteção na rede de distribuição é necessário dentre um espaço de soluções encontrar a melhor solução possível para o problema, ou seja, aquela que minimize a função objetivo. Outro aspecto é que a solução obtida atenda as restrições operacionais, tais como a coordenação entre os dispositivos e a capacidade nominal dos equipamentos.

Para a otimização do problema será utilizado um algoritmo genético. Algoritmos genéticos são técnicas de busca e otimização, que manipulam populações de indivíduos, que são combinados uns aos outros (*crossover*) produzindo filhos que podem sofrer ou não mutações. As populações evoluem através de sucessivas gerações até encontrar a solução ótima.

O fluxo de potência e os curtos-circuitos na rede elétrica serão calculados pelo *software* OpenDSS (DUGAN; MONTENEGRO, 2019). O OpenDSS é um *software* de livre acesso e foi desenvolvido como uma ferramenta capaz de fazer diversas análises em sistemas de distribuição de energia elétrica: fluxo de potência, geração distribuída, fluxo harmônico e curto-circuito. O *software* OpenDSS pode se comunicar ao MatLab.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é alocar dispositivos de proteção em rede de distribuição de energia elétrica da cidade de Jataí-GO para minimizar os custos da ENS durante a falta e os custos dos dispositivos alocados. Na proposta serão alocados religadores automáticos e fusíveis. O tempo de planejamento é de dez anos, sendo os fusíveis dimensionados para a carga elétrica do último ano. O estudo permite que a concessionária otimize os custos de energia não suprida durante as faltas.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Simular e analisar os resultados da alocação de dispositivos de proteção na rede elétrica de distribuição local.
- Compreender o conceito de confiabilidade em redes de distribuição de energia elétrica. Especificar corretamente os dispositivos de proteção alocados na rede.
- Simular nos *softwares* OpenDSS e MatLab.
- Realizar o fluxo de potência e estudo de curto-circuito na rede local de 143 barras.
- Apreender a implementar o algoritmo genético para obter a melhor solução.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho foi dividido em oito capítulos, sendo que o primeiro é a introdução.

O segundo capítulo aborda conceitos sobre as redes de distribuição em geral e sobre a rede de distribuição de Jataí-GO, objeto deste estudo. Este capítulo traz ainda o tema de curto-circuito, enfatizando três tipos: trifásico, fase-fase e fase-terra e suas consequências.

O terceiro capítulo aborda os sistemas de proteção das redes de distribuição, enfatizando fusíveis e religadores, que serão alocados pelo algoritmo genético.

O quarto capítulo discorre sobre o cálculo de fluxo de potência e a utilização do *software* OpenDSS.

O quinto capítulo é sobre a formulação do problema proposto no trabalho e a descrição da função objetivo utilizada.

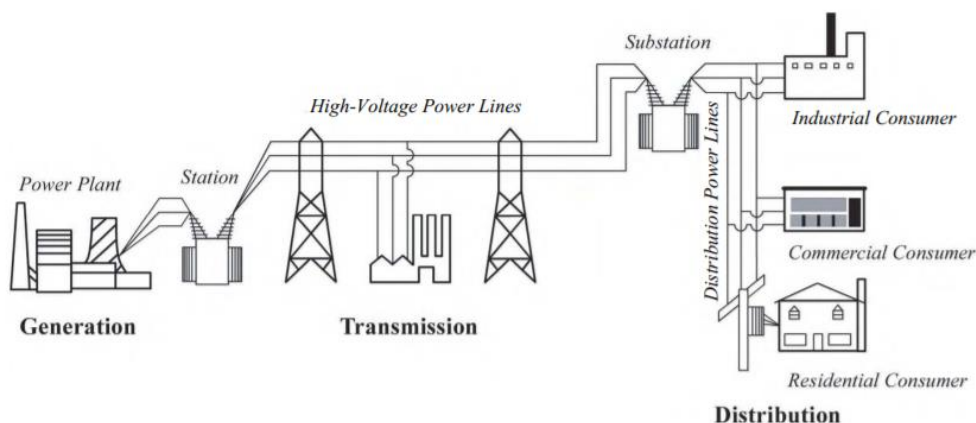
O sexto capítulo descreve o algoritmo genético utilizado e seus principais operadores: codificação, seleção, recombinação e mutação.

O sétimo capítulo apresenta os resultados da pesquisa e o oitavo e último capítulo traz a conclusão.

2 REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os sistemas elétricos de potência são responsáveis pela produção, transporte e distribuição de energia elétrica. A figura 1 mostra os blocos básicos que compõem esse sistema.

Figura 1 - Sistema elétrico de potência



Fonte: Adaptado (BLUME, 2002).

Na etapa de geração, a energia elétrica é produzida nas usinas a partir de outras fontes de energia; na etapa de transmissão, o nível da tensão é elevado para que a energia seja transportada de modo eficiente em longas distâncias até os sistemas de distribuição, onde a tensão é rebaixada à níveis de consumo residencial, comercial e industrial (BLUME, 2002).

O sistema de distribuição, portanto, é responsável por distribuir a energia elétrica recebida do sistema de transmissão aos grandes, médios e pequenos consumidores, de áreas rurais e urbanas. Os produtores de geração distribuída também fazem parte desse sistema.

A rede de distribuição é dividida em primária e secundária, sendo que a primeira opera em tensões superiores a 1kV, atendendo à médios e grandes consumidores comerciais e industriais; enquanto a segunda opera em baixa tensão (127, 220 ou 380V) e atende consumidores residenciais, prédios públicos, pequenas indústrias, etc.

Os sistemas de distribuição por serem compostos por um grande número de alimentadores e consumidores, e por distribuir energia elétrica em média e baixa tensão, possuem um maior índice de perdas e são mais susceptíveis a falhas. Nesse sentido, um

planejamento assertivo deve levar em consideração a minimização das perdas e custos relacionados à equipamentos e falhas. (MAGALHÃES, 2017).

2.1 Componentes elétricos das redes de distribuição

As redes de distribuição são compostas por dispositivos de: proteção, manobra, condução de eletricidade, transformação e infraestrutura (BARROS, 2020).

Os dispositivos de proteção têm a função de evitar que eventuais defeitos tomem maiores proporções e provoquem grandes prejuízos à rede; são exemplos: fusíveis, religadores, seccionadores e disjuntores.

Os dispositivos de manobra, como chaves a óleo, chaves-faca e chaves seccionadoras permitem que a topologia da rede seja modificada para realização de manutenções. Já os transformadores, além de transformarem os níveis de tensão da rede primária para secundária, são utilizados para isolação elétrica e proteção (BARROS, 2020).

A distribuição de energia ocorre predominantemente de forma radial aérea, podendo ser também subterrânea. O formato radial facilita a implantação de sistemas de proteção e reduz custos. Quanto à disposição física dos condutores, podem ser encontrados cabos isolados, compactos-protegidos ou cabos nus, sendo que os mais comuns são os cabos nus dispostos horizontalmente em redes aéreas (MAGALHÃES, 2017).

2.2 Caracterização da rede local

A rede de distribuição objeto do estudo está localizada predominantemente na área urbana de Jataí-GO e está conectada ao Sistema Interligado Nacional – SIN. Trata-se de uma rede totalmente aérea, de média tensão (13,8kV) que possui 143 barras. O seu circuito trifásico tem extensão de aproximadamente 17,8 km e conta com uma rede tronco com cerca de 4 km, que representa 22,4% do circuito. A rede tronco utiliza cabo 2/0 AWG CAA e seus ramais cabo 2 AWG ou 4 AWG CAA (GÖRGEN, 2014).

Segundo Görgen (2014), essa rede, apesar de antiga, está em bom estado de conservação e possui aproximadamente 7,9MW de potência ativa instalada, atendendo mais de 6000 unidades consumidoras. Além disso, na rede estão instalados 100 transformadores, sendo que 7 são monofásicos.

2.3 Operação das redes de distribuição

O sistema de distribuição brasileiro é regulado por um conjunto de resoluções elaboradas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), norteadas por diretrizes oriundas de leis aprovadas pelo Congresso Nacional e decretos do Executivo Federal.

Através do documento intitulado PRODIST (Procedimentos de Distribuição), a ANEEL dispõe disciplinas, condições, responsabilidades e penalidades relativas à conexão, planejamento da expansão, operação e medição de energia elétrica. Além disso, o documento estabelece critérios e indicadores de qualidade para consumidores, produtores, distribuidores e agentes importadores e exportadores de energia elétrica.

Os indicadores encontrados no PRODIST são classificados em individuais e coletivos. Os indicadores coletivos medem a continuidade do serviço oferecido para um grupo de consumidores situados em determinada área geográfica. Eles quantificam a duração (DEC) e a frequência (FEC) das interrupções de energia elétrica. Já os indicadores individuais mensuram a qualidade por unidade consumidora. São divididos em quatro tipos, de acordo com definição da ANEEL:

Duração de interrupção individual por unidade consumidora (DIC): Intervalo de tempo que, no período de apuração, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão, ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica;

Frequência de interrupção individual por unidade consumidora (FIC): Número de interrupções ocorridas, no período de apuração, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão;

Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou ponto de conexão (DMIC): Tempo máximo de interrupção contínua de energia elétrica, em uma unidade consumidora ou ponto de conexão; e

Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão (DICRI): Corresponde à duração de cada interrupção ocorrida em dia crítico, para cada unidade consumidora ou ponto de conexão. (ANEEL, 2021).

É previsto pelo PRODIST penalidades financeiras às distribuidoras que não apresentarem bons resultados desses indicadores, como incentivo para melhoria contínua dos serviços (BARROS, 2020).

2.3.1 Custo da interrupção de energia

A falta de energia traz grandes prejuízos à sociedade. Nesse sentido, são utilizados internacionalmente conceitos referentes aos custos da interrupção de energia elétrica.

O custo da interrupção (CI) é definido como todos os custos que afetam a sociedade decorrentes da interrupção de energia elétrica, ou seja, é o prejuízo de um consumidor devido à falta de energia, quantificado em R\$/kWh interrompido. Esse custo é mensurado de modo diferente para cada tipo de consumidor e para características da interrupção, como horário de interrupção, tempo, estação do ano, entre outros.

Um índice de confiabilidade utilizado nas redes elétricas é o de energia não suprida (ENS), que se refere a quantidade de energia demandada pelo consumidor que deixou de ser fornecida devido a interrupções de energia.

2.3.2 Tipos de faltas

Falhas ocorridas nos sistemas de distribuição de energia elétrica provocam faltas que afetam diretamente os usuários desse sistema. Falta é o termo utilizado para designar um fenômeno acidental que impede o funcionamento do sistema elétrico. As faltas podem ser classificadas como temporárias ou permanentes.

Segundo Gers e Holmes (1998), 80 a 95% das faltas ocorridas em sistemas de distribuição são de natureza temporária e duram no máximo alguns ciclos de segundo. Faltas temporárias são aquelas que após a operação dos equipamentos de proteção, a falha é eliminada e o circuito volta a operar normalmente depois de religado (CPFL, 2016).

O custo da ENS para a falta temporária é o preço da energia das cargas afetadas pela falta durante o tempo de religamento do dispositivo de proteção.

De acordo com a CPFL (2016) as principais causas de faltas temporárias são:

- Descargas atmosféricas;
- Contatos momentâneos entre condutores;
- Abertura de arco elétrico;
- Materiais sem isolamento adequada;

As faltas permanentes são aquelas que necessitam de intervenção para que o problema causador da falta seja solucionado e o equipamento seja religado. Faltas temporárias podem se transformar em faltas permanentes caso ocorra operação

inadequada dos equipamentos (CPFL, 2016). As causas de faltas permanentes são diversas como a quebra de um cabo, colisão de um veículo com um poste etc.

O custo da ENS para a falta permanente é o preço da energia das cargas elétricas afetadas durante o tempo de substituição do equipamento de proteção pela equipe técnica.

2.4 Curto-circuitos

As perturbações mais comuns de um sistema elétrico são os curtos-circuitos, que podem ser definidos como conexões de impedância muito baixa entre pontos de potenciais distintos num circuito elétrico (MEDEIROS, 2017). São anomalias que podem causar grandes danos aos equipamentos do sistema elétrico, como queima e destruição. Os sistemas de proteção devem atuar para evitar que estes danos ocorram.

A magnitude da corrente de curto-circuito depende de fatores como tipo de curto-circuito, capacidade do sistema de geração, topologia da rede, tipo de aterramento do neutro, entre outras (SATO, 2003). O cálculo dessa corrente é de grande importância para o dimensionamento e calibração dos equipamentos de proteção da rede de distribuição, como chave fusível, disjuntores, relés, religadores e seccionadores.

Nesta seção será abordado o cálculo de três tipos de curtos-circuitos:

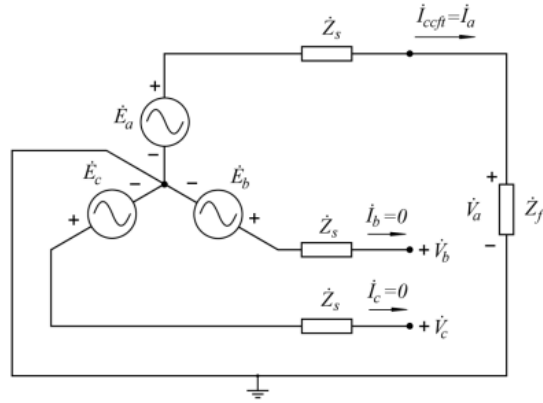
- fase-terra;
- fase-fase;
- fase-fase-terra.

Para as equações descritas a seguir, o termo $\vec{E}_a$ representa a tensão pré-falta, considerada 1 pu, nessa formulação simplificada. O termo $\vec{Z}_f$ é a impedância de falta, enquanto $\vec{Z}_s$ representa a impedância síncrona do gerador em série com qualquer impedância a ele conectada, como impedâncias de linhas de transmissão, transformadores, etc. (ALMEIDA, 2017).

2.4.1 Curto-circuito fase-terra

Nesse curto-circuito, considera-se que a fase a de um gerador trifásico é conectada ao terra por meio de uma impedância de falta $\vec{Z}_f$. A corrente de curto-circuito fase-terra é descrita pela equação (1) e o circuito equivalente é mostrado na figura 2, conforme (ALMEIDA, 2017).

Figura 2 – Curto-circuito fase-terra



Fonte: ALMEIDA, 2017.

$$I_{ccft} = I_a = \frac{3\dot{E}_a}{\dot{Z}_S^1 + \dot{Z}_S^2 + \dot{Z}_S^0 + 3\dot{Z}_f}$$

Em que:

$3E_a$: Tensão interna de fase;

$\dot{Z}_S^1$: Impedância síncrona por fase de sequência positiva; (1)

$\dot{Z}_S^2$: Impedância síncrona por fase de sequência negativa;

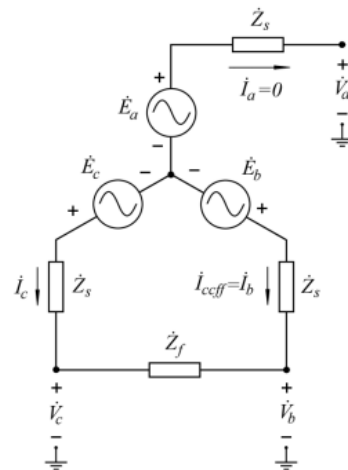
$\dot{Z}_S^0$: Impedância síncrona por fase de sequência zero;

$\dot{Z}_f$: Impedância de falta;

2.4.2 Curto-circuito fase-fase

Nesse curto-circuito as fases *b* e *c* são curto-circuitadas por meio de uma impedância de falta $\dot{Z}_f$ e a fase *a* é deixada em aberto. A seguir é descrita matematicamente a corrente de curto-circuito fase-fase pela equação (2) e o circuito equivalente pela figura 3, conforme (ALMEIDA, 2017).

Figura 3 - Curto-circuito fase-fase



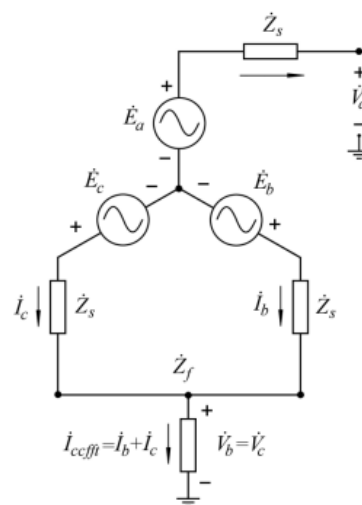
Fonte: ALMEIDA, 2017.

$$I_{ccff} = I_b = \frac{-j\sqrt{3}\dot{E}_a}{\dot{Z}_S^1 + \dot{Z}_S^2 + 3\dot{Z}_f} \quad (2)$$

2.4.3 Curto-circuito fase-fase-terra

Nesse curto-circuito, as fases *b* e *c* são curto-circuitadas diretamente e conectadas ao terra por meio de uma impedância de falta $\dot{Z}_f$. A fase *a* é deixada em aberto. A corrente de sequência positiva para o curto-circuito fase-fase-terra é descrita matematicamente pela equação (3) e o circuito equivalente é mostrado na figura 4, conforme (ALMEIDA, 2017).

Figura 4 - Curto-circuito fase-fase-terra



Fonte: ALMEIDA, 2017.

$$\dot{I}_a^1 = \dot{I}_b = \frac{\dot{E}_a}{\dot{Z}_S^1 + \dot{Z}_S^2 // (3\dot{Z}_f + \dot{Z}_S^0)} \quad (3)$$

2.4.4 Consequências de um curto-circuito

O curto-circuito é caracterizado pela elevação brusca da corrente, conhecida como corrente de curto-circuito e por quedas acentuadas da tensão e pode trazer consequências graves ao sistema de potência, dentre elas (SATO, 2003):

- i. Dissipação de potência e aquecimento do circuito devido ao efeito joule.
- ii. Queda de tensão no momento do curto-circuito, que é extremamente prejudicial às cargas como motores, sistemas computacionais e sistemas de controle.
- iii. Instabilidade na operação paralela de geradores, que pode provocar interrupção de fornecimento e sobrevelocidade de turbogeradores.

3 SISTEMAS DE PROTEÇÃO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para cumprir os requisitos de segurança, confiabilidade e qualidade, vários dispositivos estão associados aos sistemas de distribuição. Os mais importantes são os dispositivos de proteção (GERS; HOLMES, 1998).

Os sistemas de proteção são destinados à detecção de condições anormais e ao estabelecimento de ações corretivas o mais rápido possível, a fim de evitar que o sistema de distribuição opere fora de seu estado normal. Em resumo, o sistema de proteção tem as seguintes funções: limitar danos, preservar a segurança das pessoas, diminuir *stress* em outros equipamentos e manter a integridade de todo o sistema elétrico (SATO, 2003).

Os principais dispositivos utilizados para proteção do sistema de distribuição são disjuntores, fusíveis, relés, religadores e chaves seccionadoras ou de manobras.

É importante levar em consideração os custos econômicos e os benefícios destes dispositivos, que devem ser instalados em locais estratégicos, a fim de isolar o menor número de cargas possível, atendendo aos requisitos mínimos de forma conciliada aos recursos financeiros disponíveis (GERS; HOLMES, 1998).

A seleção adequada de dispositivos de proteção, de modo a isolar falhas na rede, exige que sejam realizados estudos de coordenação e seletividade. A seletividade garante que o dispositivo de proteção mais próximo a falha seja o único e primeiro a atuar, evitando que outras cargas da rede sejam afetadas pela falta. Já a coordenação garante que dispositivos de proteção sequenciais, como os religadores, atuem antes de dispositivos de proteção permanente, como os fusíveis.

Neste trabalho, leva-se em consideração a alocação de chaves fusíveis e religadores. As principais características, formas de atuação e regras para especificação destes dispositivos serão abordadas a seguir.

3.1 Fusíveis

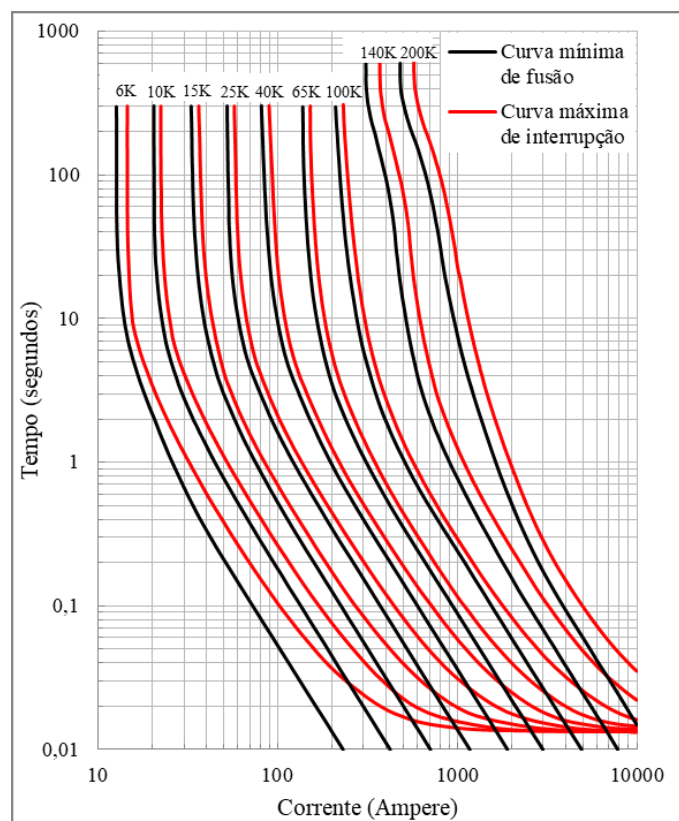
Os fusíveis são dispositivos muito comuns em redes de distribuição e são aplicados na proteção de ramais de linhas e equipamentos como capacitores e transformadores.

Na chave-fusível é acoplado o cartucho, onde fica instalado o elo-fusível, que ao ser percorrido por uma corrente superior à sua capacidade sofre fusão. A substituição do fusível se dá de modo manual.

Os elos-fusíveis operam dentro de uma faixa de operação aceitável, determinada pelo fabricante, que fica entre a curva de tempo mínimo e máximo de fusão. A temperatura de fusão do elo fusível depende da temperatura ambiente, corrente de carga, entre outros fatores, sendo que quanto maior a corrente de curto-circuito menor o tempo de fusão.

Os elos-fusíveis são classificados em tipo K (rápidos) e tipo T (lentos) e podem ser divididos em função de sua corrente nominal como preferenciais (6, 10, 15, 25, 40, 65, 100, 140 e 200 Amperes) ou não preferenciais (8, 12, 20, 30, 50, 80 Amperes) (CONCEIÇÃO, 2018). Neste trabalho, serão considerados fusíveis do tipo K preferenciais, cuja curva é mostrada na figura 5.

Figura 5 - Curvas características de elos fusíveis preferenciais do tipo K



Fonte: CONCEIÇÃO, 2018.

3.1.1 Especificação de fusíveis

Os fusíveis são dimensionados a partir de critérios baseados em duas correntes de referência. O primeiro deles enuncia que o valor nominal do fusível deve ser igual a 1,5 vezes o valor da corrente no ramal onde será instalado o dispositivo. Já o segundo, diz que o valor nominal do fusível deve ser “igual a 25% da corrente mínima de falta a terra no final do ramal analisado, calculada considerando uma resistência de falta preestabelecida.” (CONCEIÇÃO, 2018, p. 43). Estes critérios são mostrados na equação 4.

$$1,5 \times I_{carga,max} \leq I_{nom,elo} \leq 0,25 \times I_{cc,fase,terra,mínimo} \quad (4)$$

Em que:

$I_{carga,max}$ = corrente para condição nominal de operação.

$I_{cc,fase,terra,mínimo}$ = curto circuito fase terra mínimo no elo protetor.

3.1.2 Coordenação fusível-fusível

A coordenação entre fusíveis se dá quando o tempo de interrupção do elo fusível protetor não é superior a 75% do tempo de fusão do elo protegido, conforme equação 5 (FILHO, J. M; MAMEDE, D. R, p. 408, 2013).

$$T_{máxf_d} \leq 0,75 \times T_{mínfa} \quad (5)$$

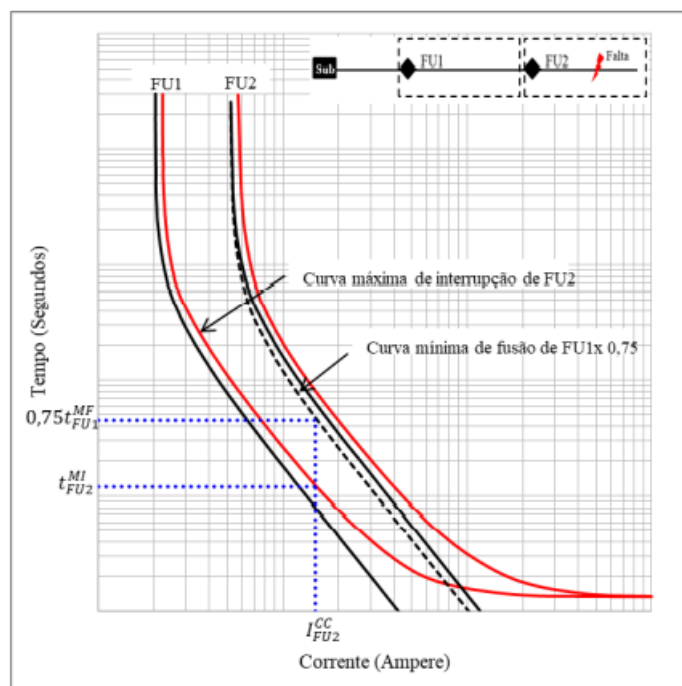
Em que:

$T_{máxf_d}$ = tempo máximo de atuação do elo fusível protetor.

$T_{mínfa}$ = tempo mínimo de atuação do elo fusível protegido.

Na figura 6 é mostrada a curva com os tempos de atuação dos elos fusíveis protetor FU1 e protegido FU2, considerando que a falta ocorra na zona de proteção de FU2, conforme (CONCEIÇÃO, 2018).

Figura 6 - Coordenação fusível-fusível



Fonte: CONCEIÇÃO, 2018.

Os elos fusíveis protetor e protegido devem coordenar considerando o valor máximo da corrente de curto-circuito no ramo de instalação do elo protetor. É importante ressaltar que não é possível estabelecer coordenação para um número elevado de chaves fusíveis em série, sendo recomendado aplicar somente duas chaves em série e caso necessário complementar a proteção com religadores e disjuntores (FILHO, J. M; MAMEDE, D. R, 2013).

A tabela 1 é utilizada para fazer a coordenação entre fusíveis do tipo K, quando são conhecidas as correntes de curto-circuito trifásica em todos os fusíveis protetores (FILHO, J. M; MAMEDE, D. R, 2013).

Tabela 1 - Tabela de coordenação entre elos fusíveis tipo K

k	Fusível protegido tipo K											
	12	15	20	25	30	40	50	65	80	100	140	200
6	350	510	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
8	210	440	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
10		300	540	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
12			320	710	1050	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
15				430	870	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
20					500	1100	1700	2200	2800	3900	5800	9200
25						660	1350	1700	2800	3900	5800	9200
30							850	1100	2200	3900	5800	9200
40									1450	3500	5800	9200
50										2400	5800	9200
65											4500	9200
80											2000	9100
100												4000
140												

Fonte: Adaptado de FILHO, J. M; MAMEDE, D. R, p. 411, 2013.

3.2 Religadores

O religador é um dispositivo interruptor automático, que abre e fecha os contatos quando ocorre uma falha em um local da rede por ele protegido. Quando detecta correntes de curto-circuito, o religador abre seus contatos, que são mantidos abertos durante o chamado tempo de religamento. Após esse tempo, os contatos são fechados automaticamente, reenergizando a linha. Se no momento do fechamento do contato a sobrecorrente ainda existir, o processo de abertura e fechamento é repetido o número de vezes programado, sendo que na última vez os contatos se mantêm abertos e travados e o fechamento só poderá ser realizado após intervenção.

As operações dos religadores podem ser combinadas entre rápidas e retardadas, essa característica permite que o dispositivo seja coordenado com fusíveis e outros equipamentos próximos.

Os religadores agregam unidades independentes de fase-fase e fase-terra e possuem um importante recurso no que diz respeito ao seu ciclo de operação, podendo

atuar em curva tempo-corrente lenta ou rápida. Quando ocorre uma falta que pode ocasionar a queima do fusível, o religador atua em curva rápida abrindo o circuito antes de ocorrer o rompimento do elo. Tratando-se de uma falta temporária, ao religar o circuito, o fornecimento de energia elétrica será mantido. Em caso de falta permanente, a próxima operação do religador será lenta, permitindo o rompimento do elo e o isolamento do trecho defeituoso (GENTILE et al., 2013).

4 CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA EM REDE RADIAL

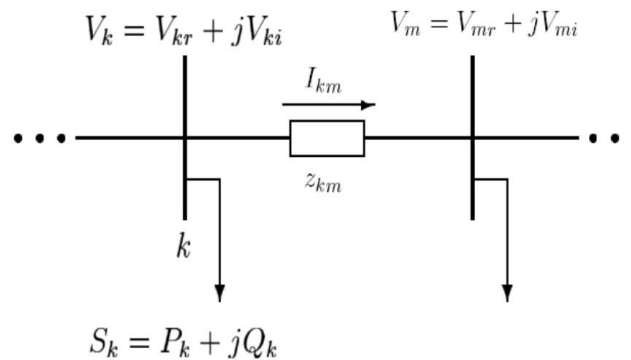
O objetivo do fluxo de potência é obter as tensões em todas as barras e correntes em todos os ramos do sistema de energia elétrica. Existem alguns métodos para a solução baseados em iterações. A rede radial tem a característica de possuir somente fluxo em uma direção, por isso é mais fácil utilizar processos *backward* e *forward*.

Dados do problema:

- Potência ativa e reativa nas barras.
- Resistência e reatância dos ramos
- Tensão na subestação.

Um dos métodos mais utilizados para cálculo de fluxo de potência na rede de distribuição é o método da varredura, cujo passo a passo é apresentado a seguir, considerando o circuito da figura 7:

Figura 7 - Circuito equivalente rede de distribuição



Fonte: Próprio autor

Primeiro Passo: Adotar as tensões em todas as barras iguais à da subestação, conforme equação 6:

$$V = V_{ref} + j0 \quad (6)$$

Segundo Passo: Calcular a corrente de carga em todas as barras e a corrente em todos os ramos do sistema radial. Este processo é implementado iniciando das barras extremas em direção à subestação (processo *backward*), conforme equações 7 e 8:

$$S_k = V_k I_k^* \quad (7)$$

$$I_{ramo} = \sum (I_k) \quad (8)$$

Terceiro Passo: Calcular as perdas ativas e reativas do sistema radial, conforme equações 9 e 10. Considerar as perdas iniciais igual a zero. Se as perdas ativas da interação atual menos as perdas da interação anterior forem menores que a tolerância permitida o programa converge (parada).

$$P_t = \sum_{(k,m) \in \Omega} r_{km} I_{km}^2 \quad (9)$$

$$Q_t = \sum_{(k,m) \in \Omega} x_{km} I_{km}^2 \quad (10)$$

Quarto Passo: Conhecendo todas as correntes nos ramos é possível calcular as tensões nas barras, conforme equação 11. Esse processo é realizado a partir da subestação e termina nas barras extremas (processo *forward*).

$$V_k = V_m + (r_{km} + jx_{km})I_{km} \quad (11)$$

Quinto Passo: Voltar ao segundo passo.

4.1 Cálculo de fluxo de potência no OpenDSS

Neste trabalho será utilizado o *software* OpenDSS (*Distributive System Simulator*) para o cálculo do fluxo de carga e corrente de curto-circuito em cada barra da rede. Esse *software* é livre e foi desenvolvido para simulação de redes de distribuição de energia elétrica e tem a capacidade de realizar análises para diversas topologias de rede.

Os programas são desenvolvidos a partir de linhas de comando que podem ser definidas no próprio *software* ou importadas de um arquivo de texto. Sua estrutura que define dados, elementos dos circuitos e interface foi desenvolvida utilizando as linguagens Pascal, C e C++. O OpenDSS ainda tem a função de desenvolver soluções utilizando outros *softwares* externos, como MATLAB, *Phyton*, etc. (CARNEIRO, 2019).

O programa também possui outras aplicações como análise de sistemas de geração distribuída, simulação de variação anual de cargas de geradores, simulação de plantas de geração de energia eólica, análise de harmônicos e inter-harmônicos, análises de configurações incomuns de transformadores, estudo de tensão de neutro e terra, entre outras (LIMA, 2021).

Para o cálculo de fluxo de potência utilizando o OpenDSS é necessário declarar todos os elementos ativos ou passivos do sistema de potência, tendo um ou mais terminais, sendo que cada terminal pode ter um ou mais condutores. Para a análise do fluxo harmônico, as cargas são modeladas como impedância, já os geradores como fontes de injeção de corrente elétrica e ambos são incluídos na matriz admitância do sistema (LIMA, 2021). Ao final da análise, são mostradas tensões e correntes em cada barra, perdas, bem como correntes de curto-circuito.

A seguir será mostrado o passo-a-passo da programação para o cálculo do fluxo de potência, utilizado neste trabalho.

Primeiro passo: Declaração de um novo circuito, considerando os dados da principal fonte de potência. Nessa etapa, são declarados dados como base de tensão e potência da rede, em kV e MVA, respectivamente; valor em pu da fonte; número de fases do sistema e nome da primeira barra.

Segundo passo: Declaração dos dados das linhas que compõem o sistema. São incluídas informações como nome da barra inicial e final, unidade de comprimento utilizada, frequência de operação e matriz de resistências e reatâncias em série.

Os dois primeiros passos são exemplificados na figura 8.

Figura 8 – Exemplo de declaração do circuito da fonte e dados da primeira linha no OpenDSS.

```
New circuit.Circuito basekv=13.8 pu=1 phases=3 bus1=B0 Angle=0 baseMva=1 MVAsc3=200000000 MVASC1=210000000
New line.Linha1 phases=3 bus1=B0 bus2=B1 length=1 units=km BaseFreq=60
~ rmatrix=[0.084577 | 0 0.084577 | 0 0 0.084577]
~ xmatrix=[0.060098 | 0 0.060098 | 0 0 0.060098]
```

Fonte: Print screen da interface do programa elaborado pelas autoras (2021).

Terceiro passo: Declaração das cargas ligadas em cada barra, a partir de dados como número de fases, barra onde está ligada a carga, tipo de ligação (delta ou estrela), tensão nominal na carga e potências ativa e reativa da carga.

O terceiro passo é exemplificado na figura 9.

Figura 9 - Exemplo de declaração das cargas das barras 1 a 3 no OpenDSS.

```
New load.CargaB1 phases=3 model=1 bus1=B1 conn=wye  
~ kv=13.8 kw=82.80241 kvar=35.26699  
  
New load.CargaB2 phases=3 model=1 bus1=B2 conn=wye  
~ kv=13.8 kw=82.80241 kvar=35.26699  
  
New load.CargaB3 phases=3 model=1 bus1=B3 conn=wye  
~ kv=13.8 kw=0 kvar=0
```

Fonte: Print screen da interface do programa elaborado pelas autoras (2021).

5 ALGORITMO GENÉTICO

O algoritmo genético é um método de busca e otimização desenvolvido por John Henry Holland em 1975 e popularizado por David Goldberg em 1989. É baseado no princípio Darwiniano de seleção natural, que enuncia que os indivíduos sofrem mutações e aqueles que são mais aptos, com maior longevidade, têm maior chance de reprodução e, portanto, perpetuam. Sendo assim, esses algoritmos, através da evolução de populações codificadas por cromossomos artificiais, buscam uma melhor solução para um problema complexo.

5.1 Formulação do problema

A proposta do trabalho é a alocação de fusíveis e religadores automáticos de forma otimizada na rede de distribuição de média tensão (13,8 kV) da cidade de Jataí-GO. A função objetivo tem o propósito de minimizar o custo da energia não suprida devido às faltas temporárias e permanentes e o custo dos dispositivos instalados. A alocação dos dispositivos será feita a partir do algoritmo genético, cujo objetivo é buscar a melhor solução para o problema, no caso, seleção das melhores barras da rede para a alocação. Será considerada apenas uma restrição relacionada a corrente nominal do equipamento, que deve ser maior que a corrente de operação da rede.

5.2 Função objetivo

O modelo proposto, conforme Rodrigues (2022, p. 32), contempla o custo da energia não suprida devido a ocorrência de faltas temporárias e permanentes no sistema de distribuição e o custo dos dispositivos instalados na rede. Conforme já mencionado, a função objetivo visa minimizar tais custos, podendo ser expressa pela equação 12.

$$C_{interrupção} = Min(C_{permanete} + C_{temporária} + C_{equipamentos}) \quad (12)$$

5.2.1 Custo de faltas permanentes

Segundo o modelo proposto por Rodrigues (2022, p. 33), o custo de interrupção devido a faltas permanentes inclui não somente os impactos para a seção que está em falta, como também para as seções localizadas a montante e a jusante do local da falta.

Sendo assim, o custo de interrupção para faltas permanentes é descrito na equação 13, em função dos custos para faltas na própria seção e nas seções a montante e a jusante. A taxa de faltas é considerada a mesma para todas as seções da rede.

$$C_{permanete} = \sum_{k=1}^{sc} \lambda_k \times A \times l_k \times CP_k \quad (13)$$

Em que:

sc: Número total de seções;

λ : Taxa de falta permanente média anual (0,072 falta/km/ano);

A: Tempo de planejamento (10 anos);

l: Comprimento da seção (km);

CP_k : Custo devido à falta permanente na seção k;

O custo CP_k é calculado como:

$$CP_k = Cf \times TP \times T \quad (14)$$

Em que:

Cf: carga total afetada pela falta na seção k em MW;

TP: tempo médio de reparação da falta permanente (4h);

T: tarifa de energia elétrica (R\$/MW 282,48) (CCEE, 2021);

5.2.2 Custo das faltas temporárias

O custo das faltas temporárias, conforme Rodrigues (2022, p. 35) é mais difícil de se mensurar, e segue o critério baseado na filosofia de custo social, sendo definido conforme a equação 15.

$$C_{temporária} = \sum_{k=1}^{sc} \gamma_k \times A \times l_k \times CT_k \quad (15)$$

Em que:

γ : Taxa de faltas temporárias médias anuais (0,98 falta/km/ano);

A: Tempo de planejamento (10 anos);

l : Comprimento da seção (km);

CT_k : Custo devido à falta temporária na seção k ;

O custo CT_k é calculado como:

$$CT_k = Cf \times TT \times T \quad (16)$$

Em que:

Cf : carga total afetada pela falta na seção k em MW;

TT : tempo médio de reparação automática da falta temporária (0,17h);

T : tarifa de energia elétrica (R\$/MW 282,48) (CCEE, 2021);

5.2.3 Custos dos dispositivos

O custo dos dispositivos é obtido pela soma dos custos de fusíveis e religadores instalados, conforme equação 17 (RODRIGUES, 2022).

$$C_{dispositivos} = \sum_1^r C_{religador} + \sum_1^f C_{fusível} \quad (17)$$

Em que:

r : Número de religadores;

f : número de fusíveis;

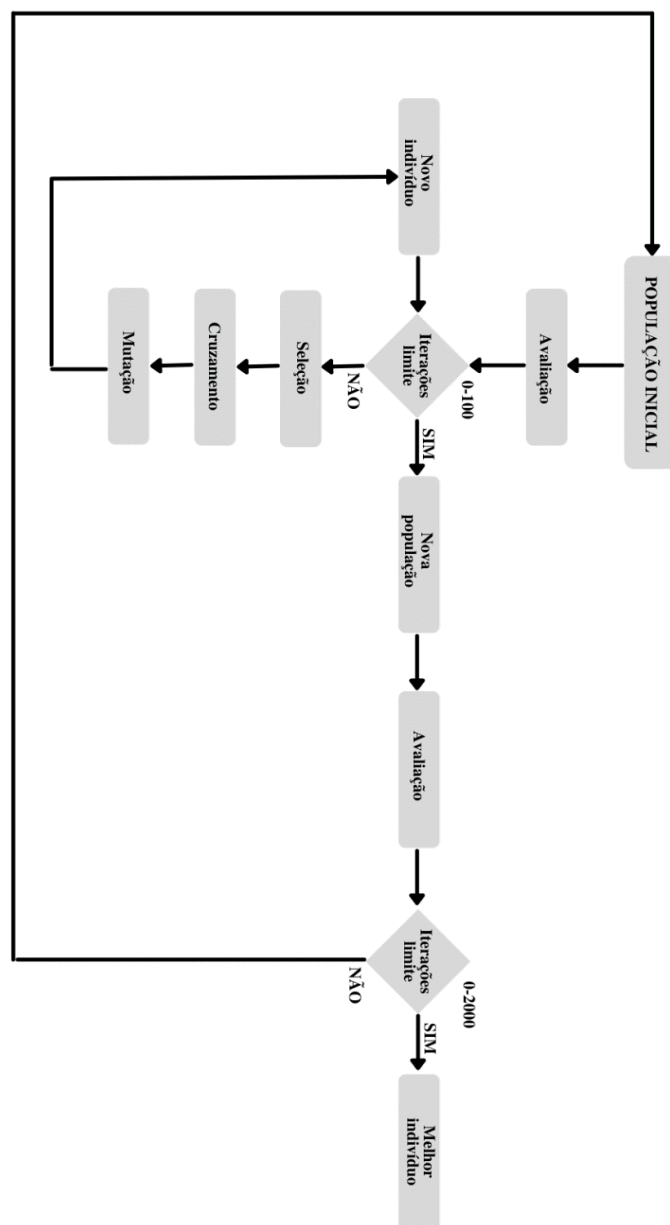
$C_{religador}$: Custo unitário do religador;

$C_{fusível}$: Custo unitário do fusível;

6 DESCRIÇÃO DO ALGORÍTMO GENÉTICO APLICADO AO PROBLEMA

A estrutura básica do algoritmo genético utilizado neste trabalho é mostrada na figura 10.

Figura 10 – Etapas do algoritmo genético



Fonte: Próprio autor.

Ao analisar o diagrama, observa-se que para a população gerada aleatoriamente são aplicadas as operações de seleção, cruzamento e mutação, formando uma nova população com 100 novos indivíduos, que é avaliada pela função objetivo. Este processo

ocorre de acordo com o número de iterações definidas no algoritmo e ao final do ciclo retorna o melhor indivíduo.

A população inicial é gerada de modo aleatório e a aptidão de um indivíduo da população é medida pela função objetivo do problema de otimização.

6.1 Codificação dos indivíduos

Os indivíduos da população foram codificados em um vetor de 18 colunas, sendo que destes, os três primeiros representam as barras onde estão alocados religadores e os demais barras onde estão alocados os fusíveis. Na figura 11 é mostrado um exemplo de indivíduo, a letra R representa os religadores e a letra F representa os fusíveis.

Figura 11 - Exemplo de codificação

R	R	R	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
5	43	56	9	13	21	27	31	37	42	58	69	80	85	96	117	128	134

Fonte: Próprio autor.

A seleção dos indivíduos é feita seguindo a condição de que os religadores são alocados somente no ramo principal, enquanto os fusíveis são alocados somente em ramos secundários.

6.2 População Inicial

A população inicial foi gerada de forma aleatória e é constituída por uma matriz de 100 indivíduos, sendo que cada indivíduo é representado por uma linha da matriz. Esses indivíduos passam pela função objetivo que verifica àquele que resultou o menor custo. Esta é considerada a solução corrente do programa, sendo armazenada.

6.3 Seleção e recombinação

Nesta etapa, o algoritmo seleciona de modo aleatório dois indivíduos da população inicial o primeiro e o segundo pai.

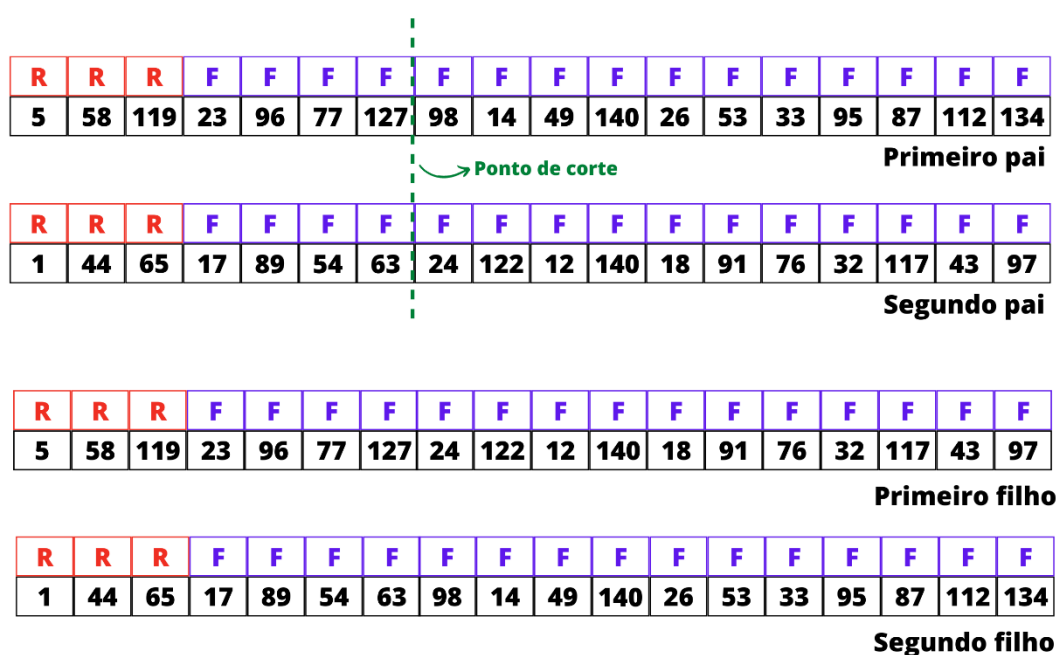
Na sequência, estes pais passam pelo processo de recombinação genética ou *crossover*, que é definido como a troca de material genético entre os pais, gerando dois novos filhos, ou seja, dois indivíduos descendentes. A busca por indivíduos mais aptos está diretamente ligada a recombinação, uma vez que, ao final deste processo, espera-se encontrar indivíduos ainda mais aptos que os progenitores.

O método de recombinação utilizado neste trabalho considerou apenas um ponto de corte, definido de modo aleatório, que representa a localização de um gene do indivíduo. A partir deste ponto, o primeiro pai adquire os genes do segundo pai e mantém seus genes localizados antes do ponto. Dessa forma, é gerado o primeiro filho.

A geração do segundo filho parte deste mesmo princípio: o segundo pai mantém os genes localizados antes do ponto e adquire os genes do primeiro pai localizados a partir do ponto. Ambos os filhos seguirão para a etapa de mutação.

Na figura 12 é mostrado um exemplo do processo de recombinação.

Figura 12 - Exemplo de recombinação



Fonte: Próprio autor.

6.4 Mutação

O operador da mutação atua sobre todos os indivíduos, alterando um gene do indivíduo. Essa operação permite que genes perdidos possam retornar à população para serem novamente avaliados. Além disso, contribui para a diversidade da população, pois introduz novos genes, não pertencente à população inicial.

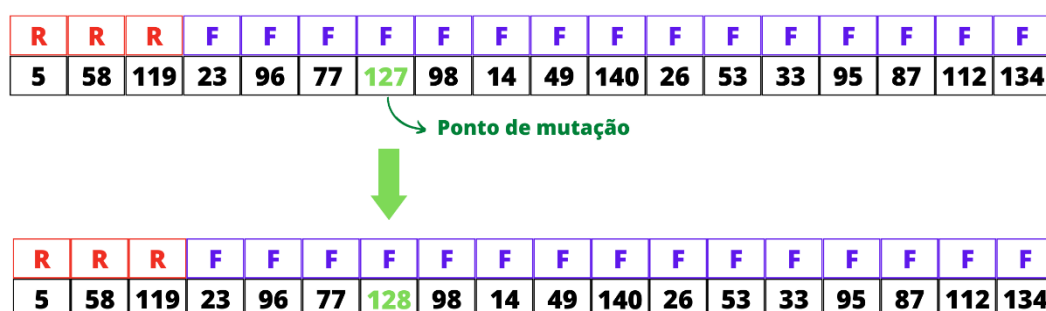
A operação de mutação é feita a partir da escolha de um gene aleatório do indivíduo, que no caso, se refere ao número da barra. O número da barra selecionada será substituído pelo número da próxima barra. Para isso, o algoritmo genético verifica e

diferencia barras pertencentes aos ramos principais e secundários, realizando a mutação de acordo com essa separação, escolhendo sempre a barra subsequente.

Se caso a barra selecionada referir-se a última barra do circuito, ela é trocada para a primeira barra, sendo que essa lógica é válida tanto para o ramo principal quanto para o secundário.

A figura 13 mostra um exemplo do processo de mutação.

Figura 13 - Exemplo de mutação



Fonte: Próprio autor.

7 RESULTADOS

O algoritmo genético foi implementado pelo *software* Matlab aplicada a uma rede de distribuição real de 13,8kV e 143 barras, situada no município de Jataí, descrita no capítulo 2.

Essa rede foi dividida em 2 classes, sendo que a primeira é composta pelos nós e ramos principais e a segunda pelos nós e ramos secundários.

Os dados utilizados no problema referentes aos custos dos equipamentos, energia não suprida, taxas de faltas e tempos de reparo foram retirados de Conceição (2018) e são descritos a seguir.

Para um horizonte de planejamento de 10 anos, os parâmetros de confiabilidade foram considerados constantes, adotou-se tempo médio de reparação da falta permanente $TP = 4$ horas e tempo médio de reparação da falta temporária $TT = 0,17h$.

A taxa de falta permanente média anual adotada foi de $\lambda = 0,072$ falta/km/ano; já a taxa de falta temporária média anual foi de $\gamma = 0,98$ falta/km/ano. Essa taxa sinaliza ao algoritmo se há trechos com maior disposição à ocorrência de defeitos, no caso do trabalho, ela foi aplicada uniformemente em toda a extensão da linha, fazendo com trechos de maior extensão sejam mais susceptíveis à faltas do que os demais. A função objetiva é calculada para faltas permanentes e temporárias na rede de acordo com as taxas de faltas.

A tarifa de energia T adotada foi de R\$ 282,48/ MWh segundo dados divulgados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) em 2021. Este dado é conhecido como Preço da Liquidação das Diferenças (PLD) (CCEE, 2021).

As cargas das barras, assim como o comprimento dos ramos entre as barras e as impedâncias da linha são as mesmas utilizados por Görgen (2014) e são apresentadas nos apêndices. Os custos fixos dos equipamentos de proteção estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Custo fixo dos dispositivos

Dispositivo	CF (US\$)	CF (R\$)
Religador	15000	73531,50
Chave Fusível	500	2451,05

Fonte: (LEMES, 2021).

Como critério de confiabilidade foi considerado que no início de cada ramo secundário é alocado um fusível, obrigatoriamente. Essa prática assegura a existência de uma proteção caso ocorra um curto-circuito no ramo. Além disso, foi considerada a instalação de um religador no barramento de saída da subestação, na barra 1. A tabela 3 mostra os ramos da rede em que foi pré-determinada a alocação de fusíveis.

Tabela 3 - Barras com alocação pré-determinada de fusíveis

Barras com alocação pré-determinada de fusíveis			
6 - 32 - 40 - 49 - 59 - 64 - 71 - 78 - 84 - 92 - 111 - 116 - 128 - 137			

Fonte: Próprio autor.

A solução do algoritmo genético, portanto, contempla as barras que se mostraram economicamente viáveis para instalação de fusíveis e religadores, além das apresentadas acima.

Na tabela 4 é mostrado a solução obtida pela implementação computacional do algoritmo genético para 400 iterações, com tempo de simulação de 1 minuto e 15 segundos.

Tabela 4 - Alocação para 400 iterações

Tipo de dispositivo	Quantidade de dispositivos	Barras de instalação no SDEE	Custo Total (R\$)
Religador	1	44	283640,00
Fusível	3	7 – 17 – 101	

Fonte: Próprio autor.

Na tabela 5 é mostrado a solução do algoritmo genético para 1000 iterações, com tempo de simulação de 3 minutos e 38 segundos.

Tabela 5 - Alocação para 1000 iterações

Tipo de dispositivo	Quantidade de dispositivos	Barras de instalação no SDEE	Custo Total (R\$)
Religador	1	44	281650,00
Fusível	2	12 – 79	

Fonte: Próprio autor.

Por fim, na tabela 6 é mostrado a solução do problema utilizando 2000 iterações, sendo que o tempo de simulação para obtenção deste resultado foi de 7 minutos e 11 segundos.

Tabela 6 - Alocação para 2000 iterações

Tipo de dispositivo	Quantidade de dispositivos	Barras de instalação no SDEE	Custo Total (R\$)
Religador	1	44	283500,00
Fusível	3	17 – 60 – 93	

Fonte: Próprio autor.

A figura 14 apresenta o diagrama da rede de 143 barras e o resultado da alocação de fusíveis e religadores para 1000 iterações.



7.1 Dimensionamento dos fusíveis

De acordo com os critérios apresentados no item 3.1.1, foram especificados os fusíveis tipo k para a solução de 1000 iterações, que resultou no menor custo, juntamente com os fusíveis obrigatórios apresentados na tabela 3.

Os dados da corrente I em cada barra e da corrente de curto-circuito mínima (I_{cc}) no fim do trecho protegido, utilizados nesse dimensionamento, foram obtidos através do *software* OpenDSS, conforme apresentado no item 4.1 e são mostrados na tabela 7.

Tabela 7 - Corrente elétricas

Barras de instalação do SDEE	I (A)	I _{cc} (A)
6	38,728	3567
12	27,975	3567
32	6,4757	4505
40	6,5303	4317
49	11,047	3317
59	14,512	3137
64	11,873	3387
71	9,7306	3112
78	8,1415	2838
79	6,5663	2838
84	5,2378	2809
92	27,56	1823
111	60,005	1708
116	49,684	1262
128	30,481	1210
137	7,6117	1048

Fonte: Próprio autor.

Conforme o item 3.1.1 o valor nominal do fusível deve ser maior que 1,5 o valor da corrente de carga na seção onde será instalado o dispositivo, pois considera um acréscimo de carga elétrica de 50% nesses dez anos, e menor que 25% da corrente mínima de falta a terra no final do ramal analisado. Essas razões foram calculadas e são mostradas na tabela 8.

Tabela 8 - Razões para dimensionamento dos fusíveis

Barras de instalação do SDEE	1,5*I (A)	0,25*I_{cc}(A)
6	58,092	891,75
12	41,9625	891,75
32	9,71355	1126,25
40	9,79545	1079,25
49	16,5705	829,25
59	21,768	784,25
64	17,8095	846,75
71	14,5959	778
78	12,21225	709,5
79	9,84945	709,5
84	7,8567	702,25
92	41,34	455,75
111	90,0075	427
116	74,526	315,5
128	45,7215	302,5
137	11,41755	262

Fonte: Próprio autor.

Os valores nominais recomendados para elos fusíveis tipo K foram retirados da norma técnica NTC-66 e são mostrados na tabela 9.

Tabela 9 - Valores recomendados para elos fusíveis tipo K

Valores nominais preferenciais fusíveis tipo K
6 A, 10 A, 15 A, 25 A, 40 A, 65 A, 100 A, 140 A e 200 A;

Fonte: CELG DISTRIBUIÇÃO S.A., 2014.

Sendo assim, são apresentados os dimensionamentos na tabela 10.

Tabela 10 - Dimensionamento de fusíveis

Ramo de instalação do SDEE	Corrente nominal do fusível (A)
6	65
12	200
32	10
40	10
49	25
59	25
64	25
71	15
78	15
79	100
84	10
92	65
111	100
116	100
128	65
137	15

Fonte: Próprio autor.

Considerando a necessidade de realizar coordenação entre fusíveis ligados em série, os dispositivos ligados nos ramais 12 e 79 foram dimensionados a partir da tabela 1, por estarem ligados em série com os fusíveis 6 e 78 respectivamente, conforme pode ser visto na figura 14.

Para coordenar o elo fusível protetor da barra 6 de 65A com o elo fusível protegido da barra 12, foi considerado que a maior corrente de curto-circuito do trecho é de 7670A, conforme mostrado no anexo B. A tabela 1 mostra que para esse valor de corrente de curto-circuito, só é possível coordenação com fusíveis acima de 200A, portanto foi dimensionado um fusível com essa corrente nominal para a barra 12.

Da mesma forma, para coordenar o fusível protetor da barra 78 de 15A com o fusível protegido da barra 79, foi considerado que a maior corrente de curto-circuito do

trecho é 3301A. Sendo assim, ao analisar a tabela 1, a coordenação será possível com o fusível de 100 A.

8 CONCLUSÃO

A alocação otimizada de dispositivos de proteção traz melhorias no desempenho de redes de distribuição de energia elétrica, permitindo que as concessionárias minimizem os custos gerados pelas interrupções de energia elétrica, tanto em relação aos índices de confiabilidade quanto à fatura de energia dos consumidores.

Por falta de estudos ou investimentos em proteção, as falhas na rede elétrica podem atingir muitos consumidores e gerar sérios danos, como perdas na produção e riscos de morte, o que pode ser minimizado com uma eficaz alocação de dispositivos de proteção.

Em suma, os resultados deste trabalho mostraram que é possível aumentar a confiabilidade da rede elétrica e ao mesmo tempo minimizar os custos de investimento da concessionária de energia, através da alocação otimizada de dispositivos utilizando algoritmo genético.

Percebeu-se que conforme foi acrescido o número de iterações na simulação, o custo total foi sendo minimizado, até alcançar uma boa solução, utilizando 1000 iterações, com tempo de simulação relativamente baixo. Através do cálculo do fluxo de potência, foi possível realizar o dimensionamento dos fusíveis e desenvolver os estudos acerca do tema de seletividade.

Os resultados deste trabalho poderão ajudar à concessionária de energia elétrica local a obter a melhor confiabilidade da rede elétrica perante faltas temporárias e permanentes e reduzir os custos com alocação de dispositivos.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Qualidade do serviço.** 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/qualidade-do-servico2>. Acessado em: 07 dez 2021.
- ALMEIDA, A. A. W. **Notas de aula em sistemas elétricos de potência.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, Brasil, 2017.
- BARROS, A. F. A. **Análise das principais causas de descontinuidade no fornecimento de energia elétrica e de seus impactos nos indicadores de qualidade.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2020.
- BLUME, S. W. **Electric Power System Basics for the Nonelectrical Professiona.** 2 ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2002.
- CARNEIRO, M. S. **Utilização do software OpenDSS para cálculo das perdas técnicas em redes de distribuição.** 2019. 66f. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- CCEE. **PLD.** 2021. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/dados-e-analises/dados-pld>. Acessado em: 10 dez 2021.
- CELG DISTRIBUIÇÃO S.A. **NTC-66: Elos Fusíveis de Distribuição Especificação.** Goiânia, 2014.
- COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ- CPFL. **Norma técnica 2912: proteção de redes áreas de distribuição – sobrecorrente.** [s.l.], 2016. p.8.
- CONCEIÇÃO, K. P. **Uma nova metodologia para o desenvolvimento de projetos de proteção de redes ativas de distribuição de energia elétrica.** 2018. 147f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – UNESP, Ilha Solteira, 2018.
- GENTILE, P. et al. **Configuração das proteções de uma rede de distribuição em média tensão (15KV).** 2013. 76f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade São Francisco, Itatiba, 2013.
- GÖRGEN, T. M. **Análise de sistema elétrico de distribuição.** 2014. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Jataí, 2014.

LEMES, J. P. S. **Alocação otimizada de dispositivos de controle e proteção através de algoritmos genéticos multiobjetivos**, 2021. 104f. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 2021.

LIMA, L. O. **Alocação de capacitores e filtros passivos em rede de distribuição de energia elétrica utilizando o algoritmo genético chu-beasley**. 2021. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Jataí, 2021.

MAGALHÃES, E. F. A. **Modelagem e Simulação de Indicadores de Continuidade: Ferramenta Auxiliar para a Manutenção em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. M. Sc. dissertação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, 2017.

FILHO, J. M; MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MEDEIROS, C. **Curtos-Circuitos Trifásicos no Sistema Elétrico**. ENG 3517 Sistemas Elétricos, cap 5. Escola de Engenharia Elétrica PUC Goiás, 2017.

GERS, J.M; HOLMES, E.J. **Protection of electricity distribution networks**. 3 ed. London: The Institute of Electrical Engineers, 2011.

RODRIGUES, R. B. **Proposta de uma metodologia para alocação de dispositivos de manobras e proteção em redes de distribuição para melhoria dos índices de continuidade**. 2022. M. Sc. Dissertação – Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2022.

SATO, F. **Proteção de sistemas de energia elétrica**. Campinas: Engenharia Elétrica e da Computação-UNICAMP. 2003. v2, p.6.

ANEXO A

Na tabela 11 são mostrados os dados da rede de distribuição local de 143 barras utilizada no trabalho.

Em que:

Bi: barra inicial; Bf: barra final;

P: potência ativa na barra; Q: potência reativa na barra;

R1 e R2: resistência de sequência positiva e negativa do trecho; X1 e X2: reatância de sequência positiva e negativa do trecho; R0: resistência de sequência zero do trecho; X0: reatância de sequência zero do trecho.

Tabela 11 - Dados da rede de distribuição local

Bi	Bf	P	Q	R1 e R2	X1 e X2	R0	X0
0	1	82802,41	35266,99	0,084577	0,060098	0,25373	0,180293
1	2	82802,41	35266,99	0,081005	0,05756	0,243015	0,17268
2	3	0	0	0,088916	0,063181	0,266747	0,189543
3	4	82802,41	35266,99	0,023565	0,016744	0,070694	0,050233
3	5	0	0	0,066205	0,047043	0,198615	0,14113
5	6	55201,61	23511,33	0,247127	0,065492	0,741382	0,196475
6	7	0	0	0,14112	0,037398	0,42336	0,112195
7	8	33120,96	14106,8	0,033572	0,008897	0,100717	0,026691
7	9	0	0	0,163856	0,043424	0,491567	0,130271
9	10	110403,2	47022,65	0,021931	0,005812	0,065792	0,017436
9	11	33120,96	14106,8	0,131636	0,034885	0,394907	0,104655
7	12	55201,61	23511,33	0,088819	0,023538	0,266456	0,070614
12	13	82802,41	35266,99	0,322729	0,085527	0,968187	0,256581
13	14	0	0	0,147746	0,039154	0,443237	0,117463
14	15	110403,2	47022,65	0,059486	0,023546	0,178458	0,070638
14	16	0	0	0,186762	0,049494	0,560286	0,148482
16	17	82802,41	35266,99	0,117803	0,031219	0,353408	0,093657
17	18	55201,61	23511,33	0,05903	0,015644	0,177089	0,046931
16	19	0	0	0,06029	0,023865	0,180871	0,071594

19	20	22080,64	9404,53	0,029104	0,007713	0,087312	0,023139
19	21	0	0	0,057866	0,022905	0,173598	0,068715
21	22	55201,61	23511,33	0,068189	0,018071	0,204567	0,054213
21	23	82802,41	35266,99	0,110035	0,043555	0,330104	0,130664
21	24	55201,61	23511,33	0,259573	0,06879	0,77872	0,20637
5	25	0	0	0,129975	0,092357	0,389925	0,27707
25	26	55201,61	23511,33	0,114721	0,030402	0,344163	0,091207
25	27	0	0	0,037534	0,026671	0,112602	0,080012
27	28	55201,61	23511,33	0,032922	0,008725	0,098765	0,026174
27	29	55201,61	23511,33	0,199677	0,141885	0,59903	0,425654
29	30	0	0	0,025763	0,018307	0,077289	0,05492
30	31	55201,61	23511,33	0,231154	0,061259	0,693463	0,183776
30	32	0	0	0,224255	0,05943	0,672765	0,17829
32	33	55201,61	23511,33	0,108421	0,028733	0,325263	0,086198
32	34	82802,41	35266,99	0,311687	0,082601	0,93506	0,247802
30	35	55201,61	23511,33	0,101165	0,071885	0,303496	0,215656
35	36	0	0	0,05058	0,035941	0,151739	0,107822
36	37	55201,61	23511,33	0,046284	0,01832	0,138852	0,054961
36	38	55201,61	23511,33	0,079361	0,056391	0,238082	0,169174
38	39	0	0	0,051347	0,036486	0,154042	0,109458
39	40	0	0	0,051874	0,013747	0,155621	0,041241
40	41	55201,61	23511,33	0,013867	0,003675	0,041602	0,011025
40	42	82802,41	35266,99	0,193285	0,051223	0,579854	0,153668
39	43	55201,61	23511,33	0,103179	0,073316	0,309537	0,219949
43	44	0	0	0,014085	0,010008	0,042254	0,030024
44	45	33120,96	14106,8	0,031843	0,008439	0,09553	0,025316
44	46	55201,61	23511,33	0,075852	0,053899	0,227557	0,161696
46	47	0	0	0,030754	0,021853	0,092262	0,065559
47	48	55201,61	23511,33	0,131259	0,034785	0,393777	0,104356
47	49	33120,96	14106,8	0,22268	0,059013	0,66804	0,177038
49	50	0	0	0,189108	0,050116	0,567323	0,150347
50	51	33120,96	14106,8	0,077964	0,020661	0,233893	0,061984
50	52	55201,61	23511,33	0,198626	0,052638	0,595879	0,157915

50	53	110403,2	47022,65	0,118046	0,046726	0,354139	0,140177
47	54	0	0	0,052386	0,037224	0,157157	0,111672
54	55	220806,4	94045,31	0,029155	0,007727	0,087466	0,02318
54	56	0	0	0,050095	0,035596	0,150285	0,106789
56	57	82802,41	35266,99	0,081303	0,021546	0,243909	0,064639
56	58	0	0	0,008897	0,006322	0,026692	0,018967
58	59	55201,61	23511,33	0,055409	0,021932	0,166226	0,065796
59	60	82802,41	35266,99	0,287886	0,113953	0,863659	0,341859
60	61	0	0	0,025368	0,010041	0,076104	0,030124
61	62	55201,61	23511,33	0,045865	0,018155	0,137596	0,054464
61	63	110403,2	47022,65	0,124537	0,049295	0,373611	0,147885
58	64	82802,41	35266,99	0,208047	0,08235	0,62414	0,247051
64	65	0	0	0,099753	0,039485	0,299259	0,118454
65	66	82802,41	35266,99	0,006965	0,002757	0,020894	0,00827
65	67	82802,41	35266,99	0,157553	0,062364	0,472659	0,187091
58	68	0	0	0,094876	0,067416	0,284628	0,202249
68	69	22080,64	9404,53	0,03424	0,009074	0,10272	0,027222
68	70	0	0	0,032324	0,022968	0,096971	0,068905
70	71	82802,41	35266,99	0,047298	0,018722	0,141894	0,056165
71	72	0	0	0,09183	0,036349	0,275489	0,109046
72	73	33120,96	14106,8	0,103764	0,027499	0,311293	0,082496
72	74	0	0	0,136196	0,05391	0,408589	0,16173
74	75	33120,96	14106,8	0,094314	0,024994	0,282942	0,074983
74	76	55201,61	23511,33	0,284415	0,075373	0,853244	0,22612
70	77	0	0	0,080595	0,057269	0,241786	0,171806
77	78	33120,96	14106,8	0,125848	0,049814	0,377545	0,149442
78	79	0	0	0,151966	0,060152	0,455897	0,180456
79	80	82802,41	35266,99	0,06961	0,018447	0,20883	0,055342
79	81	55201,61	23511,33	0,241683	0,064049	0,725049	0,192146
77	82	55201,61	23511,33	0,025261	0,01795	0,075783	0,053849
82	83	0	0	0,108453	0,077064	0,325359	0,231191
83	84	0	0	0,264197	0,187731	0,79259	0,563192
84	85	55201,61	23511,33	0,044152	0,011701	0,132457	0,035103

84	86	55201,61	23511,33	0,039294	0,027921	0,117881	0,083763
83	87	82802,41	35266,99	0,03005	0,021353	0,09015	0,064058
87	88	0	0	0,140615	0,099917	0,421845	0,299751
88	89	55201,61	23511,33	0,107809	0,042673	0,323426	0,12802
88	90	82802,41	35266,99	0,029323	0,020836	0,087969	0,062509
90	91	0	0	0,098384	0,069909	0,295153	0,209727
91	92	55201,61	23511,33	0,11895	0,031523	0,356849	0,094569
92	93	0	0	0,313604	0,083109	0,940812	0,249326
93	94	55201,61	23511,33	0,325999	0,086394	0,977997	0,259181
93	95	55201,61	23511,33	0,066443	0,017608	0,199328	0,052824
95	96	55201,61	23511,33	0,204738	0,054258	0,614214	0,162774
96	97	55201,61	23511,33	0,311745	0,123397	0,935234	0,37019
97	98	0	0	0,112613	0,044575	0,33784	0,133726
98	99	55201,61	23511,33	0,16573	0,0656	0,497189	0,1968
98	100	55201,61	23511,33	0,100392	0,039738	0,301177	0,119213
100	101	0	0	0,110685	0,043812	0,332055	0,131436
101	102	55201,61	23511,33	0,140778	0,037308	0,422333	0,111923
101	103	0	0	0,084424	0,033417	0,253273	0,100252
103	104	55201,61	23511,33	0,041094	0,016266	0,123281	0,048798
103	105	55201,61	23511,33	0,20538	0,081295	0,616139	0,243884
93	106	33120,96	14106,8	0,292701	0,077569	0,878102	0,232707
91	107	55201,61	23511,33	0,272636	0,072252	0,817908	0,216755
107	108	0	0	0,296262	0,078513	0,888785	0,235538
108	109	82802,41	35266,99	0,215022	0,085111	0,645067	0,255334
108	110	0	0	0,445805	0,118143	1,337414	0,35443
110	111	82802,41	35266,99	0,16314	0,064575	0,48942	0,193725
111	112	0	0	0,315385	0,083581	0,946154	0,250742
112	113	55201,61	23511,33	0,268459	0,071145	0,805376	0,213434
112	114	82802,41	35266,99	0,326615	0,086557	0,979846	0,259671
110	115	0	0	0,821948	0,217826	2,465845	0,653478
115	116	0	0	0,096315	0,038124	0,288944	0,114372
116	117	55201,61	23511,33	0,15497	0,041069	0,464911	0,123207
116	118	82802,41	35266,99	0,128251	0,050765	0,384752	0,152295

118	119	82802,41	35266,99	0,709556	0,188041	2,128667	0,564122
119	120	82802,41	35266,99	0,600124	0,15904	1,800373	0,47712
115	121	33120,96	14106,8	0,05701	0,015108	0,171029	0,045325
121	122	22080,64	9404,53	0,444658	0,11784	1,333973	0,353519
122	123	0	0	0,090548	0,023996	0,271643	0,071989
123	124	22080,64	9404,53	0,326115	0,129085	0,978345	0,387254
123	125	0	0	0,41908	0,111061	1,257241	0,333184
125	126	33120,96	14106,8	0,059519	0,023559	0,178557	0,070677
125	127	0	0	0,533476	0,141377	1,600429	0,424132
127	128	0	0	0,14237	0,03773	0,42711	0,113189
128	129	55201,61	23511,33	0,031312	0,008298	0,093937	0,024895
128	130	55201,61	23511,33	0,130677	0,034631	0,392031	0,103893
127	131	552016,1	235113,27	1,662934	0,440697	4,988802	1,322091
127	132	55201,61	23511,33	0,101145	0,026805	0,303435	0,080414
132	133	0	0	0,137713	0,036496	0,41314	0,109487
133	134	55201,61	23511,33	0,046258	0,012259	0,138775	0,036777
133	135	55201,61	23511,33	0,555458	0,147203	1,666375	0,441609
135	136	0	0	0,170019	0,045057	0,510056	0,135171
136	137	55201,61	23511,33	0,162298	0,043011	0,486893	0,129032
137	138	55201,61	23511,33	0,17084	0,045275	0,512521	0,135824
136	139	55201,61	23511,33	0,161647	0,042838	0,484941	0,128515
139	140	0	0	0,212083	0,056204	0,636248	0,168613
140	141	55201,61	23511,33	0,277567	0,073558	0,8327	0,220675
140	142	55201,61	23511,33	0,260703	0,069089	0,78211	0,207268
142	143	55201,61	23511,33	0,437296	0,115889	1,311888	0,347666

Fonte: GÖRGEN, 2014.

ANEXO B

Na tabela 12 são mostrados os dados da corrente I em cada barra e Icc (trifásica) em cada barra de distribuição, utilizando o software OpenDSS.

Tabela 12 - Correntes das barras

	I (A)	Icc (A)
B1	264,370	76781
B2	260,600	39214
B3	256,810	10057
B4	3,828	9758
B5	252,990	9270
B6	38,728	7670
B7	36,168	6899
B8	1,536	6730
B9	6,661	6135
B10	5,129	6042
B11	1,536	5614
B12	27,975	6469
B13	25,412	5219
B14	21,561	4778
B15	51,378	4606
B16	16,431	4309
B17	6,426	4054
B18	2,568	3937
B19	10,009	4165
B20	1,025	4103
B21	8,992	4035
B22	2,568	3901
B23	3,855	3808
B24	2,569	3567
B25	214,270	7981
B26	2,568	7347
B27	211,700	7664
B28	2,571	7487
B29	209,030	6298
B30	206,550	6154
B31	2,591	5344
B32	6,476	5367
B33	2,591	5038
B34	3,889	4505
B35	197,480	5642
B36	194,480	5414
B37	2,602	5256

B38	192,290	5091
B39	189,680	4900
B40	6,530	4767
B41	2,613	4732
B42	3,921	4317
B43	183,150	4555
B44	180,530	4512
B45	1,571	4441
B46	178,960	4291
B47	176,340	4207
B48	2,629	3957
B49	11,047	3797
B50	9,470	3498
B51	1,577	3386
B52	2,631	3225
B53	5,266	3317
B54	162,670	4071
B55	1,051	4016
B56	161,620	3948
B57	3,956	3807
B58	157,670	3927
B59	14,512	3821
B60	11,875	3345
B61	7,915	3308
B62	2,639	3243
B63	5,281	3137
B64	11,873	3554
B65	7,914	3397
B66	39,589	3387
B67	3,959	3173
B68	131,280	3715
B69	1,052	3661
B70	130,240	3647
B71	9,731	3568
B72	5,780	3423
B73	1,578	3284
B74	4,206	3226
B75	1,578	3112
B76	2,632	2902
B77	120,510	3489
B78	8,142	3301
B79	6,566	3097
B80	3,943	3018
B81	2,627	2838
B82	112,370	3442

B83	109,750	3253
B84	5,238	2860
B85	2,621	2817
B86	2,621	2809
B87	104,510	3204
B88	100,580	2994
B89	2,613	2871
B90	97,970	2953
B91	94,050	2825
B92	27,560	2715
B93	12,477	2581
B94	12,477	2336
B95	2,605	2528
B96	20,795	2375
B97	18,191	2157
B98	15,588	2087
B99	12,987	1992
B100	2,600	2029
B101	10,390	1967
B102	7,791	1900
B103	2,599	1923
B104	5,195	1902
B105	2,599	1823
B106	2,599	2359
B107	1,561	2587
B108	66,493	2366
B109	63,892	2211
B110	3,891	2090
B111	60,005	1995
B112	10,324	1844
B113	6,450	1731
B114	2,581	1708
B115	3,873	1712
B116	49,684	1673
B117	14,103	1617
B118	2,566	1624
B119	11,541	1406
B120	7,692	1262
B121	3,845	1691
B122	35,585	1538
B123	34,047	1510
B124	33,025	1410
B125	1,021	1393
B126	32,008	1377
B127	1,530	1267

B128	30,481	1237
B129	5,089	1230
B130	2,546	1210
B131	2,546	982
B132	2,545	1246
B133	22,851	1217
B134	20,305	1208
B135	2,545	1115
B136	17,764	1101
B137	7,612	1074
B138	7,612	1048
B139	5,080	1074
B140	2,540	1042
B141	10,151	1002
B142	7,611	1004
B143	2,539	947

Fonte: Próprio autor.

ANEXO C

Segue algoritmo principal utilizado no trabalho.

```

clear all

tic

%Definindo ramos principal e secundário de acordo com a planta

principal = [1 2 3 5 25 27 29 30 35 36 0 38 39 43 44 46 47 54 56 58 68 70 77 82 0 83 87
88 90 91 107 108 110 115 121 122 123 125 0 127 132 133 135 136 139 140 142 143];

secundario = [6 7 9 0 12 13 14 16 17 19 21 0 32 40 49 50 59 60 61 64 65 71 72 74 78 79
84 92 0 93 95 96 97 98 100 101 103 111 0 112 116 118 119 128 137];

menorcusto = 10000000000000;

for h =1:1:5000

    h

    %Após definir os ramos principal e secundário vamos criar

    %gerar novamente a tabela principal, guardar o melhor indivíduo da nova

    %população mutada, gerar tudo novamente. 2000X

    %tab1principal=[ones(100,1)*44 zeros(100,2)]

    tab1principal = principal(round(rand(100,3)*47)+1); %RAMO PRINCIPAL

    tab2secundario = secundario(round(rand(100,15)*44)+1);%RAMO SECUNDÁRIO

    tudo = [tab1principal tab2secundario]; %UNIÃO PARA FORMAR OS 100 INDIVÍDUO

    individuos = tudo(:,:);

    %testar custo

    for k=1:1:100

        aux = individuos(k,:);

        custoporindivíduo = calcustos(aux);

        if custoporindivíduo<menorcusto

```

```

        menorcusto = custoporindivíduo;

        melhorindivíduo = indivíduos (k,:);

    end

end

for k=1:2:100

    %Após gerado nossa tabela com os 100 indivíduos, vamos escolher
    %aleatoriamente 2 indivíduos para gerarem 2 filhos.

    escolha = round(rand(1,2)*99)+1

    %após a escolha de dois pais vamos gerar os filhos através de um ponto de
    %corte.

    escolhacorte = round(rand(1)*17)+1;

    %Geração de novos filhos.

    aux01 = tudo(escolha(1),:);
    aux02 = tudo(escolha(2),:);

    for i = 1:1:escolhacorte

        filho01(i) = aux01(i);

        filho02(i) = aux02(i);

    end

    for i = escolhacorte+1:1:18

        filho01(i) = aux02(i);

        filho02(i) = aux01(i);

    end

    filho01;

    filho02;

```

%Mutação Filho 01

escolhamutacaofilho01 = round(rand(1)*17)+1;

if escolhamutacaofilho01 > 3

 i=1;

 while filho01(escolhamutacaofilho01) ~= secundario(i)

 i= i+1;

 end

 if i == 45 %E quando é o último número do ramo? permanece o mesmo, sem mutar?

 %Retorna ao primeiro elemento do secundário

 else

 filho01(escolhamutacaofilho01) = secundario(i+1);

 end

else

 i=1;

 while filho01(escolhamutacaofilho01) ~= principal(i)

 i= i+1;

 end

 if i == 48

 %E quando é o último número do ramo? permanece o mesmo, sem mutar?

 %Retorna ao primeiro elemento do primário

 else

 filho01(escolhamutacaofilho01) = principal(i+1);

 end

end

```

filho01;

%Mutação Filho 02

escolhamutacaofilho02 = round(rand(1)*17)+1;

if escolhamutacaofilho02 > 3

    i=1;

    while filho02(escolhamutacaofilho02) ~= secundario(i)

        i= i+1;

    end

    if i == 45

    else

        filho02(escolhamutacaofilho02) = secundario(i+1);

    end

else

    i=1;

    while filho02(escolhamutacaofilho02) ~= principal(i)

        i= i+1;

    end

    if i == 48

    else

        filho02(escolhamutacaofilho02) = principal(i+1);

    end

end

filho01;

filho02;

```

```

Novapopulacao(k,:)= filho01;

Novapopulacao(k+1,:) = filho02;

end

%passar toda a nova população pela função objetivo e pegar o menor valor fa
%função e a linha completa do individuo em um vetor.

Novapopulacao ;

indivduos = Novapopulacao(:,:);

%testar custo

for k=1:1:100

    aux = indivduos(k,:);

    custoporindividuo = calcustos(aux);

    if custoporindividuo<menorcusto

        menorcusto = custoporindividuo;

        melhorindividuo = indivduos (k,:);

    end

end

end

end

t= toc;

melhorindividuo

menorcusto

indivduos;

```

ANEXO D

Segue função de cálculo de custos utilizada no trabalho.

```
function y = calcustos(ind)

%ind=[ 0   0  44   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0  50];

afusiveis=[6 32 40 49 59 64 71 78 84 92 111 116 128 137 ]; % Colocar todos os fusíveis
pré-alocados. (Se tiver só uma barra secundária, não alocar)

ind=[1 ind afusiveis];

load 'barras.txt' %Puxar o arquivo barras.txt

bar=barras; % A matriz bar contém Bi (primeira coluna) Bf (segunda coluna) e Potência
ativa (terceira coluna)

custo=0;

secundario=[6 7 9 12 13 14 16 17 19 21 32 40 49 50 55 59 60 61 64 65 71 72 74 78 79
84 92 93 95 96 97 98 100 101 103 109 111 112 116 118 119 128 137]; % Aqui deve-se
colocar todas as barras secundárias, menos as finais

finalsec=[4 8 10 11 15 18 20 22 23 24 26 28 31 33 34 37 41 42 45 48 51 52 53 55 57 62
63 66 67 69 73 75 76 80 81 85 86 89 94 99 102 104 105 106 109 113 114 117 120 124
129 130 131 134 138 141]; % Barras secundárias finais

tam=length(finalsec); % tamanho

for cont=1:tam % contar de 1 até a quantidade de barras finais

    x=finalsec(cont); % barra final

    k=1; % Contar os km

    cargas=bar(x,3); % Carga na barra final

    binicial=bar(x,1); % barra na qual está conectada a barra x (utilizando o vetor Bi)

    valor1=find(binicial==secundario); % Verifica se a barra se encontra no vetor
secundario

    while length(valor1)>0 % Verifica se o resultado da busca anterior é maior que zero
```

```

valor2=find(binicial==ind); % Verifica se a barra se encontra no individuo (fusível)

k=k+1;

cargas=cargas+bar(binicial,3); % Somatório das cargas nas barras ligadas entre si

if length(valor2)>0

    custo=custo+(k-1)*0.072*4*10*282.48(cargas/1000000); % Custo total da
    interrupção permanente só computado quando é encontrado um fusível

    k=1; % recomeça essa contagem

end

secundario(valor1)=0; % Aqui é zerado a barra (binicial) no vetor secundário

binicial=bar(binicial,1);

valor1=find(binicial==secundario);

end

end

% Falta temporária (ramo principal)

cargasp(1)=5553281.77; cargasp(2)= 5470479.36; cargasp(3)= 5470479.36; cargasp(5)=
5387676.95; cargasp(25)= 4554132.67; cargasp(27)= 4498931.06;

cargasp(29)= 4388527.84; cargasp(30)= 4388527.84; cargasp(35)= 4140120.60;
cargasp(36)= 4140120.60; cargasp(38)= 4029717.38; cargasp(39)= 4029717.38;

cargasp(43) = 3836511.75; cargasp(46)= 3748189.18; cargasp(47)= 3748189.18;
cargasp(54)= 3461140.82; cargasp(55)= 3439060.18; cargasp(56)= 3439060.18;

cargasp(59)= 3301059.16; cargasp(68)= 284241.69; cargasp(70)= 2782161.05;
cargasp(77)= 2577915.11; cargasp(82)= 22351588.52; cargasp(83)= 2351588.52;

cargasp(87)= 2158382.89; cargasp(88)= 2158382.89; cargasp(90)= 22020378.87;
cargasp(91)= 2020378.87; cargasp(107)= 1380040.20; cargasp(108)= 1380040.20;

cargasp(110)= 1794052.26; cargasp(115)= 1573245.83; cargasp(121)= 1236516.03;
cargasp(122)= 1214435.39; cargasp(123)= 1214435.39; cargasp(125)= 1192354.75;

```

```
cargasp(127)= 662419.32; cargasp(132)= 441612.88; cargasp(133)= 441612.88;
cargasp(135)= 331209.66; cargasp(136)= 3311209.66; cargasp(139)= 165604.83;
```

```
cargasp(140)= 165604.83; cargasp(142)= 55201.61; cargasp(143)= 0;
```

```
% Colocar a quantidade de carga para cada barra do ramo principal
```

```
x=143; % barra final
```

```
k=1; % Contar os km
```

```
cargas = cargasp(x);
```

```
binicial=bar(x,1);
```

```
while binicial>0
```

```
valor=find(binicial==ind); % Verifica se a barra se encontra no individuo
```

```
k=k+1;
```

```
cargas=cargasp(binicial);
```

```
if length(valor)>0
```

```
    custo=custo+(k-1)0.98*10*0.17*282.48(cargas/1000000); % Custo total da
    interrupção temporária só computado quando é encontrado um regulador
```

```
    k=1; % recomeça essa contagem
```

```
    %0,98 probabilidade, lâmbida/ 282,48 tarifa de energia / 0,17
```

```
    %hora(10 min)10/60
```

```
    %parada
```

```
end
```

```
binicial=bar(binicial,1);
```

```
end
```

