

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Christian Mendes Pereira

**Planejamento de Chaves em Redes de Distribuição Utilizando Fluxo de
Potência Ótimo**

Juiz de Fora

2021

Christian Mendes Pereira

**Planejamento de Chaves em Redes de Distribuição Utilizando Fluxo de
Potência Ótimo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. D.Sc. Leonardo Willer de Oliveira

Coorientador: Prof. D.Sc. Bruno Henriques Dias

Juiz de Fora

2021

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pereira, Christian.

Planejamento de Chaves em Redes de Distribuição Utilizando Fluxo de Potência Ótimo / Christian Mendes Pereira. – 2021.

117 f. : il.

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira

Coorientador: Bruno Henriques Dias

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2021.

1. Alocação. 2. Interconexões. 3. Sistemas de Distribuição. 4. Confiabilidade. 5. Chaves seccionadoras. 6. Sistema Imune Artificial.. I. Oliveira, Leonardo Willer de, orient. II. Dias, Bruno Henriques, coorient. III. Título.

Christian Mendes Pereira

Planejamento de Chaves em Redes de Distribuição Utilizando Fluxo de Potência Ótimo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Aprovada em 18 de fevereiro de 2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. D.Sc. Leonardo Willer de Oliveira - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. D.Sc. Bruno Henriques Dias - Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora



Assinado de forma digital por VITOR
HUGO FERREIRA
vhferreira@id.uuff.br:01277679673
Dados: 2021.04.30 11:09:07 -03'00'

Prof. D.Sc. Vitor Hugo Ferreira
Universidade Federal Fluminense



Prof. D.Sc. Leandro Ramos de Araujo
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao Mestre dos mestres, Jesus Cristo, por me guiar e nunca me desamparar.

Ao meu orientador, Leonardo Willer de Oliveira, pela grande atenção e inspiração.

Ao meu coorientador, Bruno Henriques Dias, pelo exemplo de vida, competência e engajamento no programa.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação da UFJF e colegas de curso, por expandirem meus horizontes e limites.

Aos meus familiares e amigos, pelas orações.

À minha noiva Thais Lorrane Moreira Mendes, pela doce companhia nos momentos tristes e felizes.

Ao CNPq pelo incentivo financeiro que permitiu a dedicação integral ao programa.

De fato, cursar o mestrado não é tarefa fácil. Se consegui chegar até o final foi porque Deus colocou estas pessoas em minha vida. Que Ele as abençoe.

“Confia ao Senhor as tuas obras, e os teus desígnios
serão estabelecidos.” (Pv 16.3 ARA).

RESUMO

Haja vista a grande relevância da área de confiabilidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica tanto para as concessionárias quanto para os consumidores, propõe-se, com este trabalho, uma metodologia para planejamento de interconexões baseada na utilização de multiplicadores de Lagrange obtidos do problema de Fluxo de Potência Ótimo. Tais variáveis, quando determinadas para equações de balanço de potência e de limite superior das variáveis de chaveamento, permitem quantificar, respectivamente, a potencial transferência de potência entre alimentadores e a tendência de fechamento da chave de interconexão para maximizar o carregamento do sistema. Torna-se, assim, possível determinar as melhores interconexões dentre uma variedade de candidatas através do algoritmo heurístico construtivo proposto. Como resultado, adquire-se uma alocação mais eficaz de chaves seccionadoras no propósito de melhoria de confiabilidade do sistema, o que há de ser comprovado nos estudos de caso de quatro sistemas em ordem crescente de número de barras, a começar pelo sistema tutorial de 14 barras até um sistema real de 476 barras. Ao fim desta dissertação são levantadas questões pertinentes e propostas de trabalhos futuros.

Palavras-chave: Alocação. Interconexões. Sistemas de Distribuição. Confiabilidade. Chaves seccionadoras. Sistema Imune Artificial.

ABSTRACT

In view of the great relevance of the reliability area of electrical distribution systems for concessionaires and consumers, this work proposes a methodology for planning tie-switches based on the use of Lagrange multipliers obtained from the problem Optimal Power Flow. Such variables, when determined for power balance and upper limit of the switching variables equations, allow quantifying, respectively, the potential transfer of power between feeders and the tendency of closing the tie-switch to maximize the system load. It is thus possible to determine the best tie-switches among a variety of candidates through the proposed constructive heuristic algorithm. As a result, a more effective allocation of disconnect switches is acquired in order to improve the reliability of the system, which will be proven in the case studies of four systems in increasing order of number of bars, starting with the tutorial 14 bar system up to an real 476 bar system. At the end of this work, pertinent questions are raised and proposals for future work.

Keywords: Allocation. Tie-switches. Distribution Systems. Reliability. Disconnect switches. Artificial Immune System.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Função de danos ao cliente	17
Figura 2.1 – Sistema tutorial	28
Figura 2.2 – Contingências no sistema tutorial	29
Figura 2.3 – Sistema tutorial remodelado	36
Figura 2.4 – Caminho-acima do nó 7	38
Figura 2.5 – Nós-abaxo do nó 9	40
Figura 2.6 – Chave NC à jusante da linha 6 de MM	42
Figura 2.7 – Chave NO à jusante da linha 1 de MM	43
Figura 2.8 – Nós não-jusantes do nó 9	44
Figura 2.9 – Fluxograma para cálculo de FIC e DIC dos pontos da rede . . .	46
Figura 2.10–Modelo equivalente π de linha de transmissão	49
Figura 3.1 – Fluxograma do AHCP	58
Figura 3.2 – Sistema 14 barras original	60
Figura 3.3 – Sistema 14 barras com interconexões finais	67
Figura 3.4 – Fluxograma do algoritmo de seleção clonal	70
Figura 4.1 – Sistema de 94 barras	77
Figura 4.2 – Sistema de 135 barras	79
Figura 4.3 – Sistema de 476 barras	83
Figura A.1 – Fluxograma do MPI	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dados das linhas do sistema tutorial	28
Tabela 2.2 – Pontos de carga do sistema tutorial	29
Tabela 3.1 – Dados das linhas do sistema de 14 barras	61
Tabela 3.2 – Função de Danos ao Cliente	62
Tabela 3.3 – Patamares de carga	62
Tabela 3.4 – Dados das interconexões candidatas para o sistema de 14 barras	63
Tabela 3.5 – Multiplicadores de Lagrange na primeira iteração	63
Tabela 3.6 – Índices de sensibilidade na primeira iteração	64
Tabela 3.7 – πu_{km} na primeira iteração	64
Tabela 3.8 – Conjunto A_1	65
Tabela 3.9 – Multiplicadores de Lagrange na segunda iteração	65
Tabela 3.10 – Índices de sensibilidade na segunda iteração	66
Tabela 3.11 – πu_{km} na segunda iteração	66
Tabela 3.12 – Conjunto A_2	66
Tabela 3.13 – Índices de sensibilidade na segunda iteração	67
Tabela 4.1 – Parâmetros do SIA	74
Tabela 4.2 – Interconexões do Estudo de Caso 1	75
Tabela 4.3 – Chaves seccionadoras do Estudo de Caso 1	76
Tabela 4.4 – Índices do Estudo de Caso 1	76
Tabela 4.5 – Interconexões do Estudo de Caso 2	78
Tabela 4.6 – Chaves seccionadoras do Estudo de Caso 2	78
Tabela 4.7 – Índices do Estudo de Caso 2	79
Tabela 4.8 – Interconexões do Estudo de Caso 3	80
Tabela 4.9 – Chaves seccionadoras do Estudo de Caso 3	81
Tabela 4.10 – Índices do Estudo de Caso 3	82
Tabela 4.11 – Interconexões do Estudo de Caso 4	84
Tabela 4.12 – Chaves seccionadoras do Estudo de Caso 4	84
Tabela 4.13 – Índices para Estudo de Caso 4	87
Tabela A.1 – Interconexões candidatas - Sistema 84 barras	99
Tabela A.2 – Interconexões candidatas - Sistema 135 barras	105
Tabela A.3 – Interconexões candidatas - Sistema 84 barras	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AENS	<i>Average Energy not Supplied</i>
AHCP	Algoritmo Heurístico Construtivo Proposto
AIS	<i>Artificial Immune Systems</i>
a	Ano
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASAI	<i>Average Service Availability Index</i>
ASUI	<i>Average Service Unavailability Index</i>
CAIDI	<i>Customer Average Interruption Duration Index</i>
cons	Consumidor
cons	Consumidor
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
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
ECOST	<i>Expected Interrupted Cost</i>
EENS	<i>Expected Energy Not Supplied</i>
ENS	<i>Energy Not Supplied</i>
FDC	Função de Danos ao Cliente
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
f	Falhas
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GD	Geração Distribuída
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
h	Horas
HLI	<i>Hierarchical Level I</i>
HLII	<i>Hierarchical Level II</i>
HLIII	<i>Hierarchical Level III</i>
IA	<i>Immune Algorithm</i>
km	Quilômetro
kW	Kilowatt
MACS	<i>Multiobjective Ant Colony System</i>
MA	<i>Memetic Algorithm</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MC	Monte Carlo
MPI	Método de Pontos Interiores
MWh	Megawatt-hora

NC	<i>Normally closed</i>
NO	<i>Normally open</i>
NSGA-II	<i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
NSPC	<i>Non-Supplied Power Cost</i>
PPEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia ELétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i>
SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency Index</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SPEA	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i>
SRD	Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

LISTA DE SÍMBOLOS

\mathbf{Ab}_n	Matriz dos “ n ” melhores anticorpos de \mathbf{Ab}
A_i	Trechos de O_i que não possuem barras de v_i
B	Conjunto de barras do sistema
β	Fator de carregamento
b_{km}^{sh}	Susceptância <i>shunt</i> da linha km
b_{km}	Susceptância série da linha km
BR_k	Conjunto de barras conectadas na barra k
$b(t)$	Função que simula a determinação das barras terminais do trecho t
\mathbf{C}^*	Matriz dos clones mutantes dos melhores anticorpos
\mathbf{C}	Matriz dos clones dos melhores anticorpos
c_1	Linha de \mathbf{MM} correspondente à chave NC à jusante de determinada contingência
\mathbf{Ca}	Matriz de caminhos-acima
CH_{km}	Valor de posição da chave manobrável no circuito km
C_i	Conjunto de trechos candidatos tratados como seções comuns no FPO i
c_{km}	Variável de otimização da posição da chave manobrável no circuito km
\mathbf{Du}	Matriz nós-abaxio
e	Constante de Euler
\mathbf{Ej}	Matriz de equipamentos à jusante
\mathbf{Em}	Matriz de equipamentos à montante
g_{km}	Condutância série da linha km
$g(t)$	Função que simula a determinação do grupo do trecho t com base nos alimentadores entre os quais t se encontra
ID_{km}	Índice de sensibilidade para potencial trecho de interconexão km
$ID(t)$	Função que determina o índice ID_{km} do trecho t
I_{km}	Módulo de \dot{I}_{km}
\dot{I}_{km}	Corrente complexa na linha km
$\mathbf{J}_{n \times m}$	Matriz unitária de dimensão $n \times m$
l_1	Linha de \mathbf{MM} correspondente à chave NC à montante de determinada contingência
Λ	Lagrangeana
λ_k	Taxa de falha do elemento k em [f/a]
λ_{LPj}	Taxa de falha geral percebida pelo ponto de carga j em [f/a]
λ_{LPj}^i	Taxa de falha percebida pelo ponto de carga j devido a contingência i em [f/a]
λp_k	Multiplicador de Lagrange associado à equação de balanço de potência ativa na barra k
\mathbf{LEj}	Matriz dos índices dos equipamentos à jusante

LEm	Matriz dos índices dos equipamentos à montante
L_{LPj}	Carga média do ponto de carga j
L_{LPj}^p	Carga do ponto de carga j no patamar p
lmm	Número de componentes do grafo remodelado
M	Conjunto das interconexões alocadas no algoritmo heurístico
M_i	Conjunto unitário que contém v_i
N_{Ab}	Número de anticorpos
\mathbb{N}	Conjunto dos números naturais
NCNC	Matriz de chaves NC à jusante de chaves NC
n_g	Quantidade de grupos existentes
n_i	Número de contingências analisadas
n_j	Número de pontos de carga do sistema
nk	Número de elementos do sistema de confiabilidade em série
N_{LPj}	Número de unidades consumidoras conectadas no ponto de carga j
n_{NC}	Quantidade de posições candidatas para alocação de chaves seccionadoras
NONC	Matriz de chaves NO à jusante de chaves NC
N_{total}	Número de unidades consumidoras do sistema
O_i	Trechos de C_i fora do grupo de v_i
PD_k	Potência ativa de carga da barra k
PG_k	Potência ativa gerada na barra k
PG_k^{max}	Limite superior para potência ativa gerada na barra k
PG_k^{min}	Limite inferior para potência ativa gerada na barra k
\dot{P}_{km}	Fluxo de potência ativa na linha km
QD_k	Potência reativa de carga na barra k
QG_k	Potência reativa gerada na barra k
QG_k^{max}	Limite superior para potência reativa gerada na barra k
QG_k^{min}	Limite inferior para potência reativa gerada na barra k
\dot{Q}_{km}	Fluxo de potência reativa na linha km
\mathbb{R}	Conjunto dos números reais
r_k	Tempo de reparo do equipamento k [h]
r_{km}	Resistência série da linha km
s_k	Tempo de seccionamento para isolar o equipamento k [h]
\dot{S}_{km}	Fluxo de potência complexa aparente na linha km
S_{km}^{max}	Limite superior para módulo da potência aparente na linha km
σ_p	Probabilidade do patamar de carga p
T	Conjunto de todos os trechos candidatos
θ_k	Ângulo do fasor \dot{V}_k
θ_{km}	Diferença angular entre tensões das barras k e m
t_k	Tempo de interrupção causado pela saída de operação do equipamento k [h]

TNJ	Matriz de nós não-jusantes
U_k	Indisponibilidade do elemento k em [h/a]
U_{LPj}	Indisponibilidade geral percebida pelo ponto de carga j em [h/a]
U_{LPj}^i	Indisponibilidade percebida pelo ponto de carga j devido a contingência i em [h/a]
v_i	Trecho que obteve maior ID no <i>loop</i> i
V_k	Módulo de \dot{V}_k
\dot{V}_k	Tensão fasorial na barra k
V_k^{max}	Limite superior para módulo da tensão na barra k
V_k^{min}	Limite inferior para módulo da tensão na barra k
\mathbf{X}_A	Variáveis de alocação de chaves seccionadoras
\mathbf{X}_B	Variáveis de alocação de trechos de interconexão para a metaheurística
x_{km}	Reatância série da linha km
\dot{y}_{km}	Admitância série da linha km
\dot{z}_{km}	Impedância série da linha km
Ω_j	Conjunto de trechos que podem ser isolados com aberturas de chaves NC e restaurados com fechamento de chave NO
$\Omega_{j'}$	Conjunto de trechos que podem ser isolados com aberturas de chaves NC
Ω_k	Conjunto de nós não-jusantes do nó k
Ω_p	Conjunto de nós-abaixo da proteção atuante
Ω_r	Conjunto de nós restaurados após chaveamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.3	MOTIVAÇÃO	23
1.4	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	24
1.5	PUBLICAÇÃO DECORRENTE	24
1.6	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	24
2	ÍNDICES DE CONFIABILIDADE EM SDEE E CÁLCULOS	25
2.1	INTRODUÇÃO	25
2.2	ÍNDICES DE CONFIABILIDADE	25
2.3	EXEMPLO DE CÁLCULO DOS ÍNDICES	27
2.4	MATRIZES AUXILIARES	32
2.4.1	Matriz de topologia e equipamentos (M)	33
2.4.2	Matriz do grafo remodelado (MM)	36
2.4.3	Matriz de caminhos-acima (Ca)	38
2.4.4	Matriz dos índices dos equipamentos à montante (LEm)	38
2.4.5	Matriz de equipamentos à montante (Em)	39
2.4.6	Matriz nós-abaxio (Du)	40
2.4.7	Matriz dos índices dos equipamentos à jusante (LEj)	40
2.4.8	Matriz de equipamentos à jusante (Ej)	41
2.4.9	Matriz de chaves NC à jusante de chaves NC (NCNC)	42
2.4.10	Matriz de chaves NO à jusante de chaves NC (NONC)	43
2.4.11	Matriz de nós não-jusantes (TNJ)	44
2.5	ALGORITMO DE CÁLCULO DE FIC E DIC	45
2.6	MODELO DE REDE	48
2.7	CONCLUSÕES PARCIAIS	50
3	METODOLOGIA PROPOSTA	51
3.1	INTRODUÇÃO	51
3.2	ETAPA 1: ALOCAÇÃO DE INTERCONEXÕES	51
3.2.1	Formulação para FPO Principal da Etapa 1	51
3.2.1.1	<i>Função Objetivo</i>	52
3.2.1.2	<i>Restrições</i>	52
3.2.1.3	<i>Modelo Completo</i>	53
3.2.1.4	<i>Índice de Sensibilidade</i>	54
3.2.2	Formulação para FPO para Desempate da Etapa 1	55

3.2.2.1	<i>Função Objetivo</i>	55
3.2.2.2	<i>Restrições</i>	55
3.2.2.3	<i>Modelo Completo</i>	56
3.2.3	Algoritmo Heurístico Construtivo Proposto	57
3.2.4	Aplicação Tutorial	60
3.3	ETAPA 2: ALOCAÇÃO DE CHAVES SECCIONADORAS	67
3.3.1	Sistema Imunológico Artificial	67
3.3.1.1	<i>Fundamentação Teórica</i>	68
3.3.1.2	<i>Algoritmo de Seleção Clonal</i>	69
3.3.2	Formulação para o Problema da Etapa 2	71
3.3.2.1	<i>Modelo Completo</i>	73
3.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	73
4	ESTUDOS DE CASO	74
4.1	INTRODUÇÃO	74
4.2	SISTEMA 14 BARRAS	74
4.2.1	Chaves	75
4.2.2	Índices	75
4.3	SISTEMA 94 BARRAS	76
4.3.1	Chaves	77
4.3.2	Índices	78
4.4	SISTEMA 135 BARRAS	79
4.4.1	Chaves	80
4.4.2	Índices	82
4.5	SISTEMA 476 BARRAS	83
4.5.1	Chaves	84
4.5.2	Índices	87
4.6	CONCLUSÕES PARCIAIS	88
5	CONCLUSÃO	89
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
5.2	TRABALHOS FUTUROS	90
	REFERÊNCIAS	92
	APÊNDICE A – MÉTODO DE PONTOS INTERIORES	97
	ANEXO A – INTERCONEXÕES CANDIDATAS	99
A.1	84 BARRAS	99
A.2	135 BARRAS	105
A.3	476 BARRAS	115

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde que o filósofo grego Tales de Mileto descobriu que um âmbar atrai pedaços de palha depois de atritado com pele de carneiro, a energia elétrica tem sido cada vez mais explorada. As aplicações tornaram-se abundantes e diversas. Tal fenômeno deve-se especialmente a uma característica da energia elétrica que a difere das demais formas de energia: sua versatilidade. Os processos de conversão de energia elétrica se mostram altamente eficientes, seguros, confiáveis e controláveis. Com o passar do tempo, veio a necessidade da geração de grandes quantidades desta energia e de transportar este montante por longas distâncias para ser finalmente utilizado pelos consumidores, que desejam conforto e qualidade de vida alcançados somente através da eletricidade. Assim surgiram os sistemas elétricos de potência (SEP).

A dependência do mundo em relação aos SEP tornou-se crescente e traz cada vez mais desafios que, ao serem superados, trazem novos desafios. Por exemplo, descobriu-se que, para minimizar os danos financeiros causados por interrupções do fornecimento de energia devido a defeitos na rede, um caminho alternativo para o fluxo de energia poderia auxiliar no restabelecimento do sistema. Resta, então, saber qual é o melhor local para se instalar as chaves que definem esse caminho. Este é precisamente o tema do presente trabalho, ou seja, determinação de chaves de interconexão. Destaca-se ainda o papel da área da matemática chamada “confiabilidade”, que estabelece conceitos e critérios úteis para se avaliar a qualidade de uma determinada alocação de chaves de interconexão, sendo, portanto, assunto bastante abordado no presente trabalho.

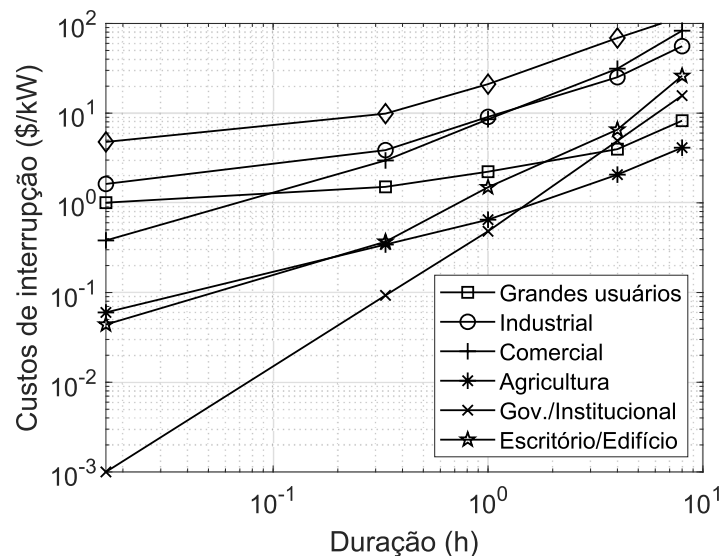
As chamadas distribuidoras de energia elétrica são os agentes que rebaixam o nível de tensão do sistema de transmissão e suprem os consumidores finais. Atualmente, o Brasil conta com 105 distribuidoras [1]. Para cumprirem sua função de maneira satisfatória, são tecnicamente reguladas pela Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição (SRD), que estabelece índices ou indicadores. Alguns deles qualificam o serviço das distribuidoras. Estes se relacionam com confiabilidade, definida como a probabilidade de um equipamento ou sistema cumprir suas funções sob certas condições operativas durante determinado período de tempo [2].

Outros indicadores qualificam o produto energia elétrica e se relacionam com tensão e frequência. A normatização desses índices está contida em documentos elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sendo conhecidos como procedimentos de distribuição (PRODIST) [3]. O Módulo 8 do PRODIST trata exclusivamente das questões de qualidade da energia elétrica. Muita atenção da parte das distribuidoras é dirigida aos indicadores. Quando os limites dos índices de continuidade por consumidor como DIC, FIC, DMIC e DICRI são violados, a distribuidora arca com multas e compensações podendo até

perder a concessão se violar índices de continuidade por conjunto de consumidores, como DEC e FEC. O painel de desempenho das distribuidoras de energia elétrica da ANEEL [4] contém as compensações pagas de cada distribuidora devido a violações de índices de serviço anualmente desde 2011.

A confiabilidade da rede de distribuição vista por cada ponto de carga é determinada basicamente segundo as seguintes características dos componentes da rede: taxa de falha média, tempo médio de reparo, tempo médio de manobra e topologia. As duas primeiras são valores obtidos através de dados históricos colhidos ao longo de um período de tempo. O arranjo, por sua vez, é determinado segundo a importância que os componentes possuem para o sistema cumprir sua função. O conjunto em série se refere a ocasião na qual os componentes em questão devem funcionar simultaneamente. As típicas redes de distribuição se caracterizam por essa espécie de arranjo. No caso de algum ou alguns dos componentes sofrerem defeito e ainda assim o sistema operar, trata-se de um arranjo em paralelo ou de redundância. Assim, é possível construir um diagrama de blocos para o sistema e determinar a confiabilidade. Apesar da teoria já consolidada, principalmente em [5, 6, 7], na prática, os cálculos são computacionalmente custosos para sistemas grandes.

Figura 1.1 – Função de danos ao cliente



Fonte: Elaboração própria.

Até mesmo os danos financeiros sofridos pelos clientes devido a interrupção de fornecimento podem ser considerados para se avaliar a confiabilidade. São, no entanto, difíceis de modelar, uma vez que muitas variáveis estão envolvidas. As referências encontradas na literatura estão apresentadas na próxima subsecção. Todas consideram uma espécie de função de danos ao cliente (FDC). A Figura 1.1 apresenta um exemplo, no qual a FDC depende do tipo da carga, demanda de pico e o tempo de interrupção [8]. Com tais considerações, cada consumidor é tratado como único e sofre de forma diferente.

Por exemplo, um edifício pode não consumir tanto quanto um grande usuário, mas para tempos de interrupção maiores que 4 horas o dano financeiro em $\$/kW$ é maior.

Além das multas sofridas pelas distribuidoras e dos danos financeiros aos clientes, outros custos envolvidos com confiabilidade são os investimentos. Se a alocação de bancos de capacitores pode levar indicadores de qualidade do produto aos valores adequados e até reduzir as perdas de energia, por exemplo, de forma análoga, reconfigurações, redundâncias e alocação de equipamentos de proteção e manobra estão bastante relacionados com os indicadores de serviço, pois interferem nos tempos de interrupção quando ocorrem defeitos. Quanto maior o investimento, menores serão os tempos de interrupção e maior é a confiabilidade. Entretanto, os custos são critério determinante em qualquer tomada de decisão. Muitas vezes o benefício desejado exige um valor financeiro alto que a distribuidora não pode ou não deseja arcar.

A confiabilidade tem recebido tanta atenção que até mesmo o modelo de mercado de energia tem sido repensado. Já ocorre a separação entre lastro e energia em diversos lugares no mundo. Lastro pode ser entendido como ativo físico apto a operar e entregar produtos/serviços para garantir operação confiável, quando necessário. A capacidade de geração pode ser incluída nesta definição. Trata-se de um produto de confiabilidade, que auxilia o suprimento do sistema e tem se tornado cada vez mais importante devido à crescente propagação da geração intermitente das fontes renováveis.

Percebe-se que a confiabilidade dos sistemas de distribuição interessa a todos, tanto distribuidoras quanto clientes, pois está vinculada a custos, seja na forma de multas, investimentos ou danos financeiros causados por interrupções no fornecimento de energia elétrica. O próprio ônus da distribuidora é repassado aos clientes indiretamente através das tarifas. Para a melhoria dos indicadores de confiabilidade, a alocação de equipamentos de proteção e manobra é um investimento fundamental. Dentre esses dispositivos, encontram-se as chaves de interconexões. Em sistemas cujos consumidores apenas podem ser atendidos exclusivamente por um caminho de fluxo de potência (sistemas radiais), tais chaves são um recurso muito importante pois permitem outro possível caminho para o fluxo. A questão da alocação, no entanto, é um problema complexo, haja vista sua natureza combinatória. Assim, todo o ferramental teórico-computacional de potencial utilidade deve ser estudado e aprimorado. O presente trabalho surgiu justamente com o objetivo de trazer contribuições a esta área.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os danos aos clientes são tratados em [8] como mostra a Figura 1.1, isto é, por uma função que relaciona o custo de interrupção com o tipo de consumidor e tempo. Com uso de teoria de grafos, as indisponibilidades percebidas por cada consumidor devido a contingências em cada linha da rede são determinadas e todos os índices de confiabilidade

podem ser calculados. Uma vez determinado o índice de custo esperado de energia não-suprida (ECOST), este é somado aos custos de investimento e manutenção, compondo, assim, a função objetivo a ser minimizada para se determinar a alocação ótima de chaves. O problema nesta formulação, como tantas outras vistas a seguir, é combinatório, não-linear e não-diferenciável, justificando o uso do método de otimização *Simulated Annealing* (SA) na referência citada. A rotina para cálculos de confiabilidade bem como o algoritmo SA são detalhadamente explicados, tornando esta referência valiosa na área.

Ainda que o presente trabalho trate de chaves seccionadoras e de interconexões, referências sobre alocação de outros dispositivos podem fornecer algum tipo de subsídio. Em [9], é feita a alocação de bancos de capacitores fixos ou chaveados para reduzir perdas na rede radial e, assim, evitar custos de expansão da rede. Para tal, é proposta a formulação de um problema de programação linear inteira-mista que busca maximizar a economia causada por redução nas perdas. A premissa na formulação de que a rede é balanceada é bastante simplificadora e afasta a aplicação da realidade. Redes de distribuição se caracterizam por serem desbalanceadas, o que torna um fluxo de carga trifásico mais apropriado apesar da complexidade superior. De qualquer forma, os sistemas utilizados são material para simulação nos estudos de alocação de interconexões.

Em [10], propõe-se um algoritmo memético que combina o *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) com busca local para resolver o problema multiobjetivo de alocação de chaves e disjuntores. Em sua formulação, a minimização dos índices de frequência e de duração equivalente de interrupção por consumidor (SAIFI e SAIDI, respectivamente) além dos custos de investimento são as três funções objetivo. O algoritmo de otimização proposto é promissor. Entretanto, o artigo não fornece o procedimento para determinação das taxas de falha da rede e tempo de reparo percebidos por cada consumidor. Assim, percebe-se um foco maior do texto na explicação do método de otimização do que nos cálculos de confiabilidade. O objetivo do problema é encontrar um conjunto de soluções na forma de fronteira de Pareto, fornecendo ao tomador de decisão a possibilidade de escolher uma das soluções.

Maior atenção aos tempos de interrupção é percebida em [11], cujo objetivo é determinar a alocação de chaves remotamente controladas em redes de distribuição através de algoritmo de decisão baseado em lógica *fuzzy*. Com a localização dos equipamentos na rede original, incluindo chaves de interconexão, constrói-se uma matriz que contém para cada nó, o tempo gasto para restaurar a falta percebido pelo ponto. Os três índices de confiabilidade podem então ser calculados: SAIDI, SAIFI e energia esperada não-suprida (EENS). A formulação do problema toma-os como funções a serem minimizadas. Exaustivamente, todas as barras começando pelas mais distantes das chaves de interconexão são analisadas, e as possibilidades que não violam as restrições da rede são rankeadas. O método Bellman-Zadeh [12] é utilizado para substituir as funções objetivo por conjuntos *fuzzy*, e toma como melhor solução aquela que gera a máxima intersecção.

Mais uma metaheurística multiobjetiva, desta vez baseada em sistema de colônia de formigas (MACS), é utilizada em [13] para a alocação de chaves e dispositivos de proteção. Esta referência introduziu o uso de grafos e foi bastante relevante para diversos trabalhos, dentre eles [14, 15, 16, 17, 18]. Os índices SAIDI e SAIFI são novamente funções a serem minimizadas, bem como o custo total, que se refere ao valor de aquisição dos equipamentos somado ao dano financeiro devido às interrupções. Os consumidores, classificados em residenciais, comerciais e industriais, possuem suas respectivas funções de danos ao cliente utilizadas no cálculo dos custos de interrupções. O último passo da metodologia é escolher a solução final dentre o conjunto de soluções com a abordagem min-max de [19]. Para cada solução candidata, extrai-se o menor dos três valores *fitness* normalizados e a solução final é aquela que possui o maior valor.

Alocação exclusiva de chaves, sejam seccionadoras ou de interconexão, manuais e automáticas, é realizada em [20]. Dispositivos de proteção são considerados mas não alocados. A rede de distribuição é modelada como grafo, permitindo o cálculo dos índices SAIDI, SAIFI e EENS. Os dois primeiros serão utilizados em restrições de canalização no problema de otimização e, o último, depois de multiplicado por um valor fixo de custo da energia, a primeira parcela da função objetivo. Custos de aquisição, instalação e manutenção das chaves são a segunda parcela. O *Memetic Algorithm* (MA) foi utilizado na otimização de um sistema real e se mostrou bastante eficaz, chegando a reduzir em até 60% o valor da função objetivo comparado à rede original. A mesma metodologia, porém com *Genetic Algorithm* (GA), é aplicada em [21].

Os autores de [22] propõem a minimização de perdas de energia através da reconfiguração da rede. Com esta abordagem, não há custos de investimento envolvidos. Trata-se de um problema de programação não-linear inteira-mista, cujas variáveis inteiras são binárias e correspondem ao fechamento ou abertura de chaves, enquanto o despacho dos geradores são variáveis contínuas. Curvas de carga e restrições da rede, incluindo a radialidade, são consideradas. Para a resolução do problema é aplicado o complexo algoritmo *Artificial Immune Systems* (AIS) de [23] e [24] com heurística especificamente desenvolvida para reconfiguração. Sabe-se que a alteração da topologia do sistema altera os índices de confiabilidade, embora isto não seja discutido no artigo de forma explícita. A reconfiguração com outras metaheurísticas tem sido estudada, como em [25, 26], por exemplo.

Em [27], tanto a alocação quanto a realocação de chaves, fusíveis e religadores são feitas através de minimização de custos referentes a aquisição e instalação dos equipamentos, potência não suprida (NSPC) e restauração da rede após o isolamento das faltas. As restrições modeladas se referem às características técnicas e econômicas do problema. Além disso, é considerada certa diversidade quanto aos tipos de consumidor, sendo eles residenciais, industriais ou comerciais. O método de resolução é um algoritmo genético modificado que explora as características físicas da rede. A metodologia foi aplicada em

um sistema pequeno de 20 barras, cujos dados são todos fornecidos, o que torna essa referência valiosa para pesquisas na área de confiabilidade da distribuição.

A referência [28] é inovadora por tratar da alocação ótima de chaves em redes de distribuição com geração distribuída (GD). Na sua formulação, não há restrições de rede mas apenas de índices de confiabilidade. A função objetivo é dependente dos gastos de investimento, operação e manutenção além dos custos de interrupção, que computam a energia esperada não suprida (EENS) em valores financeiros através de fatores de conversão e consideram as GD com suas probabilidades de ilhamento. A metaheurística proposta para a otimização é o GA. O artigo confirma que a geração distribuída pode melhorar a confiabilidade do sistema por causa da possibilidade de operação ilhada. Mas para tal, precisa ocorrer a reconfiguração das chaves, considerando a probabilidade de ilhamento.

Semelhantemente à referência supracitada, o objetivo de [29] consiste na alocação de dispositivos de proteção e chaves seccionadoras em redes com GD. Este artigo, entretanto, formula o problema como de programação não-linear inteira-mista. Os custos de danos ao cliente não são representados por funções segundo os tipos de consumidor, mas por distribuições de probabilidade obtidas através de redes neurais, como proposto em [30] e [31]. As GD são consideradas da mesma forma que [28], isto é, com a determinação de suas probabilidades de ilhamento. A metodologia se mostra promissora ao ser comparada com diversas outras encontradas na literatura.

Em [32] ocorre a alocação de chaves remotamente controladas, tanto seccionadoras quanto de interconexão. Os custos de investimento e de interrupções são minimizados através do *Immune Algorithm* (IA). Quanto aos danos financeiros sofridos pelos clientes, são determinados por meio da seguinte abordagem: os pontos de carga possuem consumidores classificados em residenciais, comerciais, industriais e principais. Estes são ordenados em uma hierarquia de três níveis segundo a necessidade do fornecimento. Cada categoria é representada na função de danos ao cliente. Na formulação, as capacidades das chaves de transferência são respeitadas bem como a queda de tensão máxima permitida nas linhas. Como esperado, a alocação dos dispositivos automáticos melhoram em muito a confiabilidade do sistema, visto seu tempo de manobra bastante inferior comparado àqueles operados manualmente.

A localização ótima de chaves seccionadoras automáticas é determinada em [33] com outra metodologia. O problema de otimização multiobjetivo busca minimizar a quantidade de chaves alocadas e a energia não suprida, além de maximizar a confiabilidade. Para se mensurar a confiabilidade, que corresponde à terceira função objetivo, ocorrem simulações de Monte Carlo (MC). Quando todos os pontos de carga podem ser isolados na simulação, tem-se então um caso de sucesso e calcula-se a razão entre o número de sucessos e a quantidade total de simulações, correspondendo, assim, à probabilidade de sucesso do sistema, ou seja, à confiabilidade. A técnica MC permite a representação das

curvas de carga com distribuições de probabilidade. O método de otimização do problema multiobjetivo é o *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA).

Formulação diferente para o problema de alocação de dispositivos de proteção e manobra pode ser encontrada em [34]. Mais uma vez, busca-se minimizar custos de instalação, manutenção e de interrupções. Porém, a função objetivo é transformada em linear substituindo o produto de variáveis por outra variável e, para cada troca, inserindo duas novas restrições. Tal formulação linear inteira-mista permite a aplicação do método *branch and bound*. O custo das interrupções foi computado da mesma forma que [8]. Adicionalmente, empregou-se o algoritmo genético para a otimização. Quando comparadas as performances de ambos os métodos, a programação linear inteira-mista se mostrou menos custosa computacionalmente, com aproximadamente nove vezes menos de avaliações da função objetivo. Entretanto, a metodologia não otimiza trechos de interconexões.

Como percebido, há diversas formas de se contabilizar os danos devido a interrupções sofridos pelo consumidor. Os autores de [35] fornecem uma metodologia mais acurada, tanto para análises de confiabilidade da geração, classificadas como *Hierarchical Level I* (HLI), quanto confiabilidade composta, isto é, geração e transmissão em conjunto, classificadas como *Hierarchical Level II* (HLII). O sistema IEEE-RTS é utilizado. A função de danos aos clientes relacionada com esse sistema já é conhecida, trata-se de uma relação entre os tipos de consumidores e tempos de interrupção, como mostra a Figura 1.1. Para análises HLI, é proposta a soma ponderada das funções dos setores pela razão entre demanda correspondente e a demanda total, resultando em uma função única para o sistema. No caso de HLII, o artigo propõe a manipulação das funções a fim de construir várias, uma para cada barra do sistema segundo sua composição de tipos de consumidores.

Sabe-se que a ausência de dados históricos reais dos componentes da rede, tais como faltas, tempos de reparo e de manobra, são um grande desafio principalmente na distribuição. Assim, os autores de [36, 37] desenvolveram diversos sistemas com propósitos acadêmicos, com todos os dados necessários para se estudar a confiabilidade da distribuição. Além dos dados, todos os indicadores de confiabilidade, seja do sistema total ou por consumidor, são fornecidos. Portanto, estas referências são bastante valiosas e utilizadas por inúmeros trabalhos na aplicação de suas metodologias, inclusive no que diz respeito à alocação de equipamentos.

Quanto a alocação específica de interconexões, o recente artigo [38] propõe uma metodologia com este objetivo, a fim de alcançar uma redução nas perdas de sistemas com alta presença de GD. As restrições estão ligadas às equações de rede. O método de otimização escolhido foi a metaheurística *Particle Swarm Optimization* (PSO), inspirado no comportamento social de enxames no mundo animal. A metodologia utiliza o PSO em MATLAB em conjunto com o programa DIGSILENT, sendo o primeiro destinado à otimização e o outro ao fluxo de potência. Os resultados alcançados mostram uma redução

de até 40% nas perdas de energia em comparação com o sistema original. Além desta vantagem, melhora-se o perfil de tensão. Por mudar a topologia do sistema, infere-se a alteração dos indicadores de confiabilidade, embora não seja discussão do artigo.

Em [39], chaves de interconexão e unidades de GD são alocados separada e simultaneamente. Para aplicar a restrição de topologia radial às soluções candidatas, a teoria de grafos é utilizada para limitar as soluções candidatas. Busca-se não minimizar as perdas mas maximizar o carregamento. Para tal, o *Discrete Artificial Bee Colony* (DABC) com certa modificação heurística no processo de mutação é empregado. Apesar disso, a redução de perdas foi alcançada, bem como melhora no perfil de tensão. Em conjunto, as interconexões e GD fornecem resultados melhores do que quando separadas. Quanto maior o sistema, maior é a diferença percentual em relação ao caso base chegando à 80% de redução de perdas e 140% de aumento de carregamento para o sistema teste de 69 barras.

A reconfiguração e a restauração dos sistemas de distribuição são tratados em [40] como duas partes do problema de alocação ótima de chaves de interconexão que buscam alcançar redução de perdas e melhoria da confiabilidade quando a rede opera normalmente e quando há defeitos, respectivamente. O primeiro subproblema, isto é, de reconfiguração, encontra a topologia do sistema que isola a zona com falta e minimiza o número de usuários e zonas desenergizados, transferindo a carga entre o diferentes alimentadores, mantendo as restrições operacionais da rede dentro de seus limites, e desconectando carga específica nos nós, não prioritária, se for necessário. O segundo subproblema, de restauração, utiliza uma metodologia de otimização multiobjetivo chamada ϵ -*constraint* para visualizar todas as configurações não dominadas que minimizam as perdas de potência ativa, o índice SAIFI, e o SAIDI, simultaneamente.

1.3 MOTIVAÇÃO

Vista a relevância do critério de confiabilidade para todos os agentes do setor elétrico, uma maneira bastante eficiente de incrementar os indicadores de serviço é justamente a alocação de equipamentos de proteção e manobra, o que inclui chaves de interconexão com seus trechos além das seccionadoras. Este problema é complexo devido a sua natureza inteira combinatória e, de fato, justifica atualmente o emprego de ferramentas metaheurísticas. O ponto ótimo global não pode ser garantido por qualquer um destes métodos de otimização modernos tampouco alcançado com extrema precisão, diferentemente dos determinísticos. A dificuldade de determinação de parâmetros e esforço computacional são questões igualmente determinantes. Reduzir o número de variáveis implica em maior eficiência do processo de otimização e menor esforço computacional envolvido. Portanto, as motivações do presente trabalho são: a importância da confiabilidade da distribuição para sociedade como um todo e o grande interesse por métodos de alocação de trechos de interconexão alternativos às metaheurísticas puras.

1.4 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo geral desta dissertação é fornecer uma metodologia de planejamento de interconexões e seccionadoras em sistemas de distribuição capaz de aumentar a confiabilidade. A metodologia é dividida em duas partes. A primeira parte consiste em alocar trechos de interconexão. Para tal, utiliza-se fundamentos de fluxo de potência ótimo para se maximizar o carregamento da rede. Como resultado, são obtidas as variações marginais relacionadas a injeção de potência ativa nas barras. Tais valores revelam o potencial de fluxo de carga que ocorreria no trecho de interconexão entre cada par de barras candidatas. A teoria por trás desta parte da metodologia é que a alocação que permitir o máximo fluxo de potência entre os alimentadores pode minimizar índices de confiabilidade, pois as interconexões são utilizadas para restaurar o sistema em caso de defeitos. A segunda parte da metodologia, por sua vez, consiste em admitir as interconexões encontradas como alocadas e encontrar as posições das chaves seccionadoras através do uso de uma metaheurística binária. Assim, mais especificamente, o presente trabalho objetiva comparar a metodologia híbrida com a aplicação pura da metaheurística nos casos a serem estudados.

1.5 PUBLICAÇÃO DECORRENTE

- DIAS, B. H.; PEREIRA, C. M.; OLIVEIRA, L. W. D. Optimum allocation of switches and circuit breakers in main feeders of distribution networks. *13th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE 2019)*, Santiago, Chile, n. 13, out. 2019.

1.6 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

Com este capítulo introdutório, a dissertação foi inserida no seu contexto. Outros quatro capítulos a integram.

O Capítulo 2 apresenta os índices de confiabilidade com suas descrições além da técnica computacional utilizada nos cálculos.

No Capítulo 3, outros fundamentos se unem àqueles mostrados no capítulo anterior e resultam na metodologia proposta.

O Capítulo 4 é dedicado à aplicação da metodologia em alguns sistemas. Resultados são apresentados.

O Capítulo 5 traz as conclusões percebidas ao longo deste trabalho bem como propostas de trabalhos futuros.

2 ÍNDICES DE CONFIABILIDADE EM SDEE E CÁLCULOS

2.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta os indicadores conhecidos para se mensurar a confiabilidade de um sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE). Os cálculos analíticos são realizados para um pequeno sistema tutorial com fins didáticos. Em seguida, nas duas seções posteriores, apresenta-se a metodologia para implementação computacional, que consiste no uso de matrizes auxiliares construídas com teoria de grafos e sua utilização no algoritmo de cálculo dos índices *FIC* e *DIC*. Além disso, a modelagem da rede para o fluxo de potência ótimo (FPO) é abordada. Quanto ao método de pontos interiores, utilizado para resolução de FPO, é apresentado resumidamente em Apêndice A. A última seção deste capítulo dedica-se às conclusões parciais.

2.2 ÍNDICES DE CONFIABILIDADE

Todos os índices de confiabilidade podem ser calculados através das taxas de falha, tempos de reparo e de seccionamento. Se a rede pode ser modelada por blocos em série, para uma contingência no elemento k e para um determinado ponto de carga LPj (*Load Point*) no qual consumidores estão conectados, então a taxa média de interrupção, ou taxa de falha, é definida pela Equação 2.1. O número de horas pelo qual o ponto de carga está desenergizado devido ao defeito em k é denominado indisponibilidade e calculado pela Equação 2.2.

$$\lambda_{LPj}^i = \sum_{k=1}^{nk} \lambda_k \quad [\text{f/a}] \quad (2.1)$$

$$U_{LPj}^i = \sum_{k=1}^{nk} U_k = \sum_{k=1}^{nk} \lambda_k t_k \quad [\text{h/a}] \quad (2.2)$$

onde λ_k é taxa média de falha do elemento k em [f/a]; t_k é tempo pelo qual a saída de operação do equipamento k causa interrupção em [h], podendo ser tempo de reparo r_k ou de seccionamento s_k ; U_k é indisponibilidade do equipamento k em [h/a]; nk é numero de elementos do sistema de confiabilidade em série.

A taxa de falha e indisponibilidade resultantes percebidas por cada ponto de carga são dadas pelo somatório das taxas e indisponibilidades para cada contingência, como fornecem as equações 2.3 e 2.4. Destaca-se que apenas as contingências simples são consideradas, pois a premissa adotada é de que a probabilidade de múltiplos defeitos ocorrerem simultaneamente é muito baixa.

$$\lambda_{LPj} = \sum_{i=1}^{ni} \lambda_{LPj}^i \quad [\text{f/a}] \quad (2.3)$$

$$U_{LPj} = \sum_{i=1}^{ni} U_{LPj}^i \quad [\text{h/a}] \quad (2.4)$$

onde n_i é o número de contingências analisadas.

Alguns índices encontrados em [3, 7, 42, 43, 44] são:

1. FIC: Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora

Refere-se à taxa de falha λ quando esta representa um conjunto maior de equipamentos em um ponto ou unidades consumidoras.

2. DIC: Duração de Interrupção por Unidade Consumidora

Corresponde à indisponibilidade U quando esta representa um conjunto maior de equipamentos em um ponto ou unidades consumidoras.

3. FEC: Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

Também conhecido, em inglês, como *System Average Interruption Frequency Index* (SAIFI). Representa a quantidade média de interrupções ocorridas por unidade consumidora, sendo formulado pela Equação 2.5.

$$FEC = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} \lambda_{LPj} \cdot N_{LPj}}{N_{total}} \quad [\text{falhas/consumidor-ano}] \quad (2.5)$$

onde n_j é número de pontos de carga; N_{LPj} é número de consumidores do ponto de carga j ; e N_{total} é número total de consumidores.

4. DEC: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

Também conhecido, em inglês, como *System Average Interruption Duration Index* (SAIDI). Representa o número de horas médio por unidade consumidora em que, devido a falhas, não há suprimento.

$$DEC = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} U_{LPj} \cdot N_{LPj}}{N_{total}} \quad [\text{h/cons-a}] \quad (2.6)$$

5. CAIDI: *Customer Average Interruption Duration Index* Ou Índice de Duração de Interrupção Média do Cliente. Representa a duração média da interrupção para o consumidor.

$$CAIDI = \frac{DEC}{FEC} \quad [\text{h/f}] \quad (2.7)$$

6. ASUI: *Average Service Unavailability Index*

Ou Índice de Indisponibilidade do Serviço. Representa a quantidade de anos por unidade consumidora em que, devido a falhas, não há suprimento. Em outras palavras, representa a probabilidade de uma unidade consumidora não estar suprida no ano.

$$ASUI = \frac{DEC}{8760} \quad (2.8)$$

7. ASAI: *Average Service Availability Index*

Ou Índice de Disponibilidade de Serviço. É o oposto do ASUI. Representa a probabilidade de uma unidade consumidora obter seu fornecimento ao longo do ano.

$$ASAI = 1 - ASUI \quad (2.9)$$

8. ENS: *Energy not Supplied*

Ou Energia não Suprida. Representa a quantidade de energia não suprida no ano devido a faltas:

$$ENS = \sum_{j=1}^{n_j} U_{LPj} L_{LPj} \quad [\text{MWh/a}] \quad (2.10)$$

onde L_{LPj} é carga média do ponto de carga j .

9. AENS: *Average Energy not Supplied*

Representa a energia média não suprida por consumidor devido a faltas.

$$AENS = \frac{ENS}{N_{total}} \quad [\text{MWh/cons-a}] \quad (2.11)$$

10. ECOST: *Expected Interrupted Cost*

Representa os danos financeiros causados pelas interrupções [8]. Depende da função de danos ao cliente como a fórmula abaixo mostra.

$$ECOST = \sum_{p=1}^{n_p} \sum_{j=1}^{n_j} L_{LPj}^p \sigma_p \lambda_{LPj} FDC(U_{LPj}) \quad [$/a] \quad (2.12)$$

onde L_{LPj}^p é a potência consumida por LP_j no patamar de carga p ; σ_p é a probabilidade do patamar de carga p ; e FDC é a função de danos ao cliente.

2.3 EXEMPLO DE CÁLCULO DOS ÍNDICES

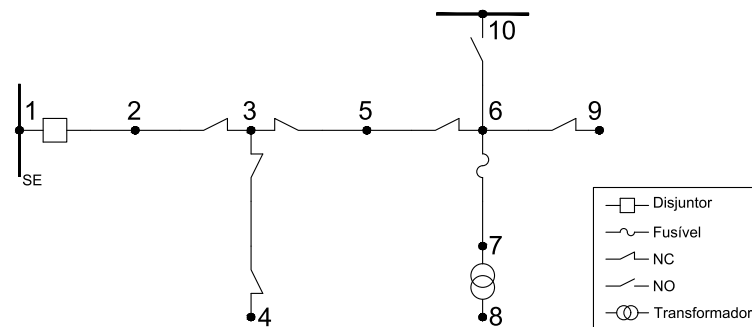
Para ilustrar o cálculo dos índices de confiabilidade, é proposto o sistema tutorial da Figura 2.1, que possui características importantes a serem consideradas na modelagem proposta, tais como: radialidade, trechos com chaves em ambas extremidades, chave de interconexão no meio do alimentador, transformador, fusíveis e disjuntores. As chaves NC são seccionadoras que operam normalmente fechadas, enquanto a chave NO é de interconexão e opera normalmente aberta. Vale destacar que o fusível não costuma ser encontrado nos alimentadores principais devido a sua baixa capacidade de corrente, mas foi colocado no sistema tutorial para fins didáticos.

O cálculo do *ECOST* é omitido, mas o processo pode ser consultado em [45].

Dados do sistema e premissas são:

- Contingências simultâneas de dois ou mais componentes desprezadas;
- Dispositivos de proteção e manobra 100% confiáveis;
- Chaves com 1 hora de tempo de manobra, exceto a chave de interconexão com 1,5 hora;
- Transformador com 0,015 falha por ano e 200 horas de tempo de reparo;
- Para as linhas, os comprimentos estão dados na Tabela 2.1. A taxa anual de falha por quilômetro é 0,065 e o tempo de reparo é de 4 horas;
- Pontos de carga $LP1$, $LP2$ e $LP3$ nos nós 4, 8 e 9, respectivamente, segundo Tabela 2.2;
- Todos os pontos de carga do mesmo tipo (tipo “1”, por exemplo). Esta informação é necessária para o cálculo do $ECOST$, embora não esteja ilustrado a seguir.

Figura 2.1 – Sistema tutorial



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2.1 – Dados das linhas do sistema tutorial

Linha	Barra De	Barra Para	Comprimento (km)
1	1	2	2
2	2	3	2
3	3	4	4
4	3	5	1
5	5	6	1
6	6	7	3
7	6	9	4
8	6	10	2

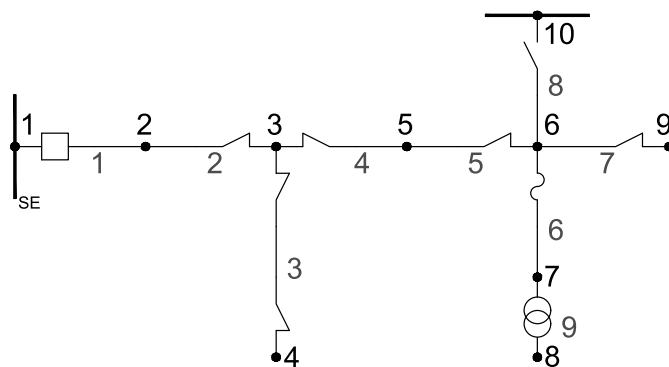
Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2.2 – Pontos de carga do sistema tutorial

Nó	Número de consumidores	Carga média (kW)	Carga máxima (kW)
4	1000	5000	10000
8	800	4000	8000
9	700	3500	7000

Fonte: Elaboração própria.

Figura 2.2 – Contingências no sistema tutorial



Fonte: Elaboração própria.

O objetivo inicial dos cálculos é determinar a taxa de falha e indisponibilidade percebida por cada ponto de carga. Estas são as variáveis que determinam os índices DEC e FEC, dos quais dependem os cálculos dos demais índices, como mostram as equações 2.5 a 2.11. O primeiro passo é aplicar contingências em cada componente (representadas em vermelho na Figura 2.2) e verificar como cada ponto de carga é afetado.

Contingência 1

Um defeito na linha 1 afeta todos os pontos de carga. O disjuntor atua, a rede é desenergizada e o defeito é isolado com a abertura da chave no fim da linha 2. Em seguida, fecha-se a chave de interconexão, restaurando o fornecimento dos pontos à jusante da barra 3. Assim, estes pontos têm seu fornecimento interrompido somente durante o tempo de manobra. Os índices FIC e DIC para este defeito são calculados a seguir.

$$FIC_{LPj}^1 = 2 \text{ [km]} \times 0,065 \text{ [f/km]} = 0,13 \text{ [f/a]}, j = 1 \text{ a } 3$$

$$DIC_{LPj}^1 = 0,13 \text{ [f/a]} \times (1 + 1,5) \text{ [h/f]} = 0,325 \text{ [h/a]}, j = 1 \text{ a } 3$$

Contingência 2

Da mesma forma, defeito na linha 2 afeta todos os pontos de carga. O disjuntor atua, a rede é desenergizada e o defeito é isolado com a abertura da chave no fim da linha 2. Em seguida fecha-se a chave de interconexão, restaurando o fornecimento dos pontos à

jusante da barra 3. Assim, terão seu fornecimento interrompido somente durante o tempo de manobra.

$$FIC_{LPj}^2 = 2 \text{ [km]} \times 0,065 \text{ [f/km]} = 0,13 \text{ [f/a]}, j = 1 \text{ a } 3$$

$$DIC_{LPj}^2 = 0,13 \text{ [f/a]} \times (1 + 1,5) \text{ [h/f]} = 0,325 \text{ [h/a]}, j = 1 \text{ a } 3$$

Contingência 3

Com defeito na linha 3, o disjuntor atua e a rede é desenergizada. O defeito é isolado com a abertura das chaves nas extremidades da linha. LP2 e LP3 são restaurados com o fechamento do disjuntor. LP1 permanece sem energia até que a linha seja reparada.

$$FIC_{LPj}^3 = 4 \text{ [km]} \times 0,065 \text{ [f/km]} = 0,26 \text{ [f/a]}, j = 1 \text{ a } 3$$

$$DIC_{LP1}^3 = 0,26 \text{ [f/a]} \times 4 \text{ [h/f]} = 1,04 \text{ [h/a]}$$

$$DIC_{LP2}^3 = 0,26 \text{ [f/a]} \times 1 \text{ [h/f]} = 0,26 \text{ [h/a]}$$

$$DIC_{LP3}^3 = 0,26 \text{ [f/a]} \times 1 \text{ [h/f]} = 0,26 \text{ [h/a]}$$

Contingência 4

Um defeito na linha 4 faz com que o disjuntor atue desenergizando todos os nós. Em seguida, toda a rede é desligada. As chaves da linha são abertas para isolar o defeito. Em seguida fecha-se a chave de interconexão e o disjuntor, restaurando todos os pontos de carga.

$$FIC_{LPj}^4 = 1 \text{ [km]} \times 0,065 \text{ [falha/km]} = 0,065 \text{ [f/a]}, j = 1 \text{ a } 3$$

$$DIC_{LP1}^4 = 0,065 \text{ [f/a]} \times 1 \text{ [h/f]} = 0,065 \text{ [h/a]}$$

$$DIC_{LP2}^4 = 0,065 \text{ [f/a]} \times (1 + 1,5) \text{ [h/f]} = 0,1625 \text{ [h/a]}$$

$$DIC_{LP3}^4 = 0,065 \text{ [f/a]} \times (1 + 1,5) \text{ [h/f]} = 0,1625 \text{ [h/a]}$$

Contingência 5

Um defeito na linha 5 faz com que todos os pontos de carga sejam desenergizados somente durante tempos de manobra, pois o defeito é isolado, permitindo a alimentação de LP1 pelo fluxo oriundo da subestação além da alimentação dos outros pontos pela interconexão, resultando em:

$$FIC_{LPj}^5 = 1 \text{ [km]} \times 0,065 \text{ [f/km]} = 0,065 \text{ [f/a]}, j = 1 \text{ a } 3$$

$$DIC_{LP1}^5 = 0,065 \text{ [f/a]} \times 1 \text{ [h/f]} = 0,065 \text{ [h/a]}$$

$$DIC_{LP2}^5 = 0,065 \text{ [f/a]} \times (1 + 1,5) \text{ [h/f]} = 0,1625 \text{ [h/a]}$$

$$DIC_{LP3}^5 = 0,065 \text{ [f/a]} \times (1 + 1,5) \text{ [h/f]} = 0,1625 \text{ [h/a]}$$

Contingência 6

Um defeito na linha 6 não afeta todos os pontos de carga. O fusível atua para desenergizar LP2, isolando o defeito, enquanto LP1 e LP3 continuam supridos. Assim:

$$FIC_{LP2}^6 = 3 \text{ [km]} \times 0,065 \text{ [f/km]} = 0,195 \text{ [f/a]}$$

$$FIC_{LPj}^6 = 0 \text{ [f/a]}, j = 1 \text{ e } 3$$

$$DIC_{LP1}^6 = DIC_{LP3}^6 = 0 \text{ [h/a]}$$

$$DIC_{LP2}^6 = 0,195 \text{ [h/a]} \times 4 \text{ [h/f]} = 0,78 \text{ [h/a]}$$

Contingência 7

Com defeito na linha 7, LP1 é restaurado após a desenergização, seguida da abertura das chaves das linha 5 e 7 e, por fim, reenergização da rede. Os pontos LP2 e LP3 são restaurados após o reparo, enquanto LP1 é restaurado após a sequência de manobras, resultando em:

$$FIC_{LPj}^7 = 4 \text{ [km]} \times 0,065 \text{ [f/km]} = 0,26 \text{ [f/a]}, j = 1 \text{ a } 3$$

$$DIC_{LP1}^7 = 0,26 \text{ [f/a]} \times 1 \text{ [h/f]} = 0,26 \text{ [h/a]}$$

$$DIC_{LP2}^7 = 0,26 \text{ [f/a]} \times 4 \text{ [h/f]} = 1,04 \text{ [h/a]}$$

$$DIC_{LP3}^7 = 0,26 \text{ [f/a]} \times 4 \text{ [h/f]} = 1,04 \text{ [h/a]}$$

Contingência 8

Para a contingência na linha 8, após a desenergização da rede, as chaves das linhas 5 e 7 precisam ser abertas para o isolamento do defeito. O restabelecimento de LP2 e LP3 só acontece depois do reparo, enquanto de LP1 ocorre logo após o seccionamento das chaves citadas e da reenergização da rede, resultando em:

$$FIC_{LPj}^8 = 2 \text{ [km]} \times 0,065 \text{ [f/km]} = 0,13 \text{ [f/a]}, j = 1 \text{ a } 3$$

$$DIC_{LP1}^8 = 0,13 \text{ [f/a]} \times 1 \text{ [h/f]} = 0,13 \text{ [h/a]}$$

$$DIC_{LP2}^8 = 0,13 \text{ [f/a]} \times 4 \text{ [h/f]} = 0,52 \text{ [h/a]}$$

$$DIC_{LP3}^8 = 0,13 \text{ [f/a]} \times 4 \text{ [h/f]} = 0,52 \text{ [h/a]}$$

Contingência 9

Para a contingência de número 9, isto é, no transformador, apenas LP2 é afetado, uma vez que o fusível atuará isolando o defeito. Assim,

$$FIC_{LP1}^9 = FIC_{LP3}^9 = 0 \text{ [f/a]}$$

$$FIC_{LP2}^9 = 0,015 \text{ [f/a]}$$

$$DIC_{LP1}^9 = DIC_{LP3}^9 = 0 \text{ [h/a]}$$

$$DIC_{LP2}^9 = 0,015 \text{ [falha/ano]} \times 200 \text{ [horas/falha]} = 3 \text{ [h/a]}$$

Resultados finais

Assim, se $FIC_{LPj} = \sum_{k=1}^9 FIC_{LPj}^k$, então:

$$FIC_{LP1} = 0,13 + 0,13 + 0,26 + 0,065 + 0,065 + 0 + 0,26 + 0,13 + 0 = 1,04$$

$$FIC_{LP2} = 0,13 + 0,13 + 0,26 + 0,065 + 0,065 + 0,195 + 0,26 + 0,13 + 0,015 = 1,25$$

$$FIC_{LP3} = 0,13 + 0,13 + 0,26 + 0,065 + 0,065 + 0 + 0,26 + 0,13 + 0 = 1,04$$

E se $DIC_{LPj} = \sum_{k=1}^9 DIC_{LPj}^k$, então:

$$DIC_{LP1} = 0,325 + 0,325 + 1,04 + 0,065 + 0,065 + 0 + 0,26 + 0,13 + 0 = 2,21$$

$$DIC_{LP2} = 0,325 + 0,325 + 0,26 + 0,1625 + 0,1625 + 0,78 + 1,04 + 0,52 + 3 = 6,575$$

$$DIC_{LP3} = 0,325 + 0,325 + 0,26 + 0,1625 + 0,1625 + 0 + 1,04 + 0,52 + 0 = 2,795$$

Os indicadores podem enfim ser calculados segundo as equações da seção anterior:

$$FEC = (1,04 \times 1000 + 1,25 \times 800 + 1,04 \times 700)/2500 = 1,1072 \text{ [f/cons-a]}$$

$$DEC = (2,21 \times 1000 + 6,575 \times 800 + 2,795 \times 700)/2500 = 3,7706 \text{ [h/cons-a]}$$

$$CAIDI = 3,7706/1,1072 = 3,4055 \text{ [h/f]}$$

$$ASUI = 0,0004304$$

$$ASAI = 0,9995695$$

$$ENS = (2,21 \times 5000 + 6,575 \times 4000 + 2,795 \times 3500) = 47,132 \text{ [MWh/a]}$$

Todos os índices são determinados através de processos trabalhosos, especialmente ao tratar-se de sistemas grandes. Porém, percebe-se que o procedimento obedece a uma sequência de cinco etapas de raciocínio: ocorrência da contingência e atuação da proteção, reconfiguração à montante, reconfiguração à jusante, reparo e, por fim, restauração da topologia inicial. A programação deste procedimento em computador viabiliza em muito o estudo da confiabilidade de sistemas maiores e mais próximos da realidade. A partir da próxima seção, os detalhes para implementação computacional e algoritmo de cálculo são discutidos.

2.4 MATRIZES AUXILIARES

Redes de distribuição são caracterizadas por sua radialidade, tanto na perspectiva de fluxo de potência quanto de confiabilidade. Todos os consumidores são atendidos por uma única subestação e todo o fluxo de carga é recebido por um único caminho. Do ponto de vista de confiabilidade, significa que o consumidor precisa que todos os componentes que estão no caminho funcionem, para que o fornecimento permaneça ininterrupto.

Tais características permitem que as redes sejam tratadas como grafos orientados, cujos caminhos obedecem ao fluxo de carga. Esta abordagem já ocorre há algum tempo, desde os livros [46, 47], pelo menos. Alternativamente à metodologia convencional de [44], que usa matrizes de incidência na manipulação dos grafos, o presente trabalho se baseia em matrizes de caminhos possíveis de fluxo de carga da rede, como proposto por [48].

Assim, antes de apresentar o algoritmo de cálculo dos índices de confiabilidade, são definidas as diversas matrizes que permitem acessar as informações importantes da rede. O sistema tutorial apresentado na seção anterior é utilizado para demonstrar a construção das matrizes à medida em que são apresentadas.

2.4.1 Matriz de topologia e equipamentos (M)

Contém os dados da rede tais como:

- Conexões do circuito representadas com barras “De” e “Para” no sentido do fluxo de carga;
- Taxas de falha e tempo médio de reparo baseados em dados históricos de cada seção do alimentador;
- Demanda média de cada ponto de carga;
- Número de consumidores de cada ponto de carga;
- A presença das chaves, disjuntores e fusíveis nas seções e em que extremidade, ou seja, na extremidade da barra “De” ou “Para” da seção;
- Tempos de atuação ou chaveamento de cada um dos dispositivos de proteção e de seccionamento.

A matriz \mathbf{M} é constituída por seis grupos de colunas:

A Topologia e alimentadores

- Coluna D: barra “De” de cada seção do alimentador;
- Coluna P: barra “Para” de cada seção;
- Coluna L: taxa anual de falhas da seção;
- Coluna r: tempo médio de reparo da seção em [horas/ano].

O transformador do exemplo pode ser representado por uma nova seção do alimentador.

Assim, a matriz de topologia e alimentadores para o sistema tutorial é:

$$\mathbf{A} = \begin{array}{c} \begin{matrix} 1-2 \\ 2-3 \\ 3-4 \\ 3-5 \\ 5-6 \\ 6-7 \\ 6-9 \\ 6-10 \\ 7-8 \end{matrix} \begin{bmatrix} D & P & L & R \\ 1 & 2 & 0,13 & 4 \\ 2 & 3 & 0,13 & 4 \\ 3 & 4 & 0,26 & 4 \\ 3 & 5 & 0,065 & 4 \\ 5 & 6 & 0,065 & 4 \\ 6 & 7 & 0,195 & 4 \\ 6 & 9 & 0,26 & 4 \\ 6 & 10 & 0,13 & 4 \\ 7 & 8 & 0,015 & 200 \end{bmatrix} \end{array}$$

- Coluna NCP: existência (valor lógico 1) ou não (0) de chave NC na seção na extremidade do nó “Para”;
- Coluna NCPs: tempo médio de chaveamento da chave NCP na seção.

Para o sistema tutorial, a matriz de chaves NC é:

$$\mathbf{D} = \begin{array}{c} \begin{array}{l} 1-2 \\ 2-3 \\ 3-4 \\ 3-5 \\ 5-6 \\ 6-7 \\ 6-9 \\ 6-10 \\ 7-8 \end{array} \left[\begin{array}{cccc} NCD & NCDs & NCP & NCPs \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{array}$$

E Chaves NO

- Coluna NOP: existência (valor lógico 1) ou não (0) de chave NO na seção na extremidade do nó “Para”;
- Coluna NOPs: tempo médio de chaveamento da chave NOP na seção.

Para o sistema tutorial, a matriz de chaves NO é:

$$\mathbf{E} = \begin{array}{c} \begin{array}{l} 1-2 \\ 2-3 \\ 3-4 \\ 3-5 \\ 5-6 \\ 6-7 \\ 6-9 \\ 6-10 \\ 7-8 \end{array} \left[\begin{array}{cc} NOP & NOPs \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1,5 \\ 0 & 0 \end{array} \right] \end{array}$$

F Dados de cargas

- Coluna CoP: número de consumidores conectados no nó “Para”;
- Coluna CaP: carga total conectada (kW) no nó “Para”;
- Coluna CaM: carga média conectada (kW) no nó “Para”;
- Coluna CoT: tipo de consumidor conectado no nó “Para”.

Para o sistema tutorial, a matriz de dados de cargas é:

$$\mathbf{F} = \begin{array}{c} \begin{array}{l} 1-2 \\ 2-3 \\ 3-4 \\ 3-5 \\ 5-6 \\ 6-7 \\ 6-9 \\ 6-10 \\ 7-8 \end{array} \left[\begin{array}{cccc} CoP & CaP & CaM & CoT \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1000 & 10000 & 5000 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 700 & 7000 & 3500 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 800 & 8000 & 4000 & 1 \end{array} \right] \end{array}$$

A coluna CoT obedece à seguinte relação:

- Tipo 0: Não há consumidores;
- Tipo 1: Grandes usuários;
- Tipo 2: Industriais;
- Tipo 3: Comerciais;
- Tipo 4: Rurais;
- Tipo 5: Residenciais;
- Tipo 6: Instalações do governo;
- Tipo 7: Escritórios ou edifícios.

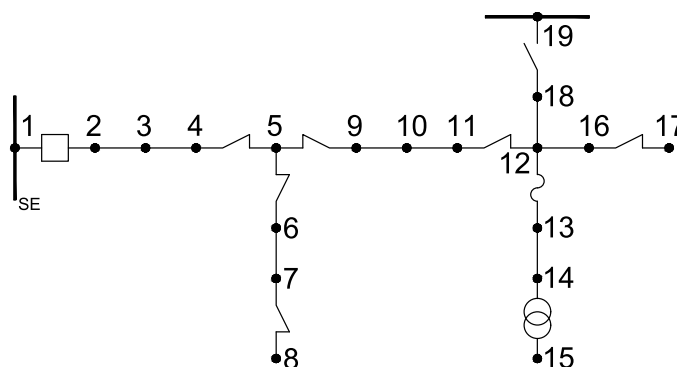
Por fim, constrói-se a matriz \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = [\mathbf{A} \ \mathbf{B} \ \mathbf{C} \ \mathbf{D} \ \mathbf{E} \ \mathbf{F}]$$

2.4.2 Matriz do grafo remodelado (MM)

Após a obtenção da matriz \mathbf{M} , para melhor manipulação de dados, é necessária uma remodelagem do grafo, de modo que cada aresta ou segmento corresponda a um único componente. Assim, a posição relativa de cada elemento do sistema pode ser determinada, conforme mostrado com a apresentação das próximas matrizes. Com a remodelagem, a rede da Figura 2.1 se converte na rede da Figura 2.3.

Figura 2.3 – Sistema tutorial remodelado



Fonte: Elaboração própria.

Desta forma, a matriz \mathbf{MM} é obtida de \mathbf{M} e contém os dados de cada seção de alimentador da rede: barras “De” e “Para”, taxa de falha, tempo de reparo, o tipo e o tempo de manobra.

A convenção adotada para tipos de equipamento é a seguinte:

- Tipo 1: Linha pura (ou transformador, no exemplo tutorial);
- Tipo 2: Disjuntor;
- Tipo 3: Fusível;
- Tipo 4: Chave NC;
- Tipo 5: Chave NO.

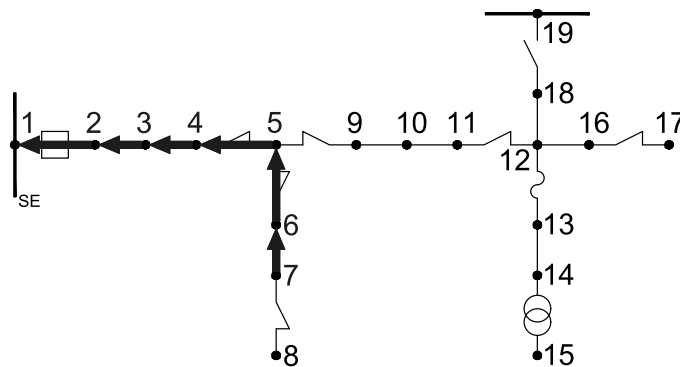
Portanto, para este sistema, **MM** é:

$$\mathbf{MM} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} De & Para & \lambda & r & Tipo & s \\ \left[\begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 2 & 3 & 0,13 & 4 & 1 & 0 \\ 3 & 4 & 0,13 & 4 & 1 & 0 \\ 4 & 5 & 0 & 0 & 4 & 1 \\ 5 & 6 & 0 & 0 & 4 & 1 \\ 5 & 9 & 0 & 0 & 4 & 1 \\ 6 & 7 & 0,26 & 4 & 1 & 0 \\ 7 & 8 & 0 & 0 & 4 & 1 \\ 9 & 10 & 0,065 & 4 & 1 & 0 \\ 10 & 11 & 0,065 & 4 & 1 & 0 \\ 11 & 12 & 0 & 0 & 4 & 1 \\ 12 & 13 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 12 & 16 & 0,26 & 4 & 1 & 0 \\ 12 & 18 & 0,13 & 4 & 1 & 0 \\ 13 & 14 & 0,195 & 4 & 1 & 0 \\ 14 & 15 & 0,015 & 200 & 1 & 0 \\ 16 & 17 & 0 & 0 & 4 & 1 \\ 18 & 19 & 0 & 0 & 5 & 1,5 \end{array} \right. \end{array} \end{array}$$

2.4.3 Matriz de caminhos-acima (Ca)

Esta matriz possui dimensão $n \times n$, sendo n o número de nós do grafo remodelado. Cada linha i contém o caminho do nó i até o nó que representa a subestação. Tomando o exemplo do sistema tutorial, a linha 7 de **Ca** representa o caminho-acima do nó 7 formado pelos nós 7-6-5-4-3-2-1, como se observa em destaque na Figura 2.4 e na matriz apresentada em sequência.

Figura 2.4 – Caminho-acima do nó 7



Fonte: Elaboração própria.

$$\mathbf{Ca} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 9 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 11 & 10 & 9 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 12 & 11 & 10 & 9 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 13 & 12 & 11 & 10 & 9 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 14 & 13 & 12 & 11 & 10 & 9 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 14 & 13 & 12 & 11 & 10 & 9 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 16 & 12 & 11 & 10 & 9 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 17 & 16 & 12 & 11 & 10 & 9 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 18 & 12 & 11 & 10 & 9 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 19 & 18 & 12 & 11 & 10 & 9 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.4.4 Matriz dos índices dos equipamentos à montante (LEm)

Cada linha de **LEm** corresponde a um nó e é preenchida pelos índices de linha dos equipamentos à montante na matriz **MM**. Considerando o nó 7, por exemplo. Os elementos a montante se referem às linhas 12, 3, 11, 2, 10 e 1 de **MM**, como destacado abaixo. É de **LEm** que se deriva **Em**, explicada a seguir.

$$\mathbf{LEm} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 12 & 3 & 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 13 & 12 & 3 & 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 14 & 4 & 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 14 & 4 & 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 5 & 14 & 4 & 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 15 & 5 & 14 & 4 & 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 16 & 6 & 15 & 5 & 14 & 4 & 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9 & 16 & 6 & 15 & 5 & 14 & 4 & 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 15 & 5 & 14 & 4 & 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 17 & 7 & 15 & 5 & 14 & 4 & 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 15 & 5 & 14 & 4 & 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 18 & 8 & 15 & 5 & 14 & 4 & 11 & 2 & 10 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Esta matriz e sua análoga \mathbf{LEj} são fundamentais no processo de otimização, pois são calculadas uma única vez, ao contrário das matrizes de equipamentos que devem ser calculadas a cada iteração do processo de otimização. Assim, não há necessidade de se realizar de buscas no grafo ao longo das iterações para se determinar os equipamentos à jusante ou montante, o que diminui consideravelmente o esforço computacional.

2.4.5 Matriz de equipamentos à montante (\mathbf{Em})

Os equipamentos que fazem parte do caminho acima são armazenados na matriz \mathbf{Em} . No caso do nó 7 do sistema tutorial, seriam eles: linha-NC-NC-linha-linha-disjuntor, ou ainda, com a convenção adotada, tipos 1-4-4-1-1-2, como observado na Figura 2.4 e em destaque na matriz abaixo:

$$\mathbf{Em} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 1 & 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 1 & 1 & 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 4 & 1 & 1 & 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 4 & 1 & 1 & 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 3 & 4 & 1 & 1 & 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 1 & 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 1 & 4 & 1 & 1 & 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 1 & 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 1 & 4 & 1 & 1 & 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

As matrizes \mathbf{Ca} , \mathbf{Em} e \mathbf{LEm} são obtidas conjuntamente de \mathbf{MM} e utilizadas na determinação do dispositivo de proteção atuante e da chave NC que isola a contingência à montante.

$$\mathbf{LEj} = \begin{bmatrix} 1 & 10 & 2 & 11 & 3 & 4 & 12 & 14 & 5 & 13 & 15 & 6 & 7 & 8 & 16 & 17 & 18 & 9 \\ 10 & 2 & 11 & 3 & 4 & 12 & 14 & 5 & 13 & 15 & 6 & 7 & 8 & 16 & 17 & 18 & 9 & 0 \\ 2 & 11 & 3 & 4 & 12 & 14 & 5 & 13 & 15 & 6 & 7 & 8 & 16 & 17 & 18 & 9 & 0 & 0 \\ 11 & 3 & 4 & 12 & 14 & 5 & 13 & 15 & 6 & 7 & 8 & 16 & 17 & 18 & 9 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 4 & 12 & 14 & 5 & 13 & 15 & 6 & 7 & 8 & 16 & 17 & 18 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 12 & 13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 14 & 5 & 15 & 6 & 7 & 8 & 16 & 17 & 18 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 15 & 6 & 7 & 8 & 16 & 17 & 18 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 6 & 7 & 8 & 16 & 17 & 18 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 7 & 8 & 16 & 17 & 18 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 16 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 17 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.4.8 Matriz de equipamentos à jusante (\mathbf{Ej})

Os equipamentos que fazem parte do caminho formado pelos nós-abaxio são armazenados na matriz \mathbf{Ej} .

$$\mathbf{Ej} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 4 & 4 & 4 & 1 & 1 & 4 & 1 & 4 & 3 & 1 & 1 & 1 & 4 & 5 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 4 & 4 & 4 & 1 & 1 & 4 & 1 & 4 & 3 & 1 & 1 & 1 & 4 & 5 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 4 & 4 & 1 & 1 & 4 & 1 & 4 & 3 & 1 & 1 & 1 & 4 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 4 & 1 & 1 & 4 & 1 & 4 & 3 & 1 & 1 & 1 & 4 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 1 & 1 & 4 & 1 & 4 & 3 & 1 & 1 & 1 & 4 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 4 & 3 & 1 & 1 & 1 & 4 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 3 & 1 & 1 & 1 & 4 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 3 & 1 & 1 & 1 & 4 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 1 & 1 & 4 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

No caso do nó 9 do sistema tutorial, os equipamentos à jusante são: linha-linha-NC-fusível-linha-linha-linha-chave-NO-linha, ou ainda, com a convenção adotada, os elementos 1-1-4-3-1-1-1-4-5-1, em destaque na matriz acima.

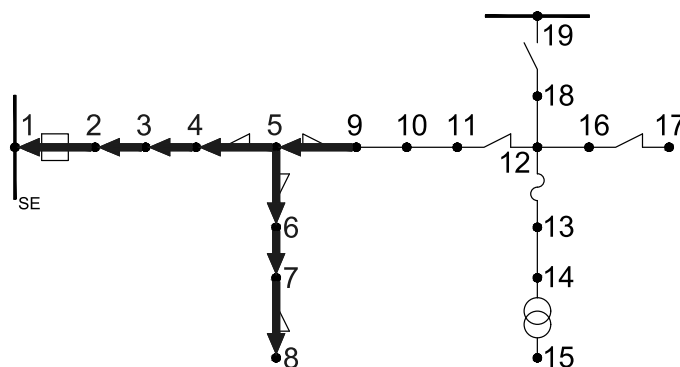
As matrizes \mathbf{Du} , \mathbf{Ej} e \mathbf{LEj} são obtidas conjuntamente de \mathbf{MM} e utilizadas tanto como auxílio na construção das matrizes \mathbf{NCNC} e \mathbf{NONC} quanto na localização da chave NC que isola a contingência à jusante.

2.4.11 Matriz de nós não-jusantes (TNJ)

Esta matriz, exemplificada logo abaixo para o sistema tutorial, possui dimensão igual ao número de nós e armazena todos os nós que antecessores do nó correspondente às suas linhas. Por exemplo, a linha 9, em destaque, se refere aos nós não-jusantes ao nó 9, ou seja, desde o primeiro até o nó de número 8. A Figura 2.8 representa este exemplo.

$$\text{TNJ} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 0 & 0 & 0 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 0 & 0 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 0 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 0 & 0 & 0 & 16 & 17 & 18 & 19 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 0 & 0 & 16 & 17 & 18 & 19 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 0 & 16 & 17 & 18 & 19 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 0 & 0 & 18 & 19 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 0 & 18 & 19 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 2.8 – Nós não-jusantes do nó 9



Fonte: Elaboração própria.

A matriz **TNJ** é obtida de **Du** e é fundamental para a determinação dos nós de fornecimento restaurado após o isolamento à montante da contingência analisada, isto é, após a abertura de chave NC à montante.

2.5 ALGORITMO DE CÁLCULO DE FIC E DIC

As matrizes apresentadas são fundamentais para a utilização do algoritmo da Figura 2.9, a ser descrito em detalhes a seguir. Trata-se uma modificação do algoritmo proposto por [48]. As matrizes permitem acesso às posições de cada nó e equipamento em relação aos demais, sendo possível detectar os afetados quando ocorre a saída de operação de alguma seção de linha específica.

Os eventos desencadeados com qualquer contingência de seção de linha i na rede de distribuição são divididos nas seguintes etapas: atuação da proteção, reconfiguração à montante, reconfiguração à jusante, reparo e restauração da topologia original. Uma vez que a radialidade da rede é uma das premissas, o dispositivo de proteção atuante d é único e se encontra sempre à montante do defeito. A matriz \mathbf{Em} é utilizada para detectar os equipamentos de proteção à montante, sendo considerado o que atuou aquele mais à montante, como a Equação 2.13 descreve matematicamente. Dentre todos os nós, aqueles à jusante da proteção, detectados com o auxílio de \mathbf{Du} e representados por Ω_p (Equação 2.14), têm o fornecimento interrompido por tempo igual ao de reparo à priori. Nas próximas etapas do algoritmo, o valor deste tempo pode se alterar. Assim, os índices FIC e DIC são incrementados de acordo com as equações 2.15 e 2.16.

$$\{d \in \mathbf{Em}(i) \mid \text{índice de } d \text{ é mínimo}\} \quad (2.13)$$

$$\Omega_p = \{\mathbf{Du}(d)\} \quad (2.14)$$

$$p \in \Omega_p \implies \Delta FIC_p = +\lambda_i \quad (2.15)$$

$$p \in \Omega_p \implies \Delta DIC_p = +\lambda_{i,r_i} \quad (2.16)$$

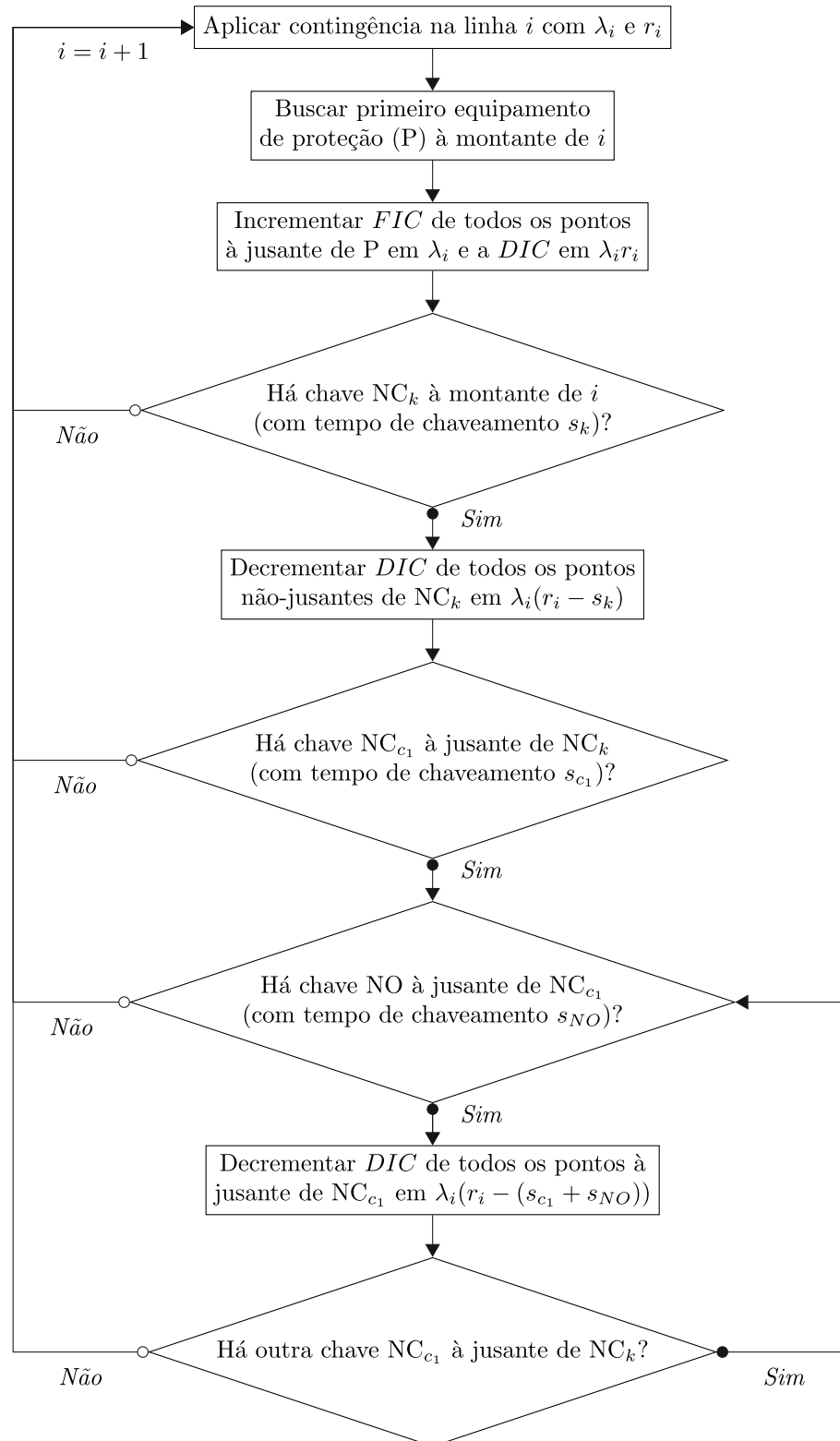
Em seguida, deve ocorrer o isolamento da contingência com a abertura da chave NC posicionada ao mesmo à montante mais próxima do defeito i e à jusante do equipamento de proteção d . Para tal, busca-se novamente na linha $\mathbf{MM}(i, 1)$ (nó “De” da linha em contingência) matriz \mathbf{Em} os elementos de tipo 4 ou 2, que representam chave NC e disjuntor, respectivamente. A existência de um desses dispositivos na localização citada, denominado k , de tempo de chaveamento s_k , possibilita a reconfiguração à montante da contingência, como mostra a Equação 2.17, reduzindo o tempo de interrupção do conjunto de nós não-jusantes Ω_k com auxílio de a matriz \mathbf{TNJ} (Equação 2.18) para o tempo de manobra da chave segundo a Equação 2.19.

$$\{k \in \mathbf{Em}(i) \mid \text{índice de } k \text{ é mínimo e inferior ao índice de } d\} \quad (2.17)$$

$$\Omega_k = \{\mathbf{TNJ}(k)\} \quad (2.18)$$

$$p \in \Omega_k \implies \Delta DIC_p = -\lambda_{i,(r_i - s_k)} \quad (2.19)$$

Figura 2.9 – Fluxograma para cálculo de FIC e DIC dos pontos da rede



Fonte: Reproduzido de [48].

Uma vez determinada a chave NC à montante a ser aberta, **NCNC** deve ser analisada. Sabe-se que esta matriz contém valores lógico positivos nas linhas que correspondem a chaves NC e nas colunas referentes às chaves a jusante. Assim, o trecho i deve estar entre as duas chaves em questão, ou seja, entre os elementos de linha l_1 e a coluna c_1 , posição do elemento unitário de **NCNC**. Os trechos que atendem esta condição compõem o conjunto $\Omega_{j'}$, como mostra Equação 2.20.

$$\Omega_{j'} = \{i \mid l_1 < i < c_1\} \quad \text{sendo } \mathbf{NCNC}(l_1, c_1) = 1 \quad (2.20)$$

Além disso, para que a reconfiguração à jusante seja possível, deve existir interconexão à jusante do isolamento da contingência, isto é, da chave de linha c_1 na matriz **MM**. **NONC** é, então utilizada, pois ao acessar a linha c_1 desta matriz, encontram-se as chaves NO à jusante, sendo escolhida a mais próxima, de tempo de manobra s_{NO} . A esta escolha cabem vários estudos à parte, como [49, 50, 51] não sendo o foco desta dissertação sobre confiabilidade. Assim, o conjunto de contingências passíveis de reconfiguração à jusante Ω_j é atualizado segundo a Equação 2.21.

$$\Omega_j = \{i \in \Omega_{j'} \mid \exists \mathbf{NONC}_{c_1} = 1\} \quad (2.21)$$

Por fim, **Du** permite selecionar o conjunto de nós Ω_r restaurados (Equação 2.22), que têm seus valores de DIC reduzidos para o tempo de manobra como mostra a Equação 2.23.

$$\Omega_r = \{\mathbf{Du}(c_1)\} \quad (2.22)$$

$$p \in \Omega_r \implies \Delta DIC_p = -\lambda_i \cdot (r_i - (s_{c_1} + s_{NO})) \quad (2.23)$$

Assim, finaliza-se a análise da contingência i através das etapas: atuação da proteção, reconfiguração à montante, reconfiguração à jusante, reparo e restauração da topologia original. O processo se repete para $i + 1$ até se completarem todas as L contingências. Em suma, o cálculo dos índices FIC e DIC de cada ponto do grafo remodelado p obedece as equações 2.24 e 2.25. Uma vez que estes índices estão determinados, o cálculo dos demais torna-se simples com as fórmulas já apresentadas na Seção 2.2.

$$FIC_p = \sum_{i=1}^L \lambda_i, \quad \text{para } p \in \Omega_p \quad (2.24)$$

$$DIC_p = \begin{cases} \sum_{i=1}^L [\lambda_i r_i - \lambda_i (r_i + s_k) - \lambda_i \cdot (r_i - (s_{c_1} + s_{NO}))], \\ \text{para} \\ p \in \Omega_p \\ \exists (r_i + s_k) \Leftrightarrow p \in \Omega_k \\ \exists (s_{c_1} + s_{NO}) \Leftrightarrow p \in \Omega_r \end{cases} \quad (2.25)$$

2.6 MODELO DE REDE

Para determinar a quantidade de potência que flui entre as barras de um sistema elétrico de potência, é necessário descrever matematicamente as interações elétricas envolvidas. A modelagem da rede é que possibilita tal descrição e deve gerar resultados próximos aos que ocorrem na realidade. Além deste aspecto, deve-se atentar à duração do fenômeno que se deseja estudar. Muitas vezes, vários fenômenos ocorrem simultaneamente, entretanto, apenas um, o mais relevante para o tempo de observação, é objeto de estudo. Tais informações permitem a classificação da análise em regime subtransitório, transitório ou permanente, sendo este o caso do fluxo de potência convencional, desenvolvido a seguir.

O elemento mais comum dos sistemas a serem estudados é a linha de transmissão, que liga uma barra k a outra barra m e transmite a potência entre as mesmas. O modelo adotado é denominado “modelo π ”, representado pela Figura 2.10, conforme [52]. Os parâmetros que definem este modelo são: a resistência série, a reatância série e a susceptância *shunt*.

A impedância do elemento série \dot{z}_{km} é:

$$\dot{z}_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (2.26)$$

onde r_{km} e x_{km} são, respectivamente, a resistência série e a reatância série entre as barras k e m .

A admitância série \dot{y}_{km} , por sua vez, é:

$$\dot{y}_{km} = g_{km} + jb_{km} = (\dot{z}_{km})^{-1} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} - j\frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.27)$$

onde g_{km} e b_{km} são, respectivamente, a condutância série e a susceptância série, dadas por:

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.28)$$

$$b_{km} = -\frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.29)$$

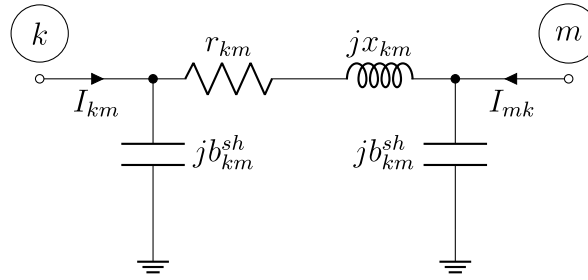
No modelo π de linha de transmissão, r_{km} e x_{km} são positivos, o que implica g_{km} positivo e b_{km} negativo (tipo indutivo). Já a susceptância *shunt* b_{km}^{sh} é positiva, pois o elemento *shunt* é do tipo capacitivo.

A corrente \dot{I}_{km} é formada de uma componente série e uma componente *shunt*, e pode ser calculada a partir das tensões fasoriais terminais \dot{V}_k e \dot{V}_m , além dos parâmetros do modelo equivalente π , conforme Equação 2.30.

$$\dot{I}_{km} = \dot{y}_{km}(\dot{V}_k - \dot{V}_m) + jb_{km}^{sh}\dot{V}_k \quad (2.30)$$

em que:

$$\dot{V}_k = V_k e^{j\theta_k} \quad (2.31)$$

Figura 2.10 – Modelo equivalente π de linha de transmissão

Fonte: Elaboração própria.

$$\dot{V}_m = V_m e^{j\theta_m} \quad (2.32)$$

O fluxo de potência complexa correspondente é:

$$\dot{S}_{km}^* = P_{km} - jQ_{km} = \dot{V}_k^* \dot{I}_{km} = \dot{y}_{km} V_k e^{j\theta_k} (V_k e^{j\theta_k} - V_m e^{j\theta_m}) + j b_{km}^{sh} V_k^2 \quad (2.33)$$

Os fluxos de potência ativa e reativa P_{km} e Q_{km} , respectivamente, são obtidos identificando-se as partes reais e imaginárias da equação complexa anterior, resultando em:

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (2.34)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m g_{km} \sin \theta_{km} \quad (2.35)$$

O módulo de \dot{I}_{km} pode ser calculado em função de P_{km} e Q_{km} por:

$$|\dot{I}_{km}| = I_{km} = \frac{\sqrt{(P_{km}^2 + Q_{km}^2)}}{V_k} \quad (2.36)$$

Analogamente, os fluxos P_{mk} e Q_{mk} são obtidos:

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (2.37)$$

$$Q_{mk} = -V_m^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m g_{km} \sin \theta_{km} \quad (2.38)$$

Nota-se pela Figura 2.10 que $|\dot{V}_k - \dot{V}_m|$ é o módulo da tensão sobre o elemento série do modelo equivalente π , de forma que $g_{km} |\dot{V}_k - \dot{V}_m|^2$ são as perdas ôhmicas, $-b_{km} |\dot{V}_k - \dot{V}_m|^2$ são as perdas reativas no elemento série, e $-b_{km}^{sh} (V_k^2 + V_m^2)$ corresponde à geração de potência reativa nos elementos *shunt*. Vale destacar que, em linhas reais, $b_{km} < 0$ e $b_{km}^{sh} > 0$.

Mais explicitamente, as perdas ativas e reativas são obtidas por:

$$P_{mk} + P_{km} = g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) = g_{km} |\dot{V}_k - \dot{V}_m|^2 \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} Q_{mk} + Q_{km} &= -b_{km}^{sh} (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) = \\ &= -b_{km}^{sh} (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} |\dot{V}_k - \dot{V}_m|^2 \end{aligned} \quad (2.40)$$

As equações aqui desenvolvidas representam o chamado fluxo de potência por injeção de potência em coordenadas polares.

2.7 CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo apresenta a metodologia escolhida de cálculo de indicadores de confiabilidade e sua aplicação em sistema tutorial. O procedimento é trabalhoso e inviável de ser realizado à mão, especialmente quando se trata de sistemas grandes, o que justifica implementação computacional. Com este objetivo, a metodologia proposta, que faz uso das matrizes auxiliares apresentadas no algoritmo de cálculo de *FIC* e *DIC*, permite considerar com eficiência a sequência dos principais eventos que surgem quando ocorre contingência em alguma seção do alimentador. Assim, a melhoria dos índices de confiabilidade devido à alocação de interconexões, que segue a metodologia apresentada no próximo capítulo, pode ser avaliada.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

3.1 INTRODUÇÃO

A metodologia proposta na presente dissertação para a alocação ótima de chaves em sistemas de distribuição consiste em duas etapas. A primeira etapa, assunto da próxima seção, se baseia na aplicação de multiplicadores de Lagrange resultantes de um modelo de fluxo de potência ótimo (FPO), cujo objetivo é alcançar o máximo carregamento. A Seção 3.2 se dedica exclusivamente à primeira etapa, de alocação de interconexões. Nela é formulado o problema do FPO, possibilitando a análise de sensibilidade que permite determinar a localização de trechos de interconexão. Em sequência, explica-se o algoritmo desta etapa, que é aplicado em um sistema tutorial. O FPO é resolvido com o método dos pontos interiores (MPI), apresentado no Apêndice A.

A segunda etapa da metodologia consiste na resolução de outro problema de otimização, cuja função objetivo representa o índice de confiabilidade energia esperada não suprida (ENS). As interconexões encontradas na etapa anterior são admitidas, e apenas as posições de chaves seccionadoras são otimizadas, caracterizando as variáveis do problema como binárias. Assim, após a aplicação tutorial da primeira etapa da metodologia, segue a seção dedicada à formulação matemática do problema de otimização da segunda etapa. O método de resolução e seus fundamentos são explanados na sequência. Finaliza-se o capítulo com as conclusões sobre o desenvolvimento da metodologia proposta.

3.2 ETAPA 1: ALOCAÇÃO DE INTERCONEXÕES

3.2.1 Formulação para FPO Principal da Etapa 1

O fluxo de potência convencional possibilita a determinação do estado da rede, ou, mais especificamente, as tensões de suas barras, ajustes de transformadores de tape variável, potência que flui entre as barras e outras grandezas importantes segundo uma condição particular de operação (carga e geração). O fluxo de potência ótimo (FPO), por sua vez, encontra aquele estado da rede que, além de atender à demanda, alcança um objetivo determinado, isto é, o valor ótimo de algum parâmetro ou indicador. Por isso, existem diversas aplicações, como minimização de perdas, despacho econômico e maximização de carregamento, aplicação explorada no presente trabalho.

O FPO considerado refere-se a um problema de otimização não-linear e segue a formulação padrão representada pelas equações 3.1 a 3.4, sempre contendo, além da função objetivo específica $f(z)$, restrições de igualdade $h(z)$, de desigualdade $d(z)$ e de canalização, sendo z o vetor de variáveis. Nas próximas subseções, a formulação utilizada na metodologia proposta é detalhada.

$$\text{Min } f(z) \quad (3.1)$$

s.a.

$$h(z) = 0 \quad (3.2)$$

$$d(z) \leq 0 \quad (3.3)$$

$$l \leq z \leq u \quad (3.4)$$

3.2.1.1 Função Objetivo

A função objetivo do FPO a ser maximizada é o carregamento do sistema de potência. A solução fornece o estado da rede que supre a maior demanda possível, sem que haja violação de restrições. Parte-se do pressuposto que o máximo carregamento implica em maior aproveitamento dos alimentadores e, assim, no maior potencial de transferência de potência entre os mesmos. A função objetivo de máximo carregamento pode ser expressa pela Equação 3.5.

$$\text{Max } \beta \cdot \sum_{k \in B} [PD_k] \quad (3.5)$$

onde β é o fator de carregamento do sistema, B é o conjunto de barras do sistema, e PD_k é a potência de carga ativa da barra k em [kW].

Ao alocar interconexões de maior potencial entre alimentadores, surgem duas consequências: melhoria de indicadores de confiabilidade e potencialidade para redução de perdas através da reconfiguração. A primeira é evidenciada ao se considerar contingências na rede, que requerem um caminho alternativo para que o máximo de carga seja suprida, evitando a desconexão de unidades consumidoras e/ou minimizando cortes nas mesmas. Tal caminho é fornecido por trechos de interconexão entre alimentadores, que viabilizam a transferência de carga a partir de alimentadores de maior capacidade. A outra consequência se explica pelo fato de o sistema, ao operar com maior margem de carregamento através de fechamento de interconexões com maior potencial de transferência, apresenta menor nível de perdas. Estes aspectos motivam a escolha da função objetivo em questão.

3.2.1.2 Restrições

Conforme já comentado, as restrições são responsáveis por impor ao problema do FPO, além das leis físicas que regem o sistema, os limites operacionais da rede. As equações de balanço de potência são as primeiras a serem consideradas. Elas expressam que parte da potência ativa e reativa gerada na barra k (PG_k e QG_k , respectivamente) é transmitida por linhas (P_{km} e Q_{km}) e outra parte é consumida na própria barra (PD_k e QD_k), conforme as equações 3.6 e 3.7.

$$PG_k - \sum_{m \in BR_k} P_{km} - \beta \cdot PD_k = 0 \quad (\lambda p_k) \quad (3.6)$$

$$QG_k - \sum_{m \in BR_k} Q_{km} - \beta \cdot QD_k = 0 \quad (3.7)$$

em que BR_k representa o conjunto de barras conectados ao nó k e λp_k representa o multiplicador de Lagrange associado à equação de balanço de potência ativa (Equação 3.6).

As equações de fluxo 2.34 e 2.35 definem P_{km} e Q_{km} , respectivamente, sendo incluídas no grupo de restrições de igualdade. Estas variáveis são limitadas de acordo com a capacidade das linhas. Outras variáveis limitadas segundo as condições operativas da rede são V_k , PG_k e QG_k . As restrições a seguir representam tais limitações.

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (3.8)$$

$$PG_k^{min} \leq PG_k \leq PG_k^{max} \quad (3.9)$$

$$QG_k^{min} \leq QG_k \leq QG_k^{max} \quad (3.10)$$

$$P_{km}^2 + Q_{km}^2 \leq (S_{km}^{max})^2 \quad (3.11)$$

Por fim, como última restrição, o fator de carregamento é a variável que multiplica a demanda na função objetivo. O valor mínimo ($\beta = 1$) implica que o máximo carregamento coincide com a carga original. Com o FPO, espera-se atingir o maior valor possível de β , para maximizar $\beta \cdot PD_k$, presente na função objetivo.

$$\beta \geq 1 \quad (3.12)$$

3.2.1.3 Modelo Completo

Detalhadas as restrições e função objetivo, o problema de FPO para máximo carregamento do sistema de distribuição é formulado como:

$$\text{Max } \beta \cdot \sum_{k \in B} [PD_k] \quad (3.13)$$

s.a.

$$PG_k - \sum_{m \in BR_k} P_{km} - \beta \cdot PD_k = 0 \quad (\lambda p_k) \quad (3.14)$$

$$QG_k - \sum_{m \in BR_k} Q_{km} - \beta \cdot QD_k = 0 \quad (3.15)$$

$$P_{km} - (V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km}) = 0 \quad (3.16)$$

$$Q_{km} - (-V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m g_{km} \sin \theta_{km}) = 0 \quad (3.17)$$

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (3.18)$$

$$PG_k^{min} \leq PG_k \leq PG_k^{max} \quad (3.19)$$

$$QG_k^{min} \leq QG_k \leq QG_k^{max} \quad (3.20)$$

$$P_{km}^2 + Q_{km}^2 \leq (S_{km}^{max})^2 \quad (3.21)$$

$$\beta \geq 1 \quad (3.22)$$

3.2.1.4 Índice de Sensibilidade

Os multiplicadores de Lagrange são um recurso para permitir a modelagem das restrições do problema de otimização para a função objetivo, simulando uma penalização quando ocorre a violação da restrição. Qualquer variação na restrição é refletida na função a ser otimizada, denominada Lagrangeana. Os multiplicadores de Lagrange, também chamados de variáveis duais, quantificam este aspecto. Em outras palavras, estes multiplicadores representam a variação marginal da função objetivo em relação ao recurso da restrição correspondente.

Para melhor esclarecimento, considera-se o seguinte problema: maximizar a função de lucro dada pela Equação 3.23, onde x e y representam áreas de cultivo de dois tipos de cereais diferentes. A soma das áreas não deve ultrapassar 100 ares, e cada uma não deve ultrapassar 80 ares.

$$\text{Max } 600x + 800y \quad (3.23)$$

s.a.

$$x + y \leq 100 \quad (\lambda_{c1}) \quad (3.24)$$

$$x \leq 80 \quad (\lambda_{c2}) \quad (3.25)$$

$$y \leq 80 \quad (\lambda_{c3}) \quad (3.26)$$

A função lagrangeana é:

$$\Lambda(x, y, \lambda_{c1}, \lambda_{c2}, \lambda_{c3}) = 600x + 800y - \lambda_{c1}(x + y - 100) - \lambda_{c2}(x - 80) - \lambda_{c3}(y - 80) \quad (3.27)$$

onde λ_{c1} , λ_{c2} e λ_{c3} são os multiplicadores de Lagrange associados às respectivas restrições.

A resposta é $x = 20$ e $y = 80$ ares, com $\lambda_{c1} = 600$, resultando em 76000 \$ na função objetivo. Admitindo-se variação de uma unidade na restrição de área total, aumentando-a de 100 para 101, obtém-se aumento de 600 \$ de lucro. Assim, o multiplicador de Lagrange λ_{c1} pode ser definido como a variação do lucro em relação à área total disponível.

A interpretação dos multiplicadores de Lagrange é fundamental para a compreensão da metodologia proposta. O FPO formulado na seção anterior é um problema de otimização cujas variáveis duais revelam informações úteis na alocação de interconexões. Neste caso, a principal restrição da Equação 3.14, que representa o balanço de potência ativa. Variá-la positivamente, aumentando o valor à direita da igualdade, significa injetar maior potência na barra k . Assim é interpretado λp_k , isto é, como a variação do máximo carregamento em relação a potência injetada na barra.

Tendo em vista essa interpretação, é proposto o índice de sensibilidade ID_{km} , conforme a Equação 3.28. A diferença entre os multiplicadores de Lagrange relacionados com as equações de balanço de potência representa a diferença de injeção de potência

ativa entre barras k e m , denominada ID_{km} . Este índice fornece uma medida do fluxo que poderia ocorrer entre as barras e é calculado para cada trecho candidato a interconexão. Por fim, basta realizar uma ordenação dos trechos segundo seus índices. Aqueles que possuírem os maiores valores de ID_{km} possuem o maior potencial de fluxo, sendo, portanto, escolhidos para interconexões.

$$ID_{km} = \lambda p_k - \lambda p_m \quad (3.28)$$

Sob a perspectiva da confiabilidade, os trechos escolhidos são interessantes, pois permitem maior suprimento de carga quando utilizados. Na situação de contingência em rede radial, busca-se isolar o defeito e, em sequência, alimentar o circuito à jusante através do fechamento de alguma chave de interconexão, possibilitando fluxo de potência alternativo. Assim, importa que a capacidade de fluxo do trecho de interconexão seja suficientemente alta, para suprir o circuito à jusante da contingência, ou, caso contrário, ocorrerá corte de carga, o que afeta negativamente os índices de confiabilidade.

3.2.2 Formulação para FPO para Desempate da Etapa 1

O FPO proposto nesta subseção é utilizado nos casos em que trechos candidatos possuem o mesmo ID_{km} , tornando assim, necessário um critério de desempate. Para atingir este objetivo, é proposto o FPO para Desempate. Neste FPO, as interconexões candidatas são modeladas pela função sigmoide como chaves com capacidade de transferência reduzida, visando obter os multiplicadores de Lagrange correspondentes para definir a melhor opção entre elas.

3.2.2.1 Função Objetivo

A função objetivo do FPO para desempate é a mesma do FPO principal, a saber, o carregamento do sistema de potência, reescrita na Equação 3.29.

$$\text{Max } \beta \cdot \sum_{k \in B} [PD_k] \quad (3.29)$$

3.2.2.2 Restrições

As chaves de interconexão em um SDEE, como as seccionadoras, funcionam de maneira discreta: ou interrompem o circuito, ou conectam. Só há estas duas possibilidades se tratando de fluxo de carga e seriam idealmente representadas por variáveis binárias, simulando uma função degrau. Entretanto, a ferramenta comumente utilizada para resolução de FPO, isto é, o método de pontos interiores, não é capaz de resolver um FPO que contenha uma função como esta, cujo ponto de transição de estado contém derivadas infinitas. Disto isto, uma alternativa é eliminar o ponto de descontinuidade com o uso da função sigmoide. Esta é a abordagem utilizada, por exemplo, em [54], [55], [56] e [57].

Desta forma, os balanços de potência ativa e reativa são descritos em função do estado das interconexões conectadas na barra k , como mostra as equações 3.30 e 3.31.

$$PG_k - \beta PD_k + \sum_{m \in BR'_k} P_{km} + \sum_{m \in TS_k} CH_{km} P_{km} = 0 \quad (3.30)$$

$$QG_k - \beta QD_k + \sum_{m \in BR'_k} Q_{km} + \sum_{m \in TS_k} CH_{km} Q_{km} = 0 \quad (3.31)$$

em que: BR'_k representa o conjunto de barras que não são de interconexão conectadas na barra k ; TS_k é o conjunto de barras de interconexão conectadas na barra k ; e CH_{km} é a variável que representa o estado da interconexão km dada pela Equação 3.32.

$$CH_{km} = \frac{e^{c_{km}} - 1}{e^{c_{km}} + 1}, \quad \forall m \in TS_k \quad (3.32)$$

$$0 \leq c_{km} \leq 10^{-5} \quad (\pi u_{km}) \quad (3.33)$$

em que: CH_{km} , que varia no intervalo $[0, 1]$, representa o valor de posição da chave de interconexão no circuito km e c_{km} é a variável de otimização associada à esta interconexão.

O objetivo das variáveis de comutação (c_{km}) é apenas obter os multiplicadores de Lagrange πu_{km} para os caminhos candidatos para as chaves de empate. Por esse motivo, seus limites são muito pequenos (10^{-5}), conforme restrição na Equação 3.33, para não impactar o fluxo de potência e, assim, fornecer a sensibilidade correta da rede. Como πu_{km} dá a variação marginal da função objetivo em Equação 3.29 em relação ao limite superior de chaveamento, os maiores valores de πu_{km} estão associados às chaves cujo aumento em seus limites maximiza a carga do sistema. Portanto, a interconexão que tem maior potencial para maximizar a restauração da rede em caso de falhas e, assim, melhorar a confiabilidade é aquela com o maior πu_{km} .

As demais restrições são de canalização, sendo idênticas àquelas formuladas para o FPO principal.

3.2.2.3 Modelo Completo

Detalhadas as restrições e função objetivo, o problema de FPO para desempate entre interconexões candidatas da primeira etapa é:

$$\text{Max } \beta \cdot \sum_{k \in B} [PD_k] \quad (3.34)$$

s.a.

$$PG_k - \beta PD_k + \sum_{m \in BR'_k} P_{km} + \sum_{m \in TS_k} CH_{km} P_{km} = 0 \quad (3.35)$$

$$QG_k - \beta QD_k + \sum_{m \in BR'_k} Q_{km} + \sum_{m \in TS_k} CH_{km} Q_{km} = 0 \quad (3.36)$$

$$CH_{km} = \frac{e^{c_{km}} - 1}{e^{c_{km}} + 1}, \quad \forall m \in TS_k \quad (3.37)$$

$$P_{km} - (V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km}) = 0 \quad (3.38)$$

$$Q_{km} - (-V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m g_{km} \sin \theta_{km}) = 0 \quad (3.39)$$

$$0 \leq c_{km} \leq 10^{-5} \quad (\pi u_{km}) \quad (3.40)$$

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (3.41)$$

$$PG_k^{min} \leq PG_k \leq PG_k^{max} \quad (3.42)$$

$$QG_k^{min} \leq QG_k \leq QG_k^{max} \quad (3.43)$$

$$P_{km}^2 + Q_{km}^2 \leq (S_{km}^{max})^2 \quad (3.44)$$

$$\beta \geq 1 \quad (3.45)$$

3.2.3 Algoritmo Heurístico Construtivo Proposto

Como explicado anteriormente, o índice de sensibilidade ID_{km} provém de multiplicadores de Lagrange e sua avaliação permite selecionar trechos de interconexão dentre um conjunto de candidatos. A presente seção apresenta a cadeia de processos pela qual exatamente é feita tal seleção. No algoritmo heurístico construtivo proposto (AHCP), inclui-se a avaliação dos ganhos alcançados em termos de confiabilidade e redução de perdas. Trata-se de uma abordagem heurística e composta por dezesseis etapas, como ilustra a Figura 3.1. Cada etapa é descrita em detalhes a seguir.

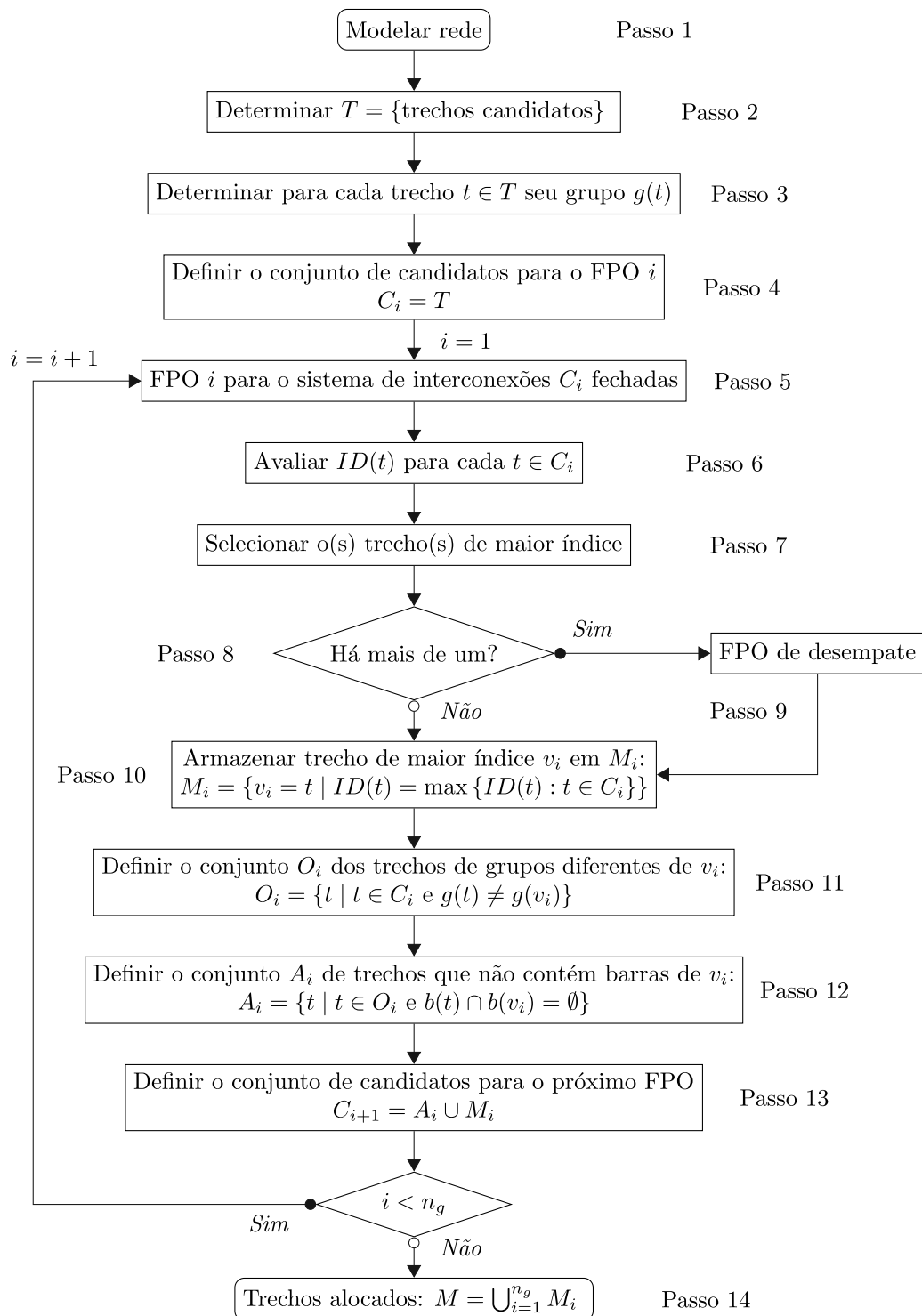
O primeiro passo do algoritmo consiste em modelar a rede conforme a Seção 2.6, isto é, utilizando o modelo equivalente π para as linhas, de modo que os parâmetros de resistência série, reatância série e susceptância *shunt* de cada linha sejam conhecidos. Com relação às barras do sistema, as potências gerada e consumida, além do tipo de cada barra, são necessárias. Estes dados possibilitam a execução do FPO e do algoritmo de reconfiguração na terceira etapa. Além disso, a rede deve ser modelada também em termos de confiabilidade, isto é, com as taxas de falha de cada seção de alimentador, tempos de reparo e de manobra, como preparação para o cálculo dos indicadores de confiabilidade na próxima etapa.

O segundo passo consiste na seleção de trechos candidatos, cujo conjunto é denominado T . O procedimento para selecioná-los é heurístico, não sendo adotada qualquer rotina para determiná-los, mas uma análise por inspeção.

Deve ocorrer o agrupamento dos trechos de acordo com a localização de cada um em relação aos alimentadores principais. Este é o terceiro passo do algoritmo. Um sistema pode ter vários alimentadores que saem da subestação. Por exemplo, se um determinado trecho candidato $t \in T$ está localizado entre os alimentadores A e B, então pertence a um grupo x . Se, porém, se localiza entre os alimentadores A e C ou B e C, é parte de outro grupo y . A função $g(t)$, onde $g: T \rightarrow \mathbb{N}$, representa este comportamento. A seleção de determinado trecho candidato como alocado de fato ocorre de acordo com seu grupo.

Dando início ao quarto passo, a variável i , que tem a função de contar os *loops* do

Figura 3.1 – Fluxograma do AHCP



Fonte: Elaboração própria.

algoritmo, é inicializada. Define-se o conjunto de trechos candidatos C_i a ser repassado para o primeiro FPO, que dá início ao *loop* do algoritmo. Tais trechos são tratados como se fossem seções comuns de alimentador do sistema. Quando $i = 1$, isto ocorre com todos

os trechos, sendo $C_i = T$, como definido na etapa dois, fechando várias malhas no sistema. Percebe-se que trechos de todos os grupos são considerados neste primeiro momento, o que não ocorre nas próximas repetições, pois C_i muda a cada iteração.

Após a execução do FPO principal, o procedimento é colher os multiplicadores de Lagrange pertinentes e calcular o índice de sensibilidade para cada trecho t de C_i . A teoria por trás deste passo está detalhadamente discutida na seção anterior. O índice ID_{km} é representado pela função $ID(t)$, dada pela Equação 3.28, onde $ID: T \rightarrow \mathbb{R}$. Este é o sexto passo.

Pode acontecer de, ao determinar o maior índice, vários trechos tenham este valor, o que levaria a um empate. O passo 8 do algoritmo detecta este caso. Se existir apenas um candidato de ID_{km} máximo, segue-se para o passo 10. Caso contrário, torna-se necessário um critério de desempate para selecionar o melhor trecho, o que leva ao passo 9.

Através do FPO de desempate descrito em Subseção 3.2.2, o trecho vencedor é determinado de acordo com seu πu_{km} , sendo aquele que possuir o maior valor desta variável. Vale destacar a razão pela qual o FPO principal e o índice ID_{km} são utilizados como critério primário de seleção de candidatos ao invés de πu_{km} do FPO de desempate. A verdade é que, quando aplicado isoladamente, o FPO de desempate não conduziu a bons resultados, aspecto que será investigado em trabalhos futuros. No entanto, quando a decisão inicial é dada pelo índice de sensibilidade ID_{km} , a variável dual πu_{km} consegue prover um bom critério de escolha em caso de empate entre interconexões candidatas, conforme é demonstrado no caso tutorial. Após o desempate, segue-se para o passo 10.

O trecho com maior ID_{km} é denominado v_i e armazenado em M_i , sendo o escolhido para ser alocado na rodada i . Este é o passo 10. Dentre o grupo de v_i , então, já existe um trecho alocado e os outros candidatos de mesmo grupo podem ser desprezados. É justamente o que ocorre na oitava etapa. O conjunto dos trechos candidatos remanescentes é denominado O_i .

Além de serem excluídos os candidatos de mesmo grupo, no passo 11, aqueles que contêm barras de v_i também devem ser retirados da lista de candidatos. Assim se forma o conjunto A_i . O motivo se encontra no próprio algoritmo de cálculo de índices de confiabilidade. Nos estudos de caso do presente trabalho, bem como na literatura [8, 30, 37], são desprezadas as taxas de falha dos trechos de interconexões, de modo que só importa a localização das próprias barras. Por exemplo, se v_i se encontra entre as barras A e B, não seria necessária outra interconexão que tenha a barra A ou B. O nono passo do algoritmo proposto tem este objetivo de eliminar trechos desnecessários. A função $b(t)$, onde $b: T \rightarrow \mathbb{N}^2$, retorna as barras terminais de t .

No Passo 12, une-se o conjunto dos trechos que não são do mesmo grupo tampouco possuem barras de v_i com o próprio v_i para se obter o conjunto de candidatos a serem considerados trechos comuns de alimentador no próximo FPO. Este é o passo 13. Expres-

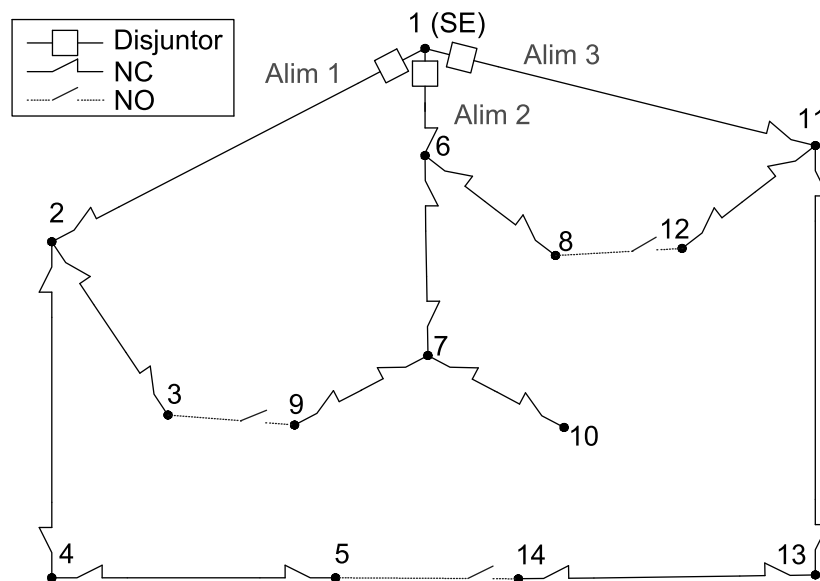
sando em termos matemáticos, $C_{i+1} = A_i \cup M_i$. A variável i não tem o valor de um grupo específico, sua única função é a de contar as repetições para finalizá-las quando atingir a quantidade de grupos existentes n_g .

Com a saída do laço do algoritmo, chega-se ao último passo do algoritmo, no qual o conjunto de trechos alocados M é definido pela união de todos os conjuntos M_i .

3.2.4 Aplicação Tutorial

Para demonstrar a aplicação da metodologia proposta para alocação de interconexões, o algoritmo apresentado na Subseção 3.2.3 é aplicado ao sistema de 14 barras da Figura 3.2, encontrado em [58]. Este sistema é amplamente utilizado em estudos de reconfiguração de redes de distribuição para redução de perdas. Suas interconexões originais são os trechos entre as barras terminais: 3-9, 5-14 e 8-12. As etapas do algoritmo proposto são descritas na sequência.

Figura 3.2 – Sistema 14 barras original



Elaboração própria.

Passo 1: As linhas são tratadas conforme o modelo equivalente π com as susceptâncias desprezadas. Os valores resistência e reatância série são encontrados na referência supracitada, bem como as potências ativa e reativa em cada barra “Para”. A Tabela 3.1 contém os dados referidos. Além disso, a quarta coluna se refere aos equipamentos encontrados na linha conforme o diagrama do sistema. Como convenção:

- Tipo igual a 1: disjuntor na extremidade da barra “De”, e chave NC na extremidade da barra “Para”;

- Tipo igual a 2: chave NC em ambas extremidades;
- Tipo igual a 3: chave NO na extremidade da barra “Para”.

Tabela 3.1 – Dados das linhas do sistema de 14 barras

Trecho	De	Para	Tipo	r (pu)	x (pu)	Pd (pu)	Qd (pu)	N. cons.
S_1	1	2	1	0,075	0,10	2,0	1,6	400
S_2	2	3	2	0,08	0,11	3,0	1,5	600
S_3	2	4	2	0,09	0,18	2,0	0,8	400
S_4	4	5	2	0,04	0,04	1,5	1,2	300
S_5	1	6	1	0,11	0,11	4,0	2,7	800
S_6	6	7	2	0,08	0,11	5,0	3,0	1000
S_7	6	8	2	0,11	0,11	1,0	0,9	200
S_8	7	9	2	0,11	0,11	0,6	0,1	120
S_9	7	10	2	0,08	0,11	4,5	2,0	900
S_{10}	1	11	1	0,11	0,11	1,0	0,9	200
S_{11}	11	12	2	0,09	0,12	1,0	0,7	200
S_{12}	11	13	2	0,08	0,11	1,0	0,9	200
S_{13}	13	14	2	0,04	0,04	2,1	1,0	420

Fonte: Elaboração própria.

As considerações para cálculos de índices e custos de confiabilidade são inspirados em [30, 45, 59] com algumas alterações:

- A última coluna da Tabela 3.1 se refere ao número de consumidores conectados na barra “Para”, determinados ao assumir uma carga de 5 kW por consumidor;
- Carga média igual a 66% da carga de pico;
- Taxa de falha dos trechos de 0,05 falha por ano;
- Tempo de reparo dos trechos de 5 horas por falha;
- Tempo de seccionamento de 1 hora;
- Função de danos ao cliente da Figura 1.1, expressa na Tabela 3.2.
- Barra da subestação sem consumidores conectados; Barras de 2 a 6: usuários do tipo 5; Barras de 7 a 10: usuários do tipo 3; e Barras de 11 a 14: usuários do tipo 6;
- Patamares de carga para cálculo do ECOST da Tabela 3.3;

De posse destes dados, já é possível determinar os índices de confiabilidade. Os valores obtidos para o sistema original e para o sistema com as interconexões obtidas pela

Tabela 3.2 – Função de Danos ao Cliente

Usuário (tipo)	Duração da interrupção e custo (\$/kWp)				
	1 min	20 min	1 hora	4 horas	8 horas
1. Grandes usuários	1,005	1,508	2,225	3,968	8,240
2. Industrial	1,625	3,868	9,085	25,160	55,805
3. Comercial	0,381	2,969	8,552	31,317	83,008
4. Rural	0,060	0,343	0,649	2,064	4,120
5. Residencial	0,001	0,093	0,482	4,914	15,690
6. Governamental/Institucional	0,044	0,369	1,492	6,558	26,040
7. Escritório/Edifício	4,778	9,878	21,065	68,83	119,16

Fonte: Reproduzido de [59].

Tabela 3.3 – Patamares de carga

Percentual do carregamento	Probabilidade
Até 40 %	0,0365
Entre 40% e 50%	0,2263
Entre 50% e 60%	0,2147
Entre 60% e 70%	0,2328
Entre 70% e 80%	0,1651
Entre 80% e 90%	0,1114
Entre 90% e 100%	0,0132

Fonte: Reproduzido de [59].

metodologia estão representados, respectivamente, nas colunas “Análise 1” e “Análises 2 e 4” da Tabela 4.4, que se encontra na seção referente ao primeiro estudo de caso.

Passos 2 a 4: O conjunto de trechos candidatos e seus respectivos grupos são definidos por inspeção, identificados através de combinação entre as barras localizadas nos finais de alimentadores do sistema original. A Tabela 3.4 representa o conjunto destes trechos. É válido ainda destacar que as interconexões originais (3-9, 8-12 e 5-14) são igualmente incluídas como candidatas.

A última coluna corresponde ao grupo de interconexões candidatas, que adota a seguinte convenção:

- Grupo igual a A: trecho candidato entre os alimentadores 2 e 3;
- Grupo igual a B: trecho candidato entre os alimentadores 1 e 2;
- Grupo igual a C: trecho candidato entre os alimentadores 1 e 3.

Tabela 3.4 – Dados das interconexões candidatas para o sistema de 14 barras

Candidato	De	Para	Tipo	r (pu)	x (pu)	Grupo
1	8	12	3	0,04	0,04	A
2	8	14	3	0,04	0,04	A
3	9	12	3	0,04	0,04	A
4	9	14	3	0,04	0,04	A
5	10	12	3	0,04	0,04	A
6	10	14	3	0,04	0,04	A
7	3	9	3	0,04	0,04	B
8	5	9	3	0,04	0,04	B
9	3	10	3	0,04	0,04	B
10	5	10	3	0,04	0,04	B
11	5	14	3	0,09	0,12	C
12	5	12	3	0,09	0,12	C

Fonte: Elaboração própria.

Primeira iteração

Passos 5: Inicializa-se o contador ($i = 1$) e o *loop* do algoritmo com a execução o primeiro FPO. Na primeira iteração, todas as interconexões candidatas devem ser consideradas como seções comuns de alimentador. Com a formulação mostrada na Subsubseção 3.2.1.3 e a *toolbox* de otimização por pontos interiores do MATLAB (*fmincon*), obtém-se os valores multiplicadores de Lagrange conforme a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Multiplicadores de Lagrange na primeira iteração

Barra k	λp_k
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	-3,35
12	-2,88
13	-6,53
14	-5,47

Fonte: Elaboração própria.

Passo 6: Tais valores resultam nos índices ID mostrados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Índices de sensibilidade na primeira iteração

Candidato	Barra k	Barra m	Grupo	ID_{km}
1	8	12	1	2,88
2	8	14	1	5,47
3	9	12	1	2,88
4	9	14	1	5,47
5	10	12	1	2,88
6	10	14	1	5,47
7	3	9	2	0
8	5	9	2	0
9	3	10	2	0
10	5	10	2	0
11	5	14	3	5,47
12	5	12	3	2,88

Fonte: Elaboração própria.

Passo 7: Os trechos de maior índice são os candidatos de números 2, 4, 6 e 11. A pequena diferença nos valores de ID para os candidatos empatados mostra que a sensibilidade deste sistema em relação a atuação das chaves candidatas em questão é baixa.

Passo 8: Como vários trechos obtiveram ID máximo, segue-se para o desempate.

Passo 9: O FPO para desempate é simulado considerando as trechos empatados como interconexões alocadas. Foram obtidos os multiplicadores de Lagrange relacionados ao limite superior das variáveis de chaveamento, como se observa na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – πu_{km} na primeira iteração

Candidato	Barra k	Barra m	Grupo	πu_{km}
2	8	14	1	2,3522
4	9	14	1	7,9552
6	10	14	1	2,7143
11	5	14	3	7,9641

Fonte: Elaboração própria.

Passo 10: O trecho 11 possui maior πu_{km} , sendo, portanto armazenado.

Passo 11: O trecho escolhido é do grupo 3. Assim, todos os candidatos de grupos 1 ou 2 tornam-se membros de um novo conjunto O_1 , ou seja, os candidatos 1 a 10.

Passo 12: Dentre estes, os trechos candidatos 2, 4, 6, 8 e 10 são excluídos, pois uma de suas barras é barra do trecho 11, selecionado anteriormente. Os trechos remanescentes, 1, 3, 5, 7 e 9, formam o conjunto A_1 , representado na Tabela 3.8.

Passo 13: A interconexão candidata de número 11 é considerada alocada e, acompanhada dos trechos de A_1 , se torna elemento de C_2 , definido como o conjunto de candidatos

Tabela 3.8 – Conjunto A_1

Candidato	Barra k	Barra m	Grupo
1	8	12	1
3	9	12	1
5	10	12	1
7	3	9	2
9	3	10	2

Fonte: Elaboração própria.

a serem considerados trechos comuns, ou seja, previamente determinados no próximo FPO. Como $i = 1 < n_g$, sendo $n_g = 3$, o *loop* se reinicia.

Segunda iteração

Passo 5: $i = 2$. Os multiplicadores de Lagrange encontrados com o segundo FPO se encontram na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Multiplicadores de Lagrange na segunda iteração

Barra k	λp_k
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	-3,35
12	-2,88
13	-6,53
14	-5,47

Fonte: Elaboração própria.

Passo 6: Tais valores resultam nos índices ID mostrados na Tabela 3.10.

Passo 7: Os trechos de maior índice são os candidatos de número 1, 3 e 5.

Passo 8: Torna-se necessário o FPO para desempate.

Passo 9: Com o FPO, os valores obtidos para πu_{km} são aqueles mostrados na Tabela 3.11.

Passo 10: O candidato de número 1 detém o maior πu_{km} , sendo, portanto, escolhido e armazenado.

Tabela 3.10 – Índices de sensibilidade na segunda iteração

Candidato	Barra k	Barra m	Grupo	ID_{km}
1	8	12	1	2,88
3	9	12	1	2,88
5	10	12	1	2,88
7	3	9	2	0
9	3	10	2	0

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3.11 – πu_{km} na segunda iteração

Candidato	Barra k	Barra m	Grupo	πu_{km}
1	8	12	1	3,6365
3	9	12	1	3,0964
5	10	12	1	1,6569

Fonte: Elaboração própria.

Passo 11: Como o trecho 1 é do grupo 1, todos os candidatos de grupo 2 tornam-se membros de um novo conjunto O_1 , ou seja, os candidatos 7 e 9.

Passo 12: Dentre esses, nenhum candidato é excluído, pois suas barras diferem das barras do trecho escolhido. Assim, os candidatos 7 e 9 passam a compor o conjunto A_2 , como mostra a Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Conjunto A_2

Candidato	Barra k	Barra m	Grupo
7	3	9	2
9	3	10	2

Fonte: Elaboração própria.

Passo 13: A interconexão candidata de número 1 é considerada alocada e, acompanhada do trecho de A_2 , se torna elemento de C_3 . Como $i = 2 < n_g$, sendo $n_g = 3$, o *loop* se reinicia.

Terceira iteração

Passo 5 e 6: $i = 3$. Os multiplicadores encontrados com o terceiro FPO resultam nos índices mostrados na Tabela 3.13.

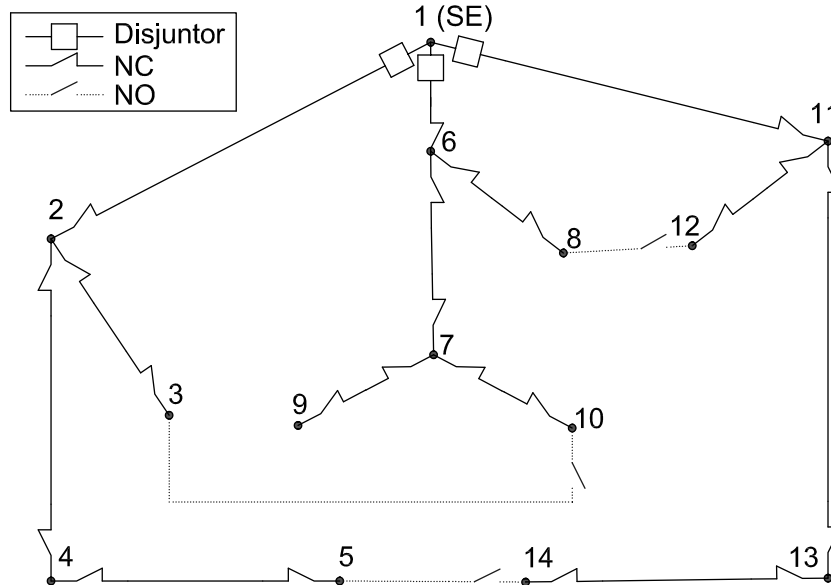
Passo 7: Assim, como o candidato 9 possui maior ID_{km} , é escolhido. Como $i = 3 = n_g$, o *loop* é finalizado, e os trechos alocados são: 11, 1 e 9, correspondendo às interconexões 5-14, 8-12 e 3-10, respectivamente. O diagrama final é mostrado na Figura 3.3.

Tabela 3.13 – Índices de sensibilidade na segunda iteração

Candidato	Barra k	Barra m	Grupo	ID_{km}
7	3	9	2	0,22
9	3	10	2	0,28

Fonte: Elaboração própria.

Figura 3.3 – Sistema 14 barras com interconexões finais



Elaboração própria.

3.3 ETAPA 2: ALOCAÇÃO DE CHAVES SECCIONADORAS

3.3.1 Sistema Imunológico Artificial

Normalmente, o número possível de combinações nos problemas de alocação de equipamentos é tão grande que a análise exaustiva torna-se computacionalmente inviável dependendo do tamanho do sistema. Em tais casos, é comum a utilização de metaheurísticas. Estes, diferente dos métodos clássicos, que são aplicados nas situações de funções contínuas e diferenciáveis, podem lidar com funções objetivo e restrições compostas, discretas e descontínuas, por exemplo. Assim, embora não se possa afirmar categoricamente que um método é melhor que outro, pois ambos possuem suas particularidades, é justificável a utilização de metaheurística para a otimização da alocação de chaves seccionadoras. O SIA foi escolhido por ser facilmente adaptado para problemas de natureza binária.

Há diversas metaheurísticas já desenvolvidas e consolidadas. São normalmente inspiradas em situações que ocorrem na natureza, desde processos de recozimento na metalurgia até comportamentos de animais. O princípio fundamental por trás de qualquer metaheurística é o seguinte: gerar várias soluções factíveis (partículas) e fazer com que

elas se movam na direção do mínimo (ou máximo) da função objetivo. O movimento pode ser caracterizado como busca global ou local. No primeiro, as partículas se movem com estocasticidade, procurando conhecer o espaço de soluções e usar informações que as guiarão na direção da melhor solução. Na busca local, as partículas se movem pelas suas respectivas vizinhanças, segundo alguma lei relacionada ao fenômeno de inspiração. As leis que regem tais comportamentos é o que difere em cada método.

O SIA, particularmente, é inspirado no funcionamento do sistema imunológico [60]. Tem sido utilizado em diversas aplicações, como reconhecimento de padrões, aprendizado de máquinas e, principalmente, otimização [32, 61, 62, 63]. Em [64], há inclusive aplicação deste método em conjunto com lógica *fuzzy* e redes neurais artificiais. Assim, sua versatilidade o coloca em posição de destaque. Para melhor compreender os fenômenos que inspiram o SIA e lhe conferem sua eficiência, é necessário introduzir os fundamentos do funcionamento do sistema imunológico adaptativo, a saber, os conceitos de seleção clonal e maturação de afinidade.

3.3.1.1 *Fundamentação Teórica*

O sistema imunológico é imprescindível para a sobrevivência dos animais vertebrados, pois se responsabiliza pela defesa contra agentes estranhos que atacam o organismo, sejam substâncias tóxicas ou microrganismos parasitas. Tais agentes são chamados antígenos e, para combatê-los, o corpo deve produzir anticorpos apropriados para cada antígeno específico. Percebe-se que tal fenômeno pode ser considerado uma espécie de problema de otimização natural, cujo objetivo é encontrar o anticorpo mais eficiente para o antígeno. Ocorrem, entretanto, complexos processos para atingir tal objetivo. O próprio sistema imunológico pode ser dividido em dois: o inato e o adaptativo.

O primeiro é a resposta rápida do corpo, uma vez detectada a ameaça do antígeno. Este, muitas vezes é impedido pela primeira barreira que encontra, a pele. Em outras situações, é eliminado quando adentra na camada mais interior, cujo pH e temperatura são impróprios para o agente invasor. Ainda assim, muitas vezes sobrevive, e o sistema imune inato com suas diversas células de defesa entra rapidamente em ação, o que nem sempre é efetivo. Torna-se, então, necessária a próxima tentativa: o sistema imune adaptativo. Desta vez, maior esforço é exigido para combater o antígeno. É justamente esta a fase que inspirou a criação do algoritmo SIA. Os processos que a descrevem são:

- Produção de emissores de anticorpos na medula óssea;
- Seleção clonal;
- Hipermutação somática;
- Edição de receptores;

- Seleção negativa.

Os células emissoras de anticorpos, ou linfócitos B, são produzidas na medula óssea de tal forma que parte de seu material genético responsável por reconhecer um tipo de antígeno é aleatória. Trata-se da busca global em um processo de otimização. O reconhecimento do antígeno pelo linfócito B se dá pela afinidade da ligação que, quando acima de um valor limite, promove a ativação da célula B e sua maturação. No algoritmo, esta é a fase de testar cada possível solução com a função objetivo para, em seguida, selecionar aquelas que geram os melhores valores.

As escolhidas são utilizadas para gerar soluções ainda melhores, assim como aqueles linfócitos de alta afinidade são utilizados para a produção de novos, aumentando mais a probabilidade de se alcançar um linfócito ideal. Os processos seleção clonal e hipermutação somática são responsáveis por tal função no sistema imune adaptativo.

Mais especificamente, a seleção clonal é a fase responsável por selecionar as melhores soluções (as células B ativadas) para clonagem. É verdade que cada uma possui um certo grau de afinidade, e é isso que definirá proporcionalmente a quantidade de seus respectivos clones a serem produzidos. A afinidade também orienta a fase de hipermutação somática, na qual variações são introduzidas nos clones, para que explorem localmente o espaço de possíveis soluções. Assim, ambas as fases representam a busca local.

Com a edição de receptores, as soluções sofrem variações, o que a caracteriza como processo de busca global. Ocorre a uma taxa reduzida mas possui extrema importância, pois serve para evitar a estagnação do processo de otimização com a convergência prematura em pontos ótimos locais.

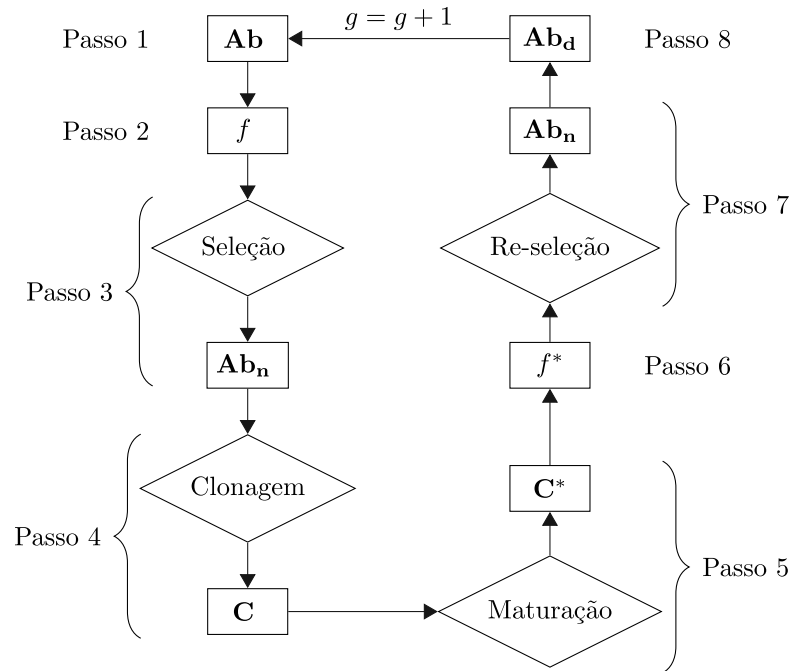
Tanto a busca local quanto a global podem acabar fazendo com que as candidatas caiam fora do espaço de soluções possíveis, limitado pelas restrições do problema de otimização. No sistema imune, isso ocorre quando as células de defesa atacam o próprio corpo ao invés de atacar o antígeno. Neste caso, tais células de defesa (ou soluções candidatas) precisam ser eliminadas. É o que ocorre na fase de seleção negativa.

3.3.1.2 *Algoritmo de Seleção Clonal*

Os fundamentos básicos do sistema imune adaptativo já abordados permitem a compreensão do algoritmo de seleção clonal da Figura 3.4, proposto em [22]. As etapas do fluxograma serão descritas na sequência.

Passo 1: Inicialmente, quando o contador $g = 1$, são geradas todas as soluções candidatas aleatoriamente e armazenadas na matriz \mathbf{Ab} de dimensão $N_{Ab} \times L$, onde N_{Ab} é o número de anticorpos predefinido e L é a dimensão do problema, a saber, a quantidade de posições candidatas à alocação de chaves seccionadoras (n_{NC}). Esta fase representa a produção de anticorpos na medula óssea.

Figura 3.4 – Fluxograma do algoritmo de seleção clonal



Fonte: Reproduzido de [59].

Passo 2: Mede-se a afinidade de cada solução candidata através da função objetivo f a ser minimizada. Tratando-se de um processo de minimização, quanto menor o valor de f , maior é a afinidade, o que caracteriza esta relação de proporcionalidade inversa.

Passo 3: Segundo a afinidade de cada anticorpo, os n melhores são selecionados para formar a matriz \mathbf{Ab}_n . Esta fase é o início do processo de seleção clonal, que é completado na próxima etapa.

Passo 4: As soluções de \mathbf{Ab}_n são clonadas e formam a matriz de clones \mathbf{C} . A quantidade de clones de cada anticorpo depende da afinidade do mesmo em comparação com as demais, sendo determinada pela Equação 3.46 [65].

$$N_c(i) = \text{round}(\beta \cdot f_i^*) \quad (3.46)$$

em que $N_c(i)$ é o número de clones do anticorpo i ; “round” representa o arredondamento para o número inteiro mais próximo; β é o parâmetro que controla o processo de clonagem; e f_i^* é a afinidade normalizada do anticorpo i , dada pela Equação 3.47 [65].

$$f_i^* = \frac{1}{1 + e^{-\frac{f_i - f_m}{\delta^*}}} \quad (3.47)$$

em que δ^* e f_m são, respectivamente, o desvio padrão e a média das afinidades de \mathbf{Ab}_n .

Passo 5: \mathbf{C} se transforma em \mathbf{C}^* através da hipermutação somática. Este processo ocorre em cada clone probabilisticamente conforme a sua afinidade, que é a mesma do

anticorpo do qual foi originado ($f_{ic}^* = f_i^*$). Como mostra a Equação 3.48, quanto maior a f_{ic}^* , menor é a probabilidade de mutação p_{ic} .

$$p_{ic} = e^{-h \cdot f_i^*} \quad (3.48)$$

onde h é o parâmetro que controla a hipermutação somática através do amortecimento da função exponencial. Este fator é um detalhe bastante significativo. Novamente, há uma relação de proporcionalidade inversa: quanto maior é este parâmetro, menor é a probabilidade de mutação, para mesma f_i^* .

Controlar h ao longo da otimização significa em controlar a intensidade da exploração do espaço de soluções, e isso pode ser feito de forma a evitar convergência prematura do algoritmo. Esta a proposta de [22]: através da diminuição de h ($h = h_2 < h_1$, onde h_1 é o valor inicial de h), promover alta mutação quando o processo de busca está estagnado. A estagnação pode ser detectada se a melhor solução não se altera após certo número de gerações g^* , ou se a diversidade de \mathbf{Ab} , dada pela Equação 3.49, é inferior a um limite determinado.

$$div = \frac{N_{Ab} - dist}{N_{Ab}} \quad (3.49)$$

em que o numerador corresponde a quantidade de anticorpos não repetidos em \mathbf{Ab} .

Conforme visto, a mutação é um processo probabilístico. Cada clone possui a sua probabilidade de sofrer mutação, determinada conforme a Equação 3.48. Basta sortear um número aleatório entre 0 e 1 e compará-lo com o valor da probabilidade encontrada: se o número aleatório for menor, o clone sofre mutação. Do contrário, permanece o mesmo.

Passo 6: Mede-se a afinidade de cada solução de \mathbf{C}^* .

Passo 7: As “ n ” piores soluções de \mathbf{Ab} são substituídas por \mathbf{Ab}_n , matriz que representa as “ n ” melhores de \mathbf{Ab} .

Passo 8: Trata-se do processo de edição de receptores. Para aumentar a exploração global do espaço de soluções, “ d ” novas soluções são geradas aleatoriamente e armazenadas na matriz \mathbf{Ab}_d .

Finaliza-se a iteração do algoritmo com os testes de convergência: se o número máximo de iterações g_{max} for atingido ou se a melhor solução de \mathbf{Ab} permanecer inalterada após g_{est} iterações. Alcançada uma destas condições, finaliza-se o algoritmo. Caso contrário, nova iteração é iniciada ($g = g + 1$).

3.3.2 Formulação para o Problema da Etapa 2

Conforme visto na revisão bibliográfica, o problema de alocação de equipamentos costuma ser de natureza combinatória. A modelagem detalhada nesta seção expressa tal característica ao tratar as variáveis como binárias. Outro fator a ser considerado é que,

assumindo a radialidade dos sistemas de distribuição, o algoritmo proposto para cálculo dos índices de confiabilidade é fundamental, todavia precisa ser adaptado para sua inclusão na função objetivo de forma eficiente, evitando esforços computacionais desnecessários. Para isso, tão importante quanto as variáveis a serem otimizadas, são os parâmetros fornecidos como constantes para o problema, isto é, que não sofrem modificações ao longo do processo de otimização. Mais especificamente, algumas matrizes auxiliares da metodologia de cálculo de índices de confiabilidade podem ser calculadas uma única vez. Isto está diretamente relacionado com a formulação do problema.

O primeiro passo para a construção das matrizes auxiliares (após a entrada de dados com a matriz de topologia e equipamentos \mathbf{M}) é a remodelagem do grafo. Nesta etapa, cada trecho de alimentador do sistema é dividido em três seções. A seção intermediária representa o condutor, isto é, o próprio trecho do alimentador em questão. As seções nas extremidades, por sua vez, são aquelas onde chaves seccionadoras podem ser alocadas. Tal procedimento ocorre para todos os trechos do grafo original e resulta em um grafo remodelado através da construção da matriz auxiliar \mathbf{MM} e da nova \mathbf{M} . Naturalmente, as linhas desta matriz correspondentes às possíveis posições de seccionadoras precisam ser armazenadas em um vetor auxiliar e fornecidos à função objetivo, pois é utilizado como referência para determinar a posição exata a qual uma variável dentro o vetor de variáveis \mathbf{X}_A representa, e se corresponde a chave alocada nesta posição ou não (valor lógico 1 ou 0, respectivamente).

Assim, \mathbf{M} , \mathbf{MM} e o vetor auxiliar de posições são parâmetros de entrada da função objetivo. O mesmo acontece com outras quatro matrizes auxiliares divididas em dois grupos. O primeiro grupo diz respeito àquelas que se referem aos nós à montante (\mathbf{Ca}) e à jusante (\mathbf{Du}). Independente das posições das chaves (ou de qualquer outro elemento entre dois nós em qualquer grafo), estas matrizes dependem apenas da topologia do grafo em termos de nó. O mesmo ocorre com o segundo grupo de matrizes auxiliares, que dizem respeito aos índices dos elementos à jusante (\mathbf{LEj}) ou à montante dos nós (\mathbf{LEm}). Tais matrizes são obtidas através de algoritmo recursivo de busca em grafos, e são utilizadas apenas para determinar \mathbf{Em} e \mathbf{Ej} dentro da função objetivo. Ainda que \mathbf{Em} e \mathbf{Ej} possam ser determinadas diretamente com o mesmo procedimento, a recursividade do algoritmo precisaria ser aplicada cada vez que nova possível solução fosse gerada. Tal esforço computacional é evitado construindo uma única vez as matrizes \mathbf{LEm} e \mathbf{LEj} , que são acessadas para construir \mathbf{Em} e \mathbf{Ej} ao longo das iterações. As demais matrizes auxiliares e o algoritmo de cálculo de FIC e DIC seguem dentro da própria função objetivo.

Complementando o tratamento das variáveis de chaves seccionadoras, há de se considerar variáveis para alocação de trechos de interconexão através da otimização metaheurística. Embora não faça parte da metodologia proposta, tal abordagem tem seu valor nesta dissertação para fins de comparação em relação a metodologia híbrida. O vetor relacionado às interconexões é concatenado ao vetor de chaves seccionadoras e compõe o

vetor de todas as variáveis a serem otimizadas. Novamente, faz-se necessário o uso de uma matriz auxiliar, que contém os índices de linha de \mathbf{MM} que se referem às interconexões candidatas (as mesmas do algoritmo heurístico construtivo) e seus grupos respectivos. Com este auxiliar, a alocação ou não de interconexão em certo trecho candidato é determinada segundo o valor de seu correspondente no vetor de variáveis \mathbf{X}_B (valor lógico 1 para alocação ou 0, caso contrário).

3.3.2.1 Modelo Completo

O modelo completo pode ser descrito de acordo com as equações abaixo. Objetiva-se encontrar as chaves seccionadoras que minimizem o índice de confiabilidade ENS, isto é, energia não suprida, como mostra a Equação 3.50. A restrição da Equação 3.51 representa a natureza binária do vetor de variáveis. A Equação 3.52 representa a quantidade máxima de chaves seccionadoras que devem ser alocadas, onde $\mathbf{J}_{1 \times n_{NC}}$ é um vetor unitário de dimensão $n_{nc} \times 1$. Finalmente, a Equação 3.53, diz respeito aos valores mínimos e máximos admissíveis para cada índice de confiabilidade.

$$\text{Min } ENS = \sum_{j=1}^{n_j} U_{LPj} L_{LPj} \quad (3.50)$$

s.a.

$$x_a \in \mathbf{X}_A, \quad x_a \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, n_{NC} \quad (3.51)$$

$$\mathbf{J}_{1 \times n_{NC}} \cdot \mathbf{X}_A^T = n_{NC} \quad (3.52)$$

$$\underline{IND}(\mathbf{X}) \leq IND(\mathbf{X}) \leq \overline{IND}(\mathbf{X}) \quad (3.53)$$

3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

A metodologia desenvolvida consiste em duas partes. A primeira se baseia em multiplicadores de Lagrange resultantes do FPO de máximo carregamento. Após a etapa de modelagem adequada da rede, de suas linhas de transmissão, mais especificamente, tanto em termos de fluxo de carga quanto de confiabilidade, o problema de otimização é formulado. A resolução ocorre via MPI e fornece as variáveis duais para o cálculo do índice de sensibilidade. Os valores encontrados quantificam sensivelmente a potencial transferência de potência do trecho de interconexão, possibilitando a determinação dos melhores, que podem ser melhor aproveitadas para reconfiguração e melhorar a confiabilidade.

Uma vez determinadas as interconexões, dá-se início a outra etapa da metodologia, que consiste na determinação das posições de chaves seccionadoras. Para tal, é proposto um problema de otimização binária, cuja formulação busca minimizar a energia esperada não suprida. O método de resolução proposto é inspirado no funcionamento do sistema imune adaptativo dos seres vertebrados. Como resultado de sua aplicação, obtém-se a localização das chaves seccionadoras a serem alocadas.

4 ESTUDOS DE CASO

4.1 INTRODUÇÃO

No capítulo anterior, a metodologia proposta foi apresentada e aplicada didaticamente. Neste capítulo, serão apresentados estudos de caso de quatro sistemas em ordem crescente de número de barras, começando pelo sistema tutorial já utilizado e terminando com um sistema real de 476 barras.

Para a aplicação da segunda etapa do algoritmo, foi estabelecido n_{NC} igual a cerca de 19,74% do número de trechos fechados do sistema. Este valor foi obtido de um sistema real de médio porte com 476 barras encontrado em [66].

Os parâmetros do algoritmo SIA, suas funções e valores mostrados na Tabela 4.1 são comuns a todas as simulações e foram obtidos após testes heurísticos, tomando [59] como referência.

Tabela 4.1 – Parâmetros do SIA

Parâmetro	Função	Valor
1. N_{Ab}	Número de anticorpos/células produtoras	100
2. n_{ger}	Número máximo de gerações para convergência	150
3. $gest$	Máximo de gerações estagnadas para convergência	6
4. β	Controla o processo de clonagem	0,5
5. n	Número de melhores soluções para clonagem	$0,06 \times N_{Ab}$
6. d	Número de piores soluções para substituição	$0,06 \times N_{Ab}$
7. $gsteric$	Máximo de gerações estagnadas para troca de h	5
8. div_{max}	Diversidade máxima até a troca de h	50%
9. h_1	Controla a mutação quando não há estagnação	1
10. h_2	Controla a mutação quando há estagnação	0,5

Fonte: Elaboração própria.

As análises descritas ao longo dos estudos de caso permitem avaliar o desempenho do método proposto para alocação de interconexões em diferentes sistemas de distribuição. Objetiva-se, igualmente neste capítulo, perceber os pontos fortes da metodologia além daqueles que precisam ser melhorados.

4.2 SISTEMA 14 BARRAS

Os dados do primeiro sistema já mostrados nesta dissertação foram retirados de [58]. Outros dados necessários para o estudo são referentes às interconexões candidatas e de confiabilidade, já mostrados nesta dissertação na seção de aplicação tutorial da metodologia.

Este estudo de caso será analisado de 5 maneiras:

- A primeira análise considera chaves seccionadoras em todas as posições e interconexões originais (Análise 1).
- A segunda análise considera chaves seccionadoras em todas as posições e interconexões otimizadas de acordo com a metodologia (Análise 2).
- A terceira análise considera chaves seccionadoras em todas as posições e otimiza interconexões com a metaheurística (Análise 3).
- A quarta análise consiste no uso das interconexões originais e seccionadoras determinadas via SIA (Análise 4).
- A última análise consiste no uso das interconexões otimizadas e seccionadoras determinadas via SIA (Análise 5).

Nas três primeiras análises, todas as chaves seccionadoras foram consideradas, isto é, posicionadas em ambas as extremidades dos trechos de alimentador, com exceção dos trechos que saem da subestação, cuja extremidade do lado da barra “De” possui disjuntor e na barra “Para” chave seccionadora.

4.2.1 Chaves

As interconexões originais e encontradas, tanto pelo AHCP quanto pelo SIA, se encontram na Tabela 4.2. As candidatas podem ser conferidas na Tabela 3.4.

Tabela 4.2 – Interconexões do Estudo de Caso 1

Originais		Encontradas	
“De”	“Para”	“De”	“Para”
3	9	3	10
8	12	9	12
5	14	5	14

Fonte: Elaboração própria.

Quanto à alocação de chaves seccionadoras, com $n_{NC} = 3$, as posições obtidas pelo SIA estão representadas na Tabela 4.3. As colunas “Extremidade” mostram em qual lado do trecho a chave se encontra: (D) se estiver conectada à barra “De”, ou (P) se estiver conectada à barra “Para”.

4.2.2 Índices

Os índices de confiabilidade obtidos estão mostrados na Tabela 4.4.

Conclui-se que, para este sistema, a metodologia encontrou interconexões melhores que as originais, tanto para chaves seccionadoras em todas as posições quanto para n_{NC} chaves seccionadoras que minimizam o índice ENS.

Tabela 4.3 – Chaves seccionadoras do Estudo de Caso 1

Para interconexões originais			Para interconexões encontradas		
De	Para	Extremidade	De	Para	Extremidade
1	6	(P)	6	8	(D)
6	7	(P)	6	7	(P)
11	13	(D)	11	13	(P)

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4.4 – Índices do Estudo de Caso 1

Descrição	Análise 1	Análises 2 e 3	Análise 4	Análise 5
	Int. originais	Int. ótimas	Int. originais	Int. ótimas
	Todas secc.	Todas secc.	Secc. ótimas	Secc. ótimas
FEC [int./cons-ano]	0,22631	0,22631	0,22631	0,22631
DEC [h/cons-ano]	0,25767	0,23328	0,76638	0,74477
CAIDI [h/f]	1,13857	1,03079	3,38645	3,29099
ASUI	2,94E-05	2,66E-05	8,75E-05	0,000085
ASAI	0,999971	0,999973	0,999913	0,999915
ENS [MWh/ano]	4,8807	4,4187	14,5167	14,1075
AENS [MWh/cons-ano]	0,00085	0,00077	2,52904	2,45775
ECOST [K\$/ano]	28,36842	24,21482	58,35378	57,44689

Fonte: Elaboração própria.

4.3 SISTEMA 94 BARRAS

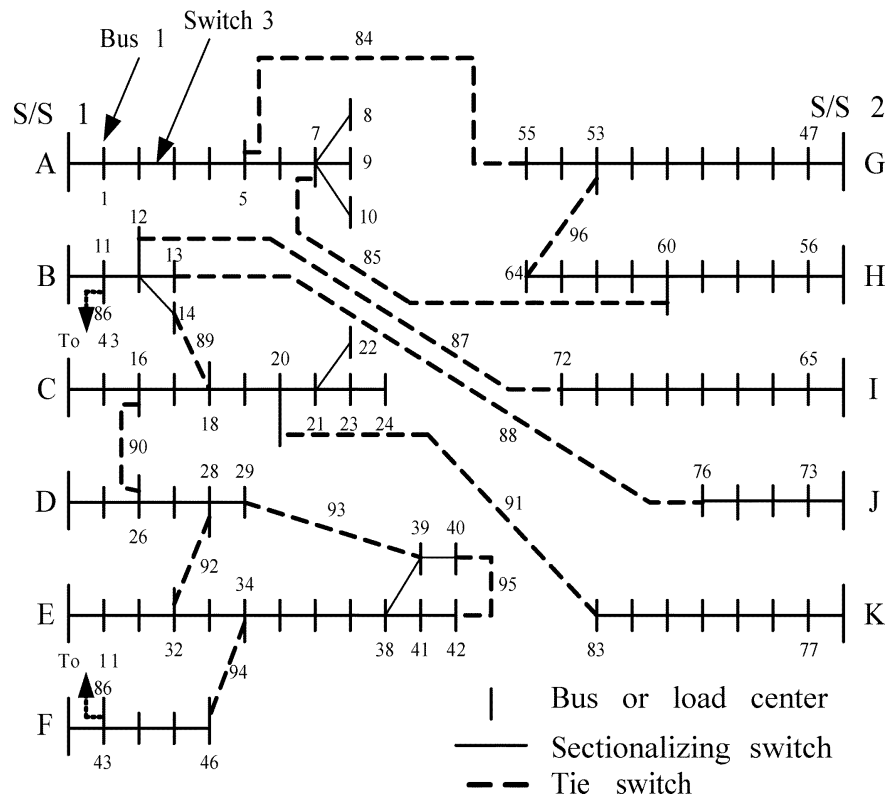
Os dados do sistema de distribuição de 94 barras da Taiwan Power Corporation podem ser encontrados em [67]. A Figura 4.1 mostra o diagrama deste sistema, que possui carga total de 28.350,0 kW e 20.700,0 kVAr, consistindo de 11 alimentadores de 11,4 kV, duas subestações e 96 linhas. As linhas tracejadas correspondem às 13 chaves de interconexão originalmente alocadas.

Para as interconexões candidatas, procurou-se fazer combinações entre as barras das interconexões originais além de outras que se encontram nos terminais dos alimentadores. As barras “De” são: 5, 8, 9, 10 (grupo 1), 7 (grupo 2), 11 (grupo 3), 12 (grupo 4), 13 (grupo 5), 14 (grupo 6), 16 (grupo 7), 20, 22, 24, (grupo 8), 28 (grupo 9), 29 (grupo 10), 34 (grupo 11), 40 (grupo 12) e 53 (grupo 13). As barras “Para” são: 55, 60, 43, 72, 76, 18, 26, 83, 32, 39, 46, 42 e 64. Tem-se, ao todo, 234 combinações e 13 grupos, que podem ser conferidas na Tabela A.1 encontrada no Apêndice A.

Aplicando a regra dos 19,74% dos trechos fechados como o número de chaves seccionadoras admitidas, sendo 81 a quantidade destes trechos, busca-se alocar 16 chaves seccionadoras.

Assume-se os consumidores conectados nas barras de 1 a 46 como do tipo industrial, e os demais como grandes usuários.

Figura 4.1 – Sistema de 94 barras



Fonte: Retirado de [67].

Quatro análises são realizadas:

- A primeira análise considera chaves seccionadoras em todas as posições e interconexões originais (Análise 1).
- A segunda análise considera chaves seccionadoras em todas as posições e interconexões otimizadas de acordo com a metodologia (Análise 2).
- A terceira análise consiste no uso das interconexões originais e seccionadoras determinadas via SIA (Análise 3).
- A última análise consiste no uso das interconexões otimizadas e seccionadoras determinadas via SIA (Análise 4).

4.3.1 Chaves

As interconexões originais e obtidas com o AHCP estão contidas na Tabela 4.5.

Já a Tabela 4.6 mostra as chaves seccionadoras obtidas pelo SIA.

Tabela 4.5 – Interconexões do Estudo de Caso 2

Originais		Encontradas	
“De”	“Para”	“De”	“Para”
5	55	22	18
7	60	16	60
11	43	40	83
12	72	5	46
13	76	29	42
14	18	9	76
16	26	13	72
20	83	11	39
28	32	53	26
29	39	28	55
34	46	14	64
40	42	12	43
53	64	34	32

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4.6 – Chaves seccionadoras do Estudo de Caso 2

Para interconexões originais			Para interconexões otimizadas		
“De”	“Para”	Extremidade	“De”	“Para”	Extremidade
21	22	(D)	6	7	(D)
53	54	(D)	17	18	(D)
60	61	(D)	26	27	(D)
80	81	(D)	30	31	(D)
84	2	(P)	33	34	(D)
6	7	(P)	34	35	(D)
7	8	(P)	61	62	(D)
12	13	(P)	69	70	(D)
19	20	(P)	79	80	(D)
84	30	(P)	82	83	(D)
32	33	(P)	18	19	(P)
50	51	(P)	27	28	(P)
51	52	(P)	44	45	(P)
57	58	(P)	47	48	(P)
70	71	(P)	53	54	(P)
74	75	(P)	84	73	(P)

Fonte: Elaboração própria.

4.3.2 Índices

Com as interconexões originais e otimizadas, respectivamente, simulou-se o sistema para as quatro situações descritas. Os índices obtidos encontram-se na Tabela 4.7.

A metodologia novamente encontrou interconexões que proporcionam melhores

índices de confiabilidade quando se considera chaves seccionadoras em todas as posições (Análise 2) e nas posições que minimizam o ENS (Análise 4).

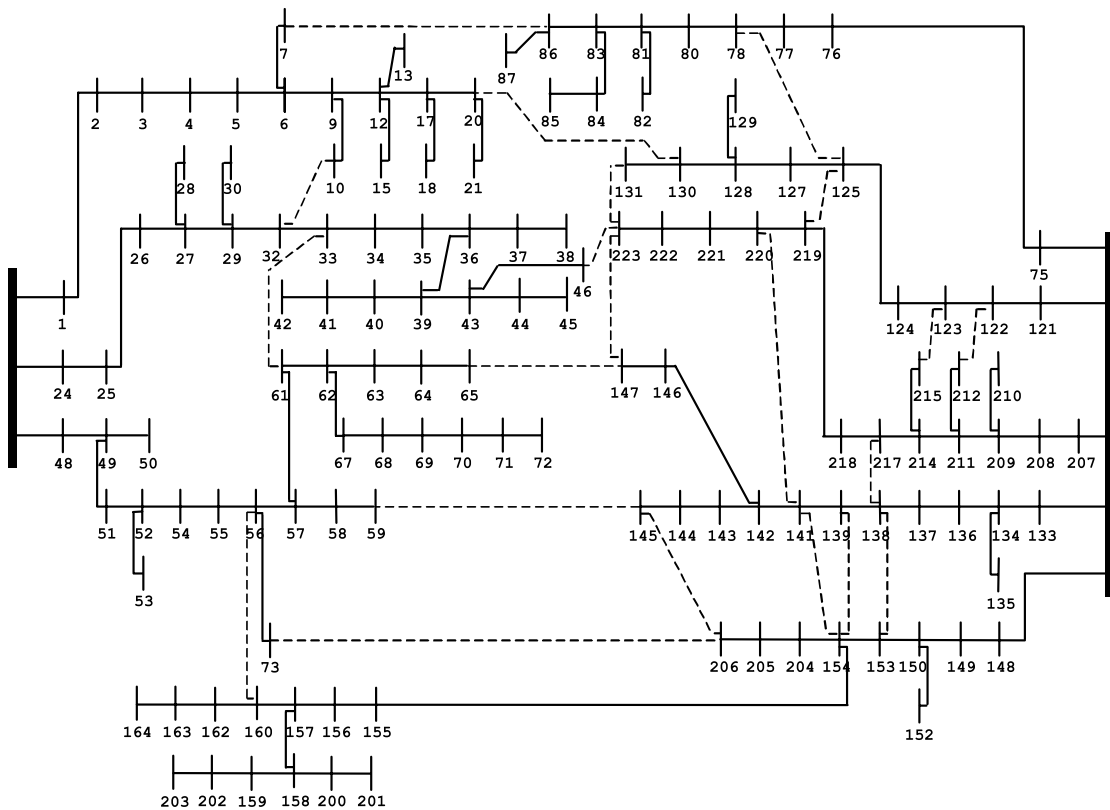
Tabela 4.7 – Índices do Estudo de Caso 2

Descrição	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4
	Int. originais	Int. ótimas	Int. originais	Int. ótimas
	Todas secc.	Todas secc.	Secc. ótimas	Secc. ótimas
FEC [int./cons-ano]	0,40774	0,40774	0,40324	0,40324
DEC [h/cons-ano]	0,41938	0,41303	1,13722	1,1328
CAIDI [h/f]	1,02855	1,01298	2,82023	2,80927
ASUI	4,79E-05	4,71E-05	0,00013	0,000129
ASAI	0,999952	0,999953	0,99987	0,999871
ENS [MWh/ano]	7,84707	7,72827	23,07987	22,99011
AENS [MWh/cons-ano]	0,00138	0,00136	3,75282	3,73823
ECOST [K\$/ano]	50,63211	49,92166	123,2643	113,3953

Fonte: Elaboração própria.

4.4 SISTEMA 135 BARRAS

Figura 4.2 – Sistema de 135 barras



Fonte: Retirado de [68].

O sistema de 135 barras encontrado em [68] possui a topologia expressa na Figura 4.2. Trata-se de uma rede de 13,8 kV, com carga total de 18.313,8 kW e 7.932,5 kVAr. Este sistema consiste de duas SE e 156 linhas, incluindo 21 chaves de interconexão (NA). No diagrama da Figura 4.2, as interconexões são representadas pelas linhas tracejadas. Assume-se os consumidores conectados nas barras de 1 a 45 e a partir da 91 como do tipo industrial, e os demais como grandes usuários.

Para determinação das interconexões candidatas, procurou-se utilizar estratégia parecida com a do estudo de caso anterior: fazer combinações entre as barras das interconexões originais além de outras próximas ou que se encontram nos terminais dos alimentadores. A Tabela A.2 no Apêndice A mostra quais são as candidatas consideradas.

As mesmas análises do estudo de caso anterior são realizadas para o sistema de 135 barras, a saber:

- A primeira análise considera chaves seccionadoras em todas as posições e interconexões originais (Análise 1).
- A segunda análise considera chaves seccionadoras em todas as posições e interconexões otimizadas de acordo com a metodologia (Análise 2).
- A terceira análise consiste no uso das interconexões originais e seccionadoras determinadas via SIA (Análise 3).
- A última análise consiste no uso das interconexões otimizadas e seccionadoras determinadas via SIA (Análise 4).

4.4.1 Chaves

As interconexões originais e obtidas com o AHCP estão contidas na Tabela 4.8. É de se observar que a metodologia proposta encontra menos interconexões do que a topologia original. Isto acontece porque há grupos com poucas interconexões candidatas, de modo que são eliminadas por conterem barras já escolhidas.

Tabela 4.8 – Interconexões do Estudo de Caso 3

Originais		Encontradas	
“De”	“Para”	“De”	“Para”
7	86	212	121
10	32	215	123
20	130	82	124
46	223	42	72
33	61	141	207
59	145	15	86

65	147	136	153
73	206	145	205
78	125	65	147
125	219	162	55
131	223	223	144
139	154	137	214
138	217	59	155
138	153	6	130
141	154	139	206
141	220	143	220
145	206	125	218
160	56	131	219
212	122	18	45
215	123		
223	147		

Fonte: Elaboração própria.

Quanto às chaves seccionadoras encontradas pelo SIA, podem ser vistas na Tabela 4.9

Tabela 4.9 – Chaves seccionadoras do Estudo de Caso 3

Para interconexões originais			Para interconexões otimizadas		
“De”	“Para”	Extremidade	“De”	“Para”	Extremidade
2	3	(D)	7	9	(D)
9	10	(D)	21	22	(D)
14	16	(D)	37	38	(D)
52	53	(D)	47	48	(D)
53	54	(D)	58	59	(D)
67	68	(D)	69	71	(D)
71	72	(D)	71	72	(D)
84	85	(D)	81	82	(D)
87	89	(D)	87	89	(D)
93	94	(D)	92	93	(D)
101	102	(D)	102	104	(D)
107	108	(D)	109	110	(D)
109	110	(D)	108	111	(D)
124	126	(D)	119	120	(D)
3	4	(P)	20	21	(P)
7	9	(P)	21	23	(P)

9	11	(P)	28	29	(P)
11	14	(P)	29	30	(P)
20	21	(P)	82	84	(P)
29	32	(P)	84	85	(P)
32	33	(P)	96	97	(P)
47	48	(P)	101	102	(P)
58	59	(P)	102	103	(P)
76	77	(P)	106	107	(P)
107	108	(P)	126	128	(P)
123	124	(P)	128	129	(P)
130	131	(P)	133	134	(P)

Fonte: Elaboração própria.

4.4.2 Índices

Com as interconexões originais e otimizadas, respectivamente, simulou-se o sistema para as quatro situações descritas. Os índices obtidos encontram-se na Tabela 4.10.

A metodologia novamente encontrou interconexões que proporcionam melhores índices de confiabilidade quando se considera chaves seccionadoras em todas as posições (Análise 2) e nas posições que minimizam o ENS (Análise 4).

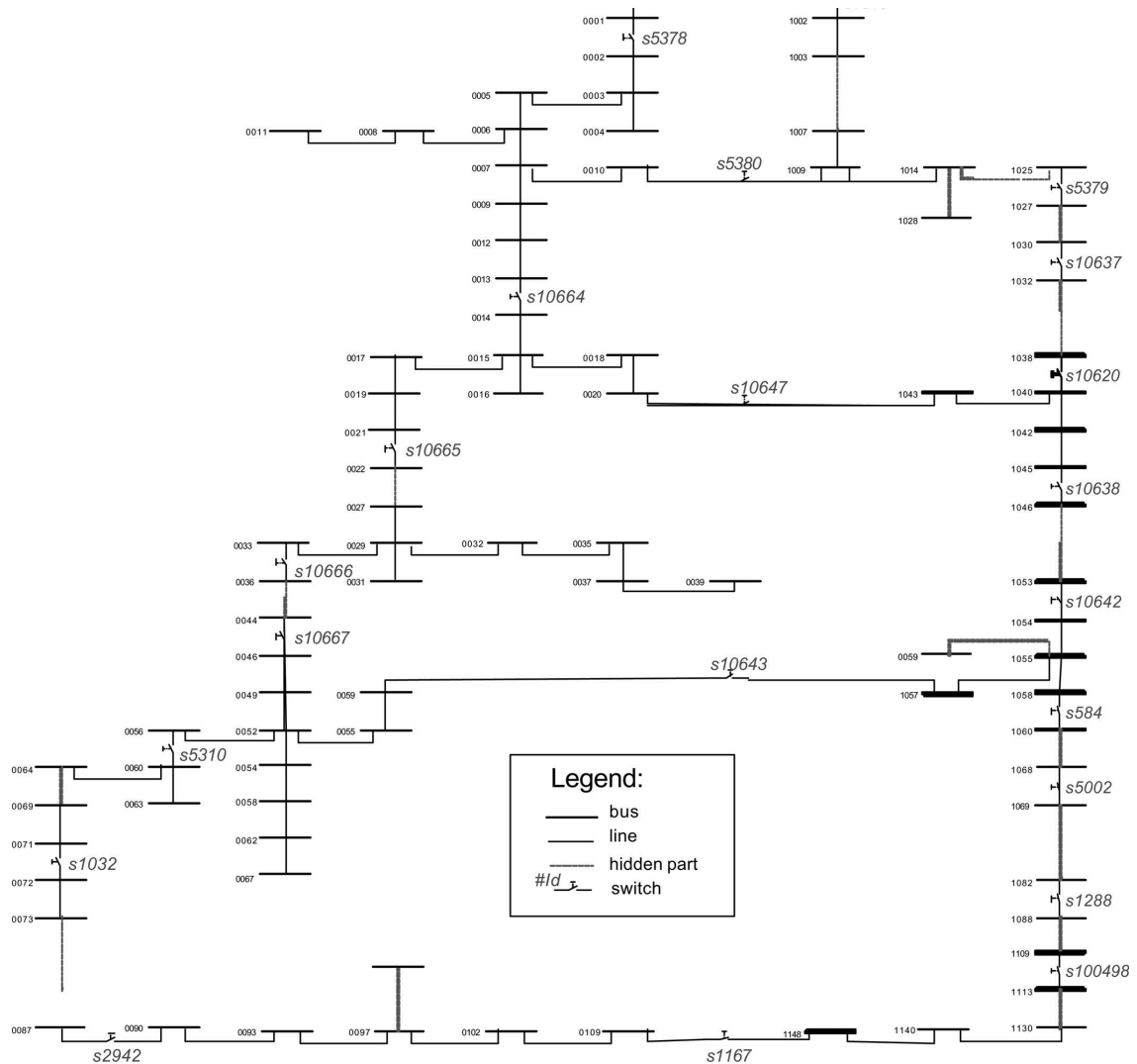
Tabela 4.10 – Índices do Estudo de Caso 3

Descrição	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4
	Int. originais	Int. ótimas	Int. originais	Int. ótimas
	Todas secc.	Todas secc.	Secc. ótimas	Secc. ótimas
FEC [int./cons-ano]	0,87673	0,87673	0,87673	0,87673
DEC [h/cons-ano]	0,9699	0,93258	2,26275	2,24581
CAIDI [h/f]	1,10627	1,0637	2,58088	2,56156
ASUI	0,000111	0,000107	0,000258	0,000256
ASAI	0,999889	0,999894	0,999742	0,999744
ENS [MWh/ano]	11,7309	11,27661	27,36639	27,14599
AENS [MWh/cons-ano]	0,00321	0,00308	0,007477	0,007417
ECOST [K\$/ano]	73,73474	72,1966	137,4705	134,9258

Fonte: Elaboração própria.

4.5 SISTEMA 476 BARRAS

Figura 4.3 – Sistema de 476 barras



Fonte: Retirado de [66].

A fim de avaliar a metodologia desta dissertação em um sistema real de médio porte, testou-se um sistema de 476 barras encontrado em [66]. Na Figura 4.3 representa-se uma parte deste sistema, que contém as interconexões originais. Com 475 trechos fechados, busca-se alocar 94 chaves seccionadoras.

Dividindo as barras deste sistema em quatro partes de acordo com a numeração das mesmas, assume-se quatro grupos de consumidores dos tipos residencial, comercial, escritórios e grandes usuários, respectivamente.

Para as interconexões candidatas, procurou-se fazer combinações entre as barras das interconexões originais além de outras que se encontram nos terminais dos alimentadores. Tem-se, ao todo, 72 combinações e 4 grupos, divididos de acordo com as barras “De”, conforme entre parênteses a seguir. As barras “De” são: 10, 1043, 1057 (grupo 1), 20

(grupo 2), 59 (grupo 3), 109 e 1148 (grupo 4). As barras “Para” são: 1009, 1043, 1057, 1148, 20, 32, 39, 67, 73, 87, 90 e 109. As interconexões candidatas podem ser vistas na Tabela A.3 encontrada no Apêndice A.

Para o estudo de caso deste sistema são propostas duas análises:

- A primeira análise considera chaves seccionadoras em todas as posições e interconexões originais (Análise 1).
- A segunda análise considera chaves seccionadoras em todas as posições e interconexões otimizadas de acordo com a metodologia (Análise 2).
- A última análise consiste no uso das interconexões otimizadas e seccionadoras determinadas via SIA (Análise 3).

4.5.1 Chaves

O AHCP encontrou as mesmas barras de interconexões nas análises 1 e 2, alterando somente o par de cada uma. Isto pode observado Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Interconexões do Estudo de Caso 4

Originais		Encontradas	
“De”	“Para”	“De”	“Para”
59	1057	10	1057
10	1009	20	1043
109	1148	59	1009
20	1043	109	1148

Fonte: Elaboração própria.

As chaves seccionadoras encontradas via SIA são expressas na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Chaves seccionadoras do Estudo de Caso 4

“De”	“Para”	Extremidade
3	4	(D)
15	17	(D)
23	26	(D)
29	32	(D)
38	40	(D)
45	47	(D)
52	54	(D)
62	67	(D)
71	72	(D)
97	102	(D)

122	127	(D)
123	128	(D)
127	132	(D)
142	148	(D)
146	152	(D)
151	159	(D)
156	161	(D)
177	181	(D)
178	182	(D)
189	196	(D)
208	216	(D)
209	217	(D)
210	218	(D)
220	224	(D)
228	232	(D)
235	238	(D)
239	243	(D)
240	244	(D)
1005	1007	(D)
1008	1011	(D)
1029	1030	(D)
1053	1054	(D)
1055	1057	(D)
1063	1064	(D)
1076	1080	(D)
1077	1083	(D)
1080	1086	(D)
1100	1105	(D)
1107	1112	(D)
1112	1116	(D)
1079	1127	(D)
1070	1128	(D)
1121	1129	(D)
1136	1144	(D)
1140	1148	(D)
1150	1158	(D)
1182	1185	(D)

1183	1188	(D)
1185	1190	(D)
1207	1213	(D)
17	19	(P)
18	20	(P)
23	25	(P)
40	43	(P)
41	44	(P)
46	49	(P)
58	62	(P)
74	75	(P)
80	86	(P)
93	97	(P)
102	109	(P)
107	115	(P)
112	119	(P)
129	136	(P)
137	142	(P)
170	173	(P)
176	180	(P)
181	186	(P)
188	194	(P)
188	195	(P)
195	203	(P)
215	219	(P)
218	222	(P)
231	235	(P)
235	239	(P)
1000	1001	(P)
1001	1002	(P)
1012	1017	(P)
1036	1037	(P)
1039	1041	(P)
1040	1043	(P)
1045	1046	(P)
1064	1066	(P)
1089	1094	(P)

1096	1101	(P)
1098	1103	(P)
1121	1129	(P)
1123	1132	(P)
1124	1133	(P)
1127	1136	(P)
1150	1159	(P)
1182	1185	(P)
1185	1191	(P)
1202	1208	(P)

Fonte: Elaboração própria.

4.5.2 Índices

Os índices de confiabilidade obtidos podem ser vistos na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Índices para Estudo de Caso 4

Descrição	Análise 1	Análise 2	Análise 3
	Int. originais	Int. ótimas	Int. originais/ótimas
	Todas secc.	Todas secc.	Secc. ótimas
FEC [int./cons-ano]	12,57144	12,57144	12,57144
DEC [h/cons-ano]	13,52244	13,52244	19,38112
CAIDI [h/f]	1,07565	1,07565	1,54168
ASUI	0,001544	0,001544	0,002213
ASAI	0,998456	0,998456	0,997788
ENS [MWh/ano]	80,41161	80,41161	115,2505
AENS [MWh/cons-ano]	0,04462	0,04462	0,06396
ECOST [K\$/ano]	293,5124	293,5124	495,5974

Fonte: Elaboração própria.

Apesar de não ter sido percebida qualquer diferença entre os índices de confiabilidade entre as análises 1 e 2, o que ocorre devido à própria modelagem do sistema para cálculo de DIC e FIC, com isto comprova-se a eficiência da metodologia. O sistema de 476 barras é um sistema real e passou por estudo prévio para se determinar as interconexões originais. A metodologia proposta encontrou as mesmas barras, diferindo apenas em qual barra cada uma se conecta através de um trecho de interconexão.

O fato de o AHCP ter escolhido as mesmas barras originais de interconexão leva a exatamente o mesmo problema de otimização a ser resolvido pelo SIA considerando interconexões originais. Os índices alcançados podem ser conferidos na terceira coluna da Tabela 4.13.

4.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os estudos de caso permitem a comprovação da metodologia proposta. As interconexões alocadas se mostraram melhores que as originais nas análises em que há chaves seccionadoras em todas as interconexões possíveis, com exceção do último estudo de caso, em que houve empate. Aliás, mesmo no estudo do sistema de 135 barras, que alocou menos interconexões, houve melhoria. Quanto ao empate no sistema de 476 barras, ocasionado pela escolha de mesmas barras de interconexão, é importante destacar ainda se válida a metodologia proposta, pois trata-se de um sistema real, cujas interconexões foram cuidadosamente planejadas. Conclui-se também que, mesmo buscando as melhores chaves seccionadoras com a otimização através do SIA, as novas interconexões se saíram melhores no que diz respeito a índices de confiabilidade. Por fim, vale destacar que o problema de alocação nesta dissertação é aplicado no planejamento de redes, de modo que o tempo computacional gasto com simulações não seja preocupação prioritária.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a validação da metodologia proposta, diversos aspectos foram abordados, a começar pela revisão bibliográfica. Nota-se que a abordagem usual de um problema de alocação de equipamentos em SDEE é tratá-lo como simplesmente de natureza combinatória e aplicar metaheurísticas. Esta dissertação vislumbrou uma maneira diferente de tratar tais problemas, pois, ainda que o uso de uma metaheurística seja parte da segunda etapa da metodologia, mostrou-se que a alocação de interconexões pode ser feita através da exploração dos multiplicadores de Lagrange resultantes de FPO, desde que feita com o algoritmo apropriado. A revisão bibliográfica também revelou a grande atenção que deve ser dada aos índices de confiabilidade e à metodologia de cálculo das mesmas.

Assim, após a apresentação destes índices, procurou-se utilizar uma metodologia viável para determinação dos mesmos. [48] apresenta um algoritmo de cálculo de DIC e FIC com grande didática, motivo pelo qual foi escolhido para ser seguido nesta dissertação. Não obstante, alterações precisaram ser feitas especialmente para possibilitar a determinação do ECOST. Como apontado na revisão bibliográfica, tal índice é de difícil mensuração. Não obstante, incluiu-se no modelo de confiabilidade dados relacionados ao tipo dos consumidores, sua quantidade e carga média, possibilitando o uso de uma FDC para calcular o ônus gerado aos consumidores devido a qualquer contingência na rede. Um detalhe de grande importância sobre o algoritmo de confiabilidade utilizado é sobre o tratamento das interconexões. Trata-las como barras de geração 100% confiáveis conectadas em ambas as extremidades é uma simplificação que exclui qualquer possibilidade de diferenciar os índices ao comparar interconexões diferentes porém com mesmas barras individuais. Por exemplo, interconexões entre as barras $x-y$ e $w-z$ são tratadas como $x-w$ e $y-z$, ou $y-w$ e $x-z$. Foi o que ocorreu no quarto estudo de caso.

No terceiro capítulo, procurou-se apresentar uma nova metodologia para alocação de interconexões, que pode ser combinada com uma metaheurística para alocação de chaves seccionadoras. A ideia principal da proposta é explorar os multiplicadores de Lagrange resultantes de FPO que possui como função objetivo a maximização do carregamento da rede. Até então, tais multiplicadores já vinham sendo utilizadas em problemas de restabelecimento de redes, mas não para alocação de equipamentos. Estas variáveis, quando relacionadas às equações de balanço de potência e de limite superior das variáveis de chaveamento, permitem quantificar, respectivamente, a potencial transferência de potência entre alimentadores e a tendência de fechamento da chave de interconexão para maximizar o carregamento do sistema. Os índices de sensibilidade propostos permitem tal avaliação. Muito embora possam ser calculados e utilizados para sistemas não radiais sem impedimentos, a radialidade permanece como premissa para o calculador de confiabilidade.

Um detalhe importante deve ser observado. A metodologia proposta, apesar de se dividir em duas etapas com problemas de otimização distintos, pode ser percebida como um único problema de otimização que foi desmembrado. Nesta perspectiva, seriam modelados no problema global os chaveamentos tanto de chaves de interconexão quanto de chaves seccionadoras. A função objetivo seria minimizar o ENS. Esta abordagem parece apropriada para otimizar a alocação simultânea de chaves de interconexão e seccionadoras, objetivo de trabalhos futuros.

A metodologia proposta traz novos desafios. Além da necessidade de um método de confiabilidade que inclua taxas de falha específicas de interconexões, outro grande desafio é a determinação de trechos candidatos a interconexão e seus grupos, algo difícil de ser realizado sem uma inspeção visual intensa do diagrama do sistema. Isto pode ser percebido nas longas tabelas de interconexões candidatas no apêndice. Entretanto, selecionar tais possíveis trechos é uma tarefa importante até mesmo no caso de aplicação pura de metaheurística para otimização de interconexões, uma vez que reduz o espaço de soluções viáveis. Ainda neste caso, havendo possibilidade de utilização de um método determinístico, este deve ser preferido. Esta é justamente a proposta desta dissertação.

A metodologia foi aplicada didaticamente a um sistema tutorial e pôde ser validada ao comparar as interconexões originais com as encontradas de, além do sistema tutorial, outros três sistemas. Sejam as chaves seccionadoras em quantidade pré-determinada e otimizadas pelo SIA ou alocadas em todas as posições possíveis, as interconexões encontradas proveram melhores índices de confiabilidade, com exceção do último caso, já explicado. Destaca-se a dificuldade de se encontrar na literatura sistemas de distribuição com seus dados históricos de confiabilidade e de fluxo de carga, razão pela qual, diversas considerações nos dados de confiabilidade foram assumidas. Deste modo, foi possível comprovar a eficiência da metodologia proposta através dos quatro estudos de caso.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Para superar alguns dos desafios citados e melhor compreender as relações entre FPO e confiabilidade, deixa-se algumas questões e sugestões de trabalhos futuros, a saber:

- Representação de interconexões diferentes porém com barras idênticas quando estas consideradas individualmente na nos cálculos de índices de confiabilidade;
- Desenvolvimento de método para determinação de possíveis trechos de interconexão;
- Incluir custos das interconexões nas análises, distâncias e restrições geográficas;
- Aprimorar o calculador de índices de confiabilidade, de modo a se considerar restabelecimentos com múltiplos chaveamentos;

- Investigar a alocação de chaves seccionadoras com uso de multiplicadores de Lagrange resultantes de FPO;
- Desenvolvimento de método para alocação simultânea de chaves de interconexão e seccionadoras.

REFERÊNCIAS

- 1 ANEEL. *Regulação dos Serviços de Distribuição*. Disponível em: <<<http://www.aneel.gov.br/regulacao-dos-servicos-de-distribuicao>>>. Acesso em: 6 de maio de 2020.
- 2 CAMARGO, C. C. d. B. *Confiabilidade aplicada a sistemas de potência elétrica*. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos:, 1981.
- 3 ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8*.
- 4 ANEEL. *Compensação pela Transgressão dos Limites de Continuidade*. Disponível em: <<<http://www.aneel.gov.br/indicadores-de-compensacao-de-continuidade>>>. Acesso em: 6 de maio de 2020.
- 5 BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. *Reliability assessment of large electric power systems*. [S.l.]: Springer, 1988.
- 6 BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. *Reliability evaluation of engineering systems: Concepts and techniques*. [S.l.]: Springer, 1992.
- 7 BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. *Reliability evaluation of power systems*. [S.l.]: Springer, 1996.
- 8 BILLINTON, R.; JONNAVITHULA, S. Optimal switching device placement in radial distribution systems. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 11, n. 3, p. 1646–1651, 1996.
- 9 KHODR, H. et al. Maximum savings approach for location and sizing of capacitors in distribution systems. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 78, n. 7, p. 1192–1203, 2008.
- 10 POMBO, A. V.; MURTA-PINA, J.; PIRES, V. F. Multiobjective planning of distribution networks incorporating switches and protective devices using a memetic optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, Elsevier, v. 136, p. 101–108, 2015.
- 11 BERNARDON, D. et al. Methodology for allocation of remotely controlled switches in distribution networks based on a fuzzy multi-criteria decision making algorithm. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 81, n. 2, p. 414–420, 2011.
- 12 BELLMAN, R. E.; ZADEH, L. A. Decision-making in a fuzzy environment. *Management science*, INFORMS, v. 17, n. 4, p. B–141, 1970.
- 13 TIPPACHON, W.; RERKPREEDAPONG, D. Multiobjective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 79, n. 7, p. 1171–1178, 2009.
- 14 ZAMBON, E. et al. A novel nonlinear programming model for distribution protection optimization. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 24, n. 4, p. 1951–1958, 2009.
- 15 FERREIRA, G. D.; BRETAS, A. S.; CARDOSO, G. Optimal distribution protection design considering momentary and sustained reliability indices. In: IEEE. *2010 Modern Electric Power Systems*. [S.l.], 2010. p. 1–8.

- 16 FERREIRA, G.; BRETAS, A. A nonlinear binary programming model for electric distribution systems reliability optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 43, n. 1, p. 384–392, 2012.
- 17 SARDOU, I. G. et al. Modified shuffled frog leaping algorithm for optimal switch placement in distribution automation system using a multi-objective fuzzy approach. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 6, n. 6, p. 493–502, 2012.
- 18 BENAVIDES, A. J. et al. An iterated sample construction with path relinking method: Application to switch allocation in electrical distribution networks. *Computers & operations research*, Elsevier, v. 40, n. 1, p. 24–32, 2013.
- 19 RAMÍREZ-ROSADO, I. J.; DOMÍNGUEZ-NAVARRO, J. A. Possibilistic model based on fuzzy sets for the multiobjective optimal planning of electric power distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 19, n. 4, p. 1801–1810, 2004.
- 20 ASSIS, L. S. de et al. Switch allocation problems in power distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 30, n. 1, p. 246–253, 2014.
- 21 ASSIS, L. S. de et al. Optimal allocation of remote controlled switches in radial distribution systems. In: IEEE. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [S.l.], 2012. p. 1–8.
- 22 OLIVEIRA, L. W. D. et al. Artificial immune systems applied to the reconfiguration of electrical power distribution networks for energy loss minimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 56, p. 64–74, 2014.
- 23 CASTRO, L. N. D.; ZUBEN, F. J. V. Artificial immune systems: Part i—basic theory and applications. *FEEC/Univ. Campinas, Campinas, Brazil*, 1999.
- 24 CASTRO, L. N. D.; ZUBEN, F. J. V. Artificial immune systems: Part ii—a survey of applications. *FEEC/Univ. Campinas, Campinas, Brazil*, 2000.
- 25 TESHOME, D. F.; LIAN, K. L. An improved distribution system reconfiguration using hybrid ga with pso. In: IEEE. *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. [S.l.], 2015. p. 77–82.
- 26 WU, W.-C.; TSAI, M.-S. Application of enhanced integer coded particle swarm optimization for distribution system feeder reconfiguration. *IEEE transactions on power systems*, IEEE, v. 26, n. 3, p. 1591–1599, 2011.
- 27 SILVA, L. G. W. D.; PEREIRA, R. A. F.; MANTOVANI, J. R. S. Optimized allocation of sectionalizing switches and control and protection devices for reliability indices improvement in distribution systems. In: IEEE. *2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (IEEE Cat. No. 04EX956)*. [S.l.], 2004. p. 51–56.
- 28 WEIWEI, C.; YAFENG, W.; WENXIA, L. Optimal allocation of switches in dg enhanced distribution systems. In: *2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. [S.l.: s.n.], 2011.
- 29 HEIDARI, A. et al. Reliability optimization of automated distribution networks with probability customer interruption cost model in the presence of dg units. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 305–315, 2016.

- 30 BILLINTON, R.; WANG, P. Reliability worth of distribution system network reinforcement considering dispersed customer cost data. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, IET, v. 146, n. 3, p. 318–324, 1999.
- 31 LIN, W.-M.; ZHAN, T.-S.; YANG, C.-D. Distribution system reliability worth analysis with the customer cost model based on rbf neural network. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 1015–1021, 2003.
- 32 CHEN, C.-S. et al. Optimal placement of line switches for distribution automation systems using immune algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 21, n. 3, p. 1209–1217, 2006.
- 33 VILLASANTI, A.; BARAN, B.; GARDEL, P. Multiobjective allocation of remotely controlled switches in an electric distribution power system. In: IEEE. *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*. [S.l.], 2008. p. 1–7.
- 34 SOHN, J.-M.; NAM, S.-R.; PARK, J.-K. Value-based radial distribution system reliability optimization. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 21, n. 2, p. 941–947, 2006.
- 35 GHAJAR, R. F.; BILLINTON, R. Economic costs of power interruptions: a consistent model and methodology. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 29–35, 2006.
- 36 ALLAN, R. N. et al. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results. *IEEE Transactions on Power systems*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 813–820, 1991.
- 37 BILLINTON, R.; JONNAVITHULA, S. A test system for teaching overall power system reliability assessment. *IEEE transactions on Power Systems*, IEEE, v. 11, n. 4, p. 1670–1676, 1996.
- 38 KARAAOM, C. et al. Optimal allocation of tie switch in distribution systems for energy loss reduction using particle swarm optimization. In: IEEE. *2020 8th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. [S.l.], 2020. p. 1–4.
- 39 AMAN, M. M. et al. Optimum tie switches allocation and dg placement based on maximisation of system loadability using discrete artificial bee colony algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 10, n. 10, p. 2277–2284, 2016.
- 40 LÓPEZ, J. *Alocação ótima de chaves de interconexão nas redes de distribuição de energia elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, fev. 2015.
- 41 DIAS, B. H.; PEREIRA, C. M.; OLIVEIRA, L. W. D. Optimum allocation of switches and circuit breakers in main feeders of distribution networks. *13th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE 2019)*, Santiago, Chile, n. 13, out. 2019.
- 42 ABNT. *NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade*. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994.

- 43 IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. *IEEE Std 1366-2012 (Revision of IEEE Std 1366-2003)*, p. 1–43, 2012.
- 44 BROWN, R. E. *Electric power distribution reliability*. [S.l.]: CRC press, 2009.
- 45 PEREIRA, C. M. *Alocação Ótima de Chaves de Manobra e Disjuntores em Alimentadores Principais de Redes de Distribuição*. Dissertação (Graduação) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2018.
- 46 FLETCHER, R. *Practical methods of optimization*. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1987.
- 47 AHUJIA, R.; MAGNANTI, T. L.; ORLIN, J. B. *Network flows: Theory, algorithms and applications*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1993.
- 48 RODRIGUES, F. M. *Otimização multi-objetivo de redes de distribuição utilizando algoritmo genéticos visando melhoria da confiabilidade*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, ago. 2015.
- 49 AOKI, K. et al. Voltage crop constrained restoration of supply by switch operation in distribution systems. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 3, n. 3, p. 1267–1274, 1988.
- 50 SHIRMOHAMMADI, D. Service restoration in distribution networks via network reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 7, n. 2, p. 952–958, 1992.
- 51 POPOVIC, D. S.; CIRIC, R. M. A multi-objective algorithm for distribution networks restoration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 14, n. 3, p. 1134–1141, 1999.
- 52 MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. [S.l.]: E. Blucher, 1983.
- 53 KARMARKAR, N. A new polynomial-time algorithm for linear programming. *Combinatorica*, Springer, v. 4, n. 4, p. 373–395, 1984.
- 54 OLIVEIRA, E. J. de et al. Transmission system expansion planning using a sigmoid function to handle integer investment variables. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 20, n. 3, p. 1616–1621, 2005.
- 55 OLIVEIRA, L. W. de et al. Optimal reconfiguration and capacitor allocation in radial distribution systems for energy losses minimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 32, n. 8, p. 840–848, 2010.
- 56 SILVA, I. C. da et al. A heuristic constructive algorithm for capacitor placement on distribution systems. *IEEE transactions on power systems*, IEEE, v. 23, n. 4, p. 1619–1626, 2008.
- 57 JR, I. C. S. et al. A lagrangian multiplier based sensitive index to determine the unit commitment of thermal units. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 30, n. 9, p. 504–510, 2008.
- 58 CIVANLAR, S. et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988.

- 59 JÚNIOR, A. C. *Alocação Ótima de Dispositivos de Manobra e Proteção Para Planejamento de Sistemas de Distribuição*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016.
- 60 CASTRO, L. N. D.; ZUBEN, F. J. V. The clonal selection algorithm with engineering applications. In: *Proceedings of GECCO*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 2000, p. 36–39.
- 61 CASTRO, L. N. D.; ZUBEN, F. J. V. Learning and optimization using the clonal selection principle. *IEEE transactions on evolutionary computation*, IEEE, v. 6, n. 3, p. 239–251, 2002.
- 62 PATHAK, V.; DHYANI, P. Neuronal feature extraction through autonomous segmentation using density conscious artificial immune algorithm. In: IEEE. *2015 Third International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*. [S.l.], 2015. p. 326–329.
- 63 QIAN, S. et al. Constrained multiobjective optimization algorithm based on immune system model. *IEEE transactions on cybernetics*, IEEE, v. 46, n. 9, p. 2056–2069, 2015.
- 64 CASTRO, L. N. de. Engenharia imunológica: desenvolvimento e aplicação de ferramentas computacionais inspiradas em sistemas imunológicos artificiais. *Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP*, p. 29, 2001.
- 65 RESENDE, P. et al. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica via sistemas imunológicos artificiais. In: *Proc 9th Latin-American congress on electricity generation and transmission Mar del Plata Argentina*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 5.
- 66 GOMES, F. V. et al. A new distribution system reconfiguration approach using optimum power flow and sensitivity analysis for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 21, n. 4, p. 1616–1623, 2006.
- 67 CHIOU, J.-P.; CHANG, C.-F.; SU, C.-T. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 20, n. 2, p. 668–674, 2005.
- 68 MANTOVANI, J. R.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. *Controle and Automacao*, p. 150–159, 2000.

APÊNDICE A – MÉTODO DE PONTOS INTERIORES

O método de pontos interiores (MPI) foi originalmente proposto em 1984 por Karmarkar [53]. Diferente do método de otimização SIMPLEX, que soluciona o problema percorrendo o espaço de solução pelas fronteiras, o MPI percorre pontos viáveis no interior do espaço de solução, ou seja, um caminho mais curto. A responsável por tal característica é a barreira logarítmica, que introduz na função objetivo o efeito das variáveis de folga relacionadas às restrições de desigualdade do problema original. Em termos matemáticos, a formulação padrão expressa com as equações 3.1, 3.2 e 3.4 se transforma nas equações de A.1 a A.4.

$$\text{Min } f(z) - \mu \log(s_u) - \mu \log(s_l) \quad (\text{A.1})$$

s.a.

$$h(z) = 0 \quad (\lambda) \quad (\text{A.2})$$

$$z - u + s_u = 0 \quad (\pi_u) \quad (\text{A.3})$$

$$z - l - s_l = 0 \quad (\pi_l) \quad (\text{A.4})$$

onde λ , π_u e π_l são os multiplicadores de Lagrange das restrições A.2, A.3 e A.4, respectivamente.

O fluxograma apresentado na Figura A.1 resume o método de pontos interiores. Segue-se com a descrição do método em termos gerais.

A função Lagrangeana da função objetivo modificada é:

$$\begin{aligned} \Lambda(z, s_l, s_u, \lambda, \pi_l, \pi_u) = & f(z) - \mu \log(s_u) - \mu \log(s_l) \\ & - \lambda \cdot h(z) - \pi_u(z - u + s_u) - \pi_l(z - l - s_l) \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

As condições de otimalidade, ou condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT), derivam do sistema de equações da Equação A.6, e devem ser aplicadas a um ponto interior primal e dual viável (um chute inicial, no caso).

$$\nabla \Lambda(z, s_l, s_u, \lambda, \pi_l, \pi_u) = 0 \quad (\text{A.6})$$

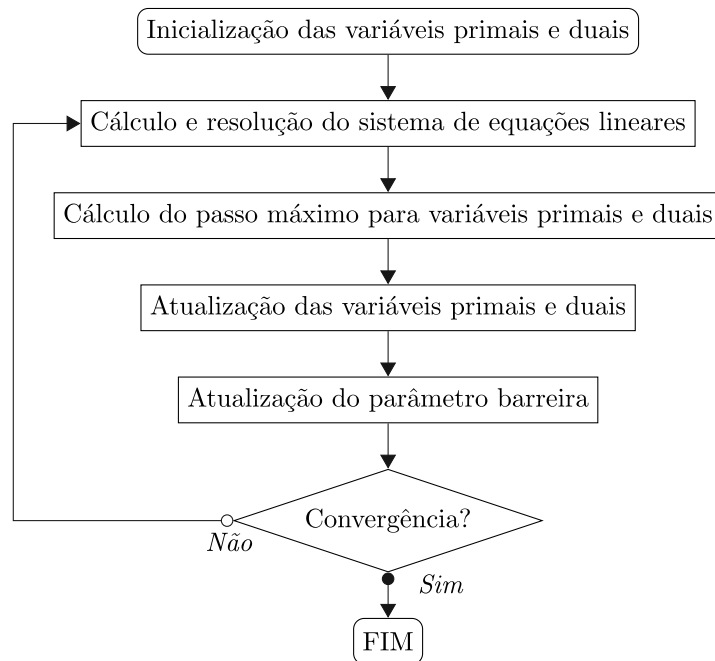
Com o método de Newton-Raphson, calcula-se o passo para as variáveis primais e duais Δz :

$$\nabla^2 \Lambda(z, s_l, s_u, \lambda, \pi_l, \pi_u) \times \Delta z = -\nabla \Lambda(z, s_l, s_u, \lambda, \pi_l, \pi_u) \quad (\text{A.7})$$

onde $\nabla^2 \Lambda(z, s_l, s_u, \lambda, \pi_l, \pi_u)$ é a matriz Hessiana da função Lagrangeana ou Jacobiana do sistema de equações da Equação A.6.

Para atualizar o parâmetro de barreira μ , a metodologia Primal-Dual é comumente utilizada. Sabe-se que a função objetivo, quando aplicada ao conjunto de variáveis ótimas,

Figura A.1 – Fluxograma do MPI



Fonte: Elaboração própria.

gera valores iguais para o problema primal e seu dual. Assim, a diferença entre esses valores, denominada *gap* de dualidade, deve tender a zero ao longo das iterações. O parâmetro de barreira μ pode ser atualizado com base no valor de *gap*. Após esses passos, calcula-se o resíduo do balanço de potência, que não deve ultrapassar o valor de tolerância definido no início de todo o processo.

O presente trabalho foi desenvolvido no ambiente MATLAB. Este *software* fornece uma *toolbox* de otimização que aplica o MPI. Trata-se da função *fmincon*. Nesta dissertação, optou-se por utilizá-la.

ANEXO A – INTERCONEXÕES CANDIDATAS

A.1 84 BARRAS

Tabela A.1 – Interconexões candidatas - Sistema 84 barras

“De”	“Para”	r [pu]	x [pu]	Grupo
5	55	0,131	0,269	1
5	60	0,131	0,269	1
5	43	0,131	0,269	1
5	72	0,131	0,269	1
5	76	0,131	0,269	1
5	18	0,131	0,269	1
5	26	0,131	0,269	1
5	83	0,131	0,269	1
5	32	0,131	0,269	1
5	39	0,131	0,269	1
5	46	0,131	0,269	1
5	42	0,131	0,269	1
5	64	0,131	0,269	1
8	55	0,131	0,269	2
8	60	0,131	0,269	2
8	43	0,131	0,269	2
8	72	0,131	0,269	2
8	76	0,131	0,269	2
8	18	0,131	0,269	2
8	26	0,131	0,269	2
8	83	0,131	0,269	2
8	32	0,131	0,269	2
8	39	0,131	0,269	2
8	46	0,131	0,269	2
8	42	0,131	0,269	2
8	64	0,131	0,269	2
9	55	0,131	0,269	2
9	60	0,131	0,269	2
9	43	0,131	0,269	2
9	72	0,131	0,269	2
9	76	0,131	0,269	2
9	18	0,131	0,269	2

9	26	0,131	0,269	2
9	83	0,131	0,269	2
9	32	0,131	0,269	2
9	39	0,131	0,269	2
9	46	0,131	0,269	2
9	42	0,131	0,269	2
9	64	0,131	0,269	2
10	55	0,131	0,269	2
10	60	0,131	0,269	2
10	43	0,131	0,269	2
10	72	0,131	0,269	2
10	76	0,131	0,269	2
10	18	0,131	0,269	2
10	26	0,131	0,269	2
10	83	0,131	0,269	2
10	32	0,131	0,269	2
10	39	0,131	0,269	2
10	46	0,131	0,269	2
10	42	0,131	0,269	2
10	64	0,131	0,269	2
7	55	0,131	0,269	2
7	60	0,131	0,269	2
7	43	0,131	0,269	2
7	72	0,131	0,269	2
7	76	0,131	0,269	2
7	18	0,131	0,269	2
7	26	0,131	0,269	2
7	83	0,131	0,269	2
7	32	0,131	0,269	2
7	39	0,131	0,269	2
7	46	0,131	0,269	2
7	42	0,131	0,269	2
7	64	0,131	0,269	2
11	55	0,131	0,269	3
11	60	0,131	0,269	3
11	43	0,131	0,269	3
11	72	0,131	0,269	3

11	76	0,131	0,269	3
11	18	0,131	0,269	3
11	26	0,131	0,269	3
11	83	0,131	0,269	3
11	32	0,131	0,269	3
11	39	0,131	0,269	3
11	46	0,131	0,269	3
11	42	0,131	0,269	3
11	64	0,131	0,269	3
12	55	0,3406	0,6994	4
12	60	0,3406	0,6994	4
12	43	0,3406	0,6994	4
12	72	0,3406	0,6994	4
12	76	0,3406	0,6994	4
12	18	0,3406	0,6994	4
12	26	0,3406	0,6994	4
12	83	0,3406	0,6994	4
12	32	0,3406	0,6994	4
12	39	0,3406	0,6994	4
12	46	0,3406	0,6994	4
12	42	0,3406	0,6994	4
12	64	0,3406	0,6994	4
13	55	0,4585	0,9415	5
13	60	0,4585	0,9415	5
13	43	0,4585	0,9415	5
13	72	0,4585	0,9415	5
13	76	0,4585	0,9415	5
13	18	0,4585	0,9415	5
13	26	0,4585	0,9415	5
13	83	0,4585	0,9415	5
13	32	0,4585	0,9415	5
13	39	0,4585	0,9415	5
13	46	0,4585	0,9415	5
13	42	0,4585	0,9415	5
13	64	0,4585	0,9415	5
14	55	0,5371	1,0824	6
14	60	0,5371	1,0824	6

14	43	0,5371	1,0824	6
14	72	0,5371	1,0824	6
14	76	0,5371	1,0824	6
14	18	0,5371	1,0824	6
14	26	0,5371	1,0824	6
14	83	0,5371	1,0824	6
14	32	0,5371	1,0824	6
14	39	0,5371	1,0824	6
14	46	0,5371	1,0824	6
14	42	0,5371	1,0824	6
14	64	0,5371	1,0824	6
16	55	0,0917	0,1883	7
16	60	0,0917	0,1883	7
16	43	0,0917	0,1883	7
16	72	0,0917	0,1883	7
16	76	0,0917	0,1883	7
16	18	0,0917	0,1883	7
16	26	0,0917	0,1883	7
16	83	0,0917	0,1883	7
16	32	0,0917	0,1883	7
16	39	0,0917	0,1883	7
16	46	0,0917	0,1883	7
16	42	0,0917	0,1883	7
16	64	0,0917	0,1883	7
20	55	0,0786	0,1614	8
20	60	0,0786	0,1614	8
20	43	0,0786	0,1614	8
20	72	0,0786	0,1614	8
20	76	0,0786	0,1614	8
20	18	0,0786	0,1614	8
20	26	0,0786	0,1614	8
20	83	0,0786	0,1614	8
20	32	0,0786	0,1614	8
20	39	0,0786	0,1614	8
20	46	0,0786	0,1614	8
20	42	0,0786	0,1614	8
20	64	0,0786	0,1614	8

22	55	0,0786	0,1614	8
22	60	0,0786	0,1614	8
22	43	0,0786	0,1614	8
22	72	0,0786	0,1614	8
22	76	0,0786	0,1614	8
22	18	0,0786	0,1614	8
22	26	0,0786	0,1614	8
22	83	0,0786	0,1614	8
22	32	0,0786	0,1614	8
22	39	0,0786	0,1614	8
22	46	0,0786	0,1614	8
22	42	0,0786	0,1614	8
22	64	0,0786	0,1614	8
24	55	0,0786	0,1614	8
24	60	0,0786	0,1614	8
24	43	0,0786	0,1614	8
24	72	0,0786	0,1614	8
24	76	0,0786	0,1614	8
24	18	0,0786	0,1614	8
24	26	0,0786	0,1614	8
24	83	0,0786	0,1614	8
24	32	0,0786	0,1614	8
24	39	0,0786	0,1614	8
24	46	0,0786	0,1614	8
24	42	0,0786	0,1614	8
24	64	0,0786	0,1614	8
28	55	0,0524	0,1076	9
28	60	0,0524	0,1076	9
28	43	0,0524	0,1076	9
28	72	0,0524	0,1076	9
28	76	0,0524	0,1076	9
28	18	0,0524	0,1076	9
28	26	0,0524	0,1076	9
28	83	0,0524	0,1076	9
28	32	0,0524	0,1076	9
28	39	0,0524	0,1076	9
28	46	0,0524	0,1076	9

28	42	0,0524	0,1076	9
28	64	0,0524	0,1076	9
29	55	0,0786	0,1614	10
29	60	0,0786	0,1614	10
29	43	0,0786	0,1614	10
29	72	0,0786	0,1614	10
29	76	0,0786	0,1614	10
29	18	0,0786	0,1614	10
29	26	0,0786	0,1614	10
29	83	0,0786	0,1614	10
29	32	0,0786	0,1614	10
29	39	0,0786	0,1614	10
29	46	0,0786	0,1614	10
29	42	0,0786	0,1614	10
29	64	0,0786	0,1614	10
34	55	0,0262	0,0538	11
34	60	0,0262	0,0538	11
34	43	0,0262	0,0538	11
34	72	0,0262	0,0538	11
34	76	0,0262	0,0538	11
34	18	0,0262	0,0538	11
34	26	0,0262	0,0538	11
34	83	0,0262	0,0538	11
34	32	0,0262	0,0538	11
34	39	0,0262	0,0538	11
34	46	0,0262	0,0538	11
34	42	0,0262	0,0538	11
34	64	0,0262	0,0538	11
40	55	0,1965	0,4035	12
40	60	0,1965	0,4035	12
40	43	0,1965	0,4035	12
40	72	0,1965	0,4035	12
40	76	0,1965	0,4035	12
40	18	0,1965	0,4035	12
40	26	0,1965	0,4035	12
40	83	0,1965	0,4035	12
40	32	0,1965	0,4035	12

40	39	0,1965	0,4035	12
40	46	0,1965	0,4035	12
40	42	0,1965	0,4035	12
40	64	0,1965	0,4035	12
53	55	0,0393	0,0807	13
53	60	0,0393	0,0807	13
53	43	0,0393	0,0807	13
53	72	0,0393	0,0807	13
53	76	0,0393	0,0807	13
53	18	0,0393	0,0807	13
53	26	0,0393	0,0807	13
53	83	0,0393	0,0807	13
53	32	0,0393	0,0807	13
53	39	0,0393	0,0807	13
53	46	0,0393	0,0807	13
53	42	0,0393	0,0807	13
53	64	0,0393	0,0807	13

Fonte: Elaboração própria.

A.2 135 BARRAS

Tabela A.2 – Interconexões candidatas - Sistema 135 barras

“De”	“Para”	r [pu]	x [pu]	Grupo
7	86	0,13132	0,30315	1
7	87	0,13132	0,30315	1
7	85	0,13132	0,30315	1
7	82	0,13132	0,30315	1
10	86	0,13132	0,30315	1
10	87	0,13132	0,30315	1
10	85	0,13132	0,30315	1
10	82	0,13132	0,30315	1
13	86	0,13132	0,30315	1
13	87	0,13132	0,30315	1
13	85	0,13132	0,30315	1
13	82	0,13132	0,30315	1
15	86	0,13132	0,30315	1
15	87	0,13132	0,30315	1

15	85	0,13132	0,30315	1
15	82	0,13132	0,30315	1
18	86	0,13132	0,30315	1
18	87	0,13132	0,30315	1
18	85	0,13132	0,30315	1
18	82	0,13132	0,30315	1
20	86	0,13132	0,30315	1
20	87	0,13132	0,30315	1
20	85	0,13132	0,30315	1
20	82	0,13132	0,30315	1
21	86	0,13132	0,30315	1
21	87	0,13132	0,30315	1
21	85	0,13132	0,30315	1
21	82	0,13132	0,30315	1
10	32	0,26536	0,13958	2
10	28	0,26536	0,13958	2
10	30	0,26536	0,13958	2
10	38	0,26536	0,13958	2
10	12	0,26536	0,13958	2
10	45	0,26536	0,13958	2
10	46	0,26536	0,13958	2
15	32	0,26536	0,13958	2
15	28	0,26536	0,13958	2
15	30	0,26536	0,13958	2
15	38	0,26536	0,13958	2
15	12	0,26536	0,13958	2
15	45	0,26536	0,13958	2
15	46	0,26536	0,13958	2
18	32	0,26536	0,13958	2
18	28	0,26536	0,13958	2
18	30	0,26536	0,13958	2
18	38	0,26536	0,13958	2
18	12	0,26536	0,13958	2
18	45	0,26536	0,13958	2
18	46	0,26536	0,13958	2
21	32	0,26536	0,13958	2
21	28	0,26536	0,13958	2

21	30	0,26536	0,13958	2
21	38	0,26536	0,13958	2
21	12	0,26536	0,13958	2
21	45	0,26536	0,13958	2
21	46	0,26536	0,13958	2
20	130	0,14187	0,14166	3
20	131	0,14187	0,14166	3
20	129	0,14187	0,14166	3
20	125	0,14187	0,14166	3
21	130	0,14187	0,14166	3
21	131	0,14187	0,14166	3
21	129	0,14187	0,14166	3
21	125	0,14187	0,14166	3
18	130	0,14187	0,14166	3
18	131	0,14187	0,14166	3
18	129	0,14187	0,14166	3
18	125	0,14187	0,14166	3
15	130	0,14187	0,14166	3
15	131	0,14187	0,14166	3
15	129	0,14187	0,14166	3
15	125	0,14187	0,14166	3
13	130	0,14187	0,14166	3
13	131	0,14187	0,14166	3
13	129	0,14187	0,14166	3
13	125	0,14187	0,14166	3
10	130	0,14187	0,14166	3
10	131	0,14187	0,14166	3
10	129	0,14187	0,14166	3
10	125	0,14187	0,14166	3
6	130	0,14187	0,14166	3
6	131	0,14187	0,14166	3
6	129	0,14187	0,14166	3
6	125	0,14187	0,14166	3
46	223	0,08512	0,08499	4
45	223	0,08512	0,08499	4
42	223	0,08512	0,08499	4
38	223	0,08512	0,08499	4

28	223	0,08512	0,08499	4
30	223	0,08512	0,08499	4
46	131	0,08512	0,08499	4
45	131	0,08512	0,08499	4
42	131	0,08512	0,08499	4
38	131	0,08512	0,08499	4
28	131	0,08512	0,08499	4
30	131	0,08512	0,08499	4
33	61	0,04502	0,10394	5
33	62	0,04502	0,10394	5
33	62	0,04502	0,10394	5
33	56	0,04502	0,10394	5
33	57	0,04502	0,10394	5
33	55	0,04502	0,10394	5
33	59	0,04502	0,10394	5
33	65	0,04502	0,10394	5
33	72	0,04502	0,10394	5
33	73	0,04502	0,10394	5
34	61	0,04502	0,10394	5
34	62	0,04502	0,10394	5
34	62	0,04502	0,10394	5
34	56	0,04502	0,10394	5
34	57	0,04502	0,10394	5
34	55	0,04502	0,10394	5
34	59	0,04502	0,10394	5
34	65	0,04502	0,10394	5
34	72	0,04502	0,10394	5
34	73	0,04502	0,10394	5
38	61	0,04502	0,10394	5
38	62	0,04502	0,10394	5
38	62	0,04502	0,10394	5
38	56	0,04502	0,10394	5
38	57	0,04502	0,10394	5
38	55	0,04502	0,10394	5
38	59	0,04502	0,10394	5
38	65	0,04502	0,10394	5
38	72	0,04502	0,10394	5

38	73	0,04502	0,10394	5
42	61	0,04502	0,10394	5
42	62	0,04502	0,10394	5
42	62	0,04502	0,10394	5
42	56	0,04502	0,10394	5
42	57	0,04502	0,10394	5
42	55	0,04502	0,10394	5
42	59	0,04502	0,10394	5
42	65	0,04502	0,10394	5
42	72	0,04502	0,10394	5
42	73	0,04502	0,10394	5
45	61	0,04502	0,10394	5
45	62	0,04502	0,10394	5
45	62	0,04502	0,10394	5
45	56	0,04502	0,10394	5
45	57	0,04502	0,10394	5
45	55	0,04502	0,10394	5
45	59	0,04502	0,10394	5
45	65	0,04502	0,10394	5
45	72	0,04502	0,10394	5
45	73	0,04502	0,10394	5
46	61	0,04502	0,10394	5
46	62	0,04502	0,10394	5
46	62	0,04502	0,10394	5
46	56	0,04502	0,10394	5
46	57	0,04502	0,10394	5
46	55	0,04502	0,10394	5
46	59	0,04502	0,10394	5
46	65	0,04502	0,10394	5
46	72	0,04502	0,10394	5
46	73	0,04502	0,10394	5
59	145	0,14187	0,14166	6
72	145	0,14187	0,14166	6
65	145	0,14187	0,14166	6
73	145	0,14187	0,14166	6
59	144	0,14187	0,14166	6
59	144	0,14187	0,14166	6

72	144	0,14187	0,14166	6
65	144	0,14187	0,14166	6
73	144	0,14187	0,14166	6
59	147	0,14187	0,14166	6
72	147	0,14187	0,14166	6
73	147	0,14187	0,14166	6
59	145	0,14187	0,14166	6
72	145	0,14187	0,14166	6
65	145	0,14187	0,14166	6
73	145	0,14187	0,14166	6
65	147	0,14187	0,14166	7
65	146	0,14187	0,14166	7
65	145	0,14187	0,14166	7
72	147	0,14187	0,14166	7
72	146	0,14187	0,14166	7
72	145	0,14187	0,14166	7
64	147	0,14187	0,14166	7
64	146	0,14187	0,14166	7
64	145	0,14187	0,14166	7
71	147	0,14187	0,14166	7
71	146	0,14187	0,14166	7
71	145	0,14187	0,14166	7
73	206	0,0394	0,09094	8
73	205	0,0394	0,09094	8
73	155	0,0394	0,09094	8
73	164	0,0394	0,09094	8
73	203	0,0394	0,09094	8
73	202	0,0394	0,09094	8
59	206	0,0394	0,09094	8
59	205	0,0394	0,09094	8
59	155	0,0394	0,09094	8
59	164	0,0394	0,09094	8
59	203	0,0394	0,09094	8
59	202	0,0394	0,09094	8
72	206	0,0394	0,09094	8
72	205	0,0394	0,09094	8
72	155	0,0394	0,09094	8

72	164	0,0394	0,09094	8
72	203	0,0394	0,09094	8
72	202	0,0394	0,09094	8
65	206	0,0394	0,09094	8
65	205	0,0394	0,09094	8
65	155	0,0394	0,09094	8
65	164	0,0394	0,09094	8
65	203	0,0394	0,09094	8
65	202	0,0394	0,09094	8
78	125	0,12944	0,29882	9
78	131	0,12944	0,29882	9
78	129	0,12944	0,29882	9
78	124	0,12944	0,29882	9
78	123	0,12944	0,29882	9
82	125	0,12944	0,29882	9
82	131	0,12944	0,29882	9
82	129	0,12944	0,29882	9
82	124	0,12944	0,29882	9
82	123	0,12944	0,29882	9
85	125	0,12944	0,29882	9
85	131	0,12944	0,29882	9
85	129	0,12944	0,29882	9
85	124	0,12944	0,29882	9
85	123	0,12944	0,29882	9
87	125	0,12944	0,29882	9
87	131	0,12944	0,29882	9
87	129	0,12944	0,29882	9
87	124	0,12944	0,29882	9
87	123	0,12944	0,29882	9
125	219	0,01688	0,03898	10
125	220	0,01688	0,03898	10
125	218	0,01688	0,03898	10
125	223	0,01688	0,03898	10
125	215	0,01688	0,03898	10
125	212	0,01688	0,03898	10
125	210	0,01688	0,03898	10
127	219	0,01688	0,03898	10

127	220	0,01688	0,03898	10
127	218	0,01688	0,03898	10
127	223	0,01688	0,03898	10
127	215	0,01688	0,03898	10
127	212	0,01688	0,03898	10
127	210	0,01688	0,03898	10
124	219	0,01688	0,03898	10
124	220	0,01688	0,03898	10
124	218	0,01688	0,03898	10
124	223	0,01688	0,03898	10
124	215	0,01688	0,03898	10
124	212	0,01688	0,03898	10
124	210	0,01688	0,03898	10
129	219	0,01688	0,03898	10
129	220	0,01688	0,03898	10
129	218	0,01688	0,03898	10
129	223	0,01688	0,03898	10
129	215	0,01688	0,03898	10
129	212	0,01688	0,03898	10
129	210	0,01688	0,03898	10
131	223	0,3317	0,17448	11
131	219	0,3317	0,17448	11
131	220	0,3317	0,17448	11
131	218	0,3317	0,17448	11
131	215	0,3317	0,17448	11
131	212	0,3317	0,17448	11
131	210	0,3317	0,17448	11
130	223	0,3317	0,17448	11
130	219	0,3317	0,17448	11
130	220	0,3317	0,17448	11
130	218	0,3317	0,17448	11
130	215	0,3317	0,17448	11
130	212	0,3317	0,17448	11
130	210	0,3317	0,17448	11
139	154	0,14187	0,14166	12
139	204	0,14187	0,14166	12
139	205	0,14187	0,14166	12

139	206	0,14187	0,14166	12
138	217	0,07692	0,17756	13
138	218	0,07692	0,17756	13
138	214	0,07692	0,17756	13
138	223	0,07692	0,17756	13
138	215	0,07692	0,17756	13
138	212	0,07692	0,17756	13
138	210	0,07692	0,17756	13
137	217	0,07692	0,17756	13
137	218	0,07692	0,17756	13
137	214	0,07692	0,17756	13
137	223	0,07692	0,17756	13
137	215	0,07692	0,17756	13
137	212	0,07692	0,17756	13
137	210	0,07692	0,17756	13
135	217	0,07692	0,17756	13
135	218	0,07692	0,17756	13
135	214	0,07692	0,17756	13
135	223	0,07692	0,17756	13
135	215	0,07692	0,17756	13
135	212	0,07692	0,17756	13
135	210	0,07692	0,17756	13
138	153	0,07692	0,17756	14
138	152	0,07692	0,17756	14
137	153	0,07692	0,17756	14
137	152	0,07692	0,17756	14
136	153	0,07692	0,17756	14
136	152	0,07692	0,17756	14
141	154	0,07692	0,17756	15
141	204	0,07692	0,17756	15
141	205	0,07692	0,17756	15
141	207	0,07692	0,17756	15
142	154	0,07692	0,17756	15
142	204	0,07692	0,17756	15
142	205	0,07692	0,17756	15
142	207	0,07692	0,17756	15
141	220	0,07692	0,17756	16

141	219	0,07692	0,17756	16
141	221	0,07692	0,17756	16
143	220	0,07692	0,17756	16
143	219	0,07692	0,17756	16
143	221	0,07692	0,17756	16
145	206	0,26482	0,26443	17
145	155	0,26482	0,26443	17
145	205	0,26482	0,26443	17
145	164	0,26482	0,26443	17
145	203	0,26482	0,26443	17
145	201	0,26482	0,26443	17
144	206	0,26482	0,26443	17
144	155	0,26482	0,26443	17
144	205	0,26482	0,26443	17
144	164	0,26482	0,26443	17
144	203	0,26482	0,26443	17
144	201	0,26482	0,26443	17
160	56	0,49696	0,64567	18
160	55	0,49696	0,64567	18
160	57	0,49696	0,64567	18
157	56	0,49696	0,64567	18
157	55	0,49696	0,64567	18
157	57	0,49696	0,64567	18
162	56	0,49696	0,64567	18
162	55	0,49696	0,64567	18
162	57	0,49696	0,64567	18
164	56	0,49696	0,64567	18
164	55	0,49696	0,64567	18
164	57	0,49696	0,64567	18
203	56	0,49696	0,64567	18
203	55	0,49696	0,64567	18
203	57	0,49696	0,64567	18
201	56	0,49696	0,64567	18
201	55	0,49696	0,64567	18
201	57	0,49696	0,64567	18
212	122	0,17059	0,08973	19
212	123	0,17059	0,08973	19

212	121	0,17059	0,08973	19
212	124	0,17059	0,08973	19
211	122	0,17059	0,08973	19
211	123	0,17059	0,08973	19
211	121	0,17059	0,08973	19
211	124	0,17059	0,08973	19
215	123	0,05253	0,12126	20
215	122	0,05253	0,12126	20
215	124	0,05253	0,12126	20
211	123	0,05253	0,12126	20
211	122	0,05253	0,12126	20
211	124	0,05253	0,12126	20
223	147	0,2932	0,29276	21
223	146	0,2932	0,29276	21
223	145	0,2932	0,29276	21
223	144	0,2932	0,29276	21

Fonte: Elaboração própria.

A.3 476 BARRAS

Tabela A.3 – Interconexões candidatas - Sistema 84 barras

10	1009	1,00E-05	1,00E-05	1
10	1043	1,00E-05	1,00E-05	1
10	1057	1,00E-05	1,00E-05	1
10	1148	1,00E-05	1,00E-05	1
10	20	1,00E-05	1,00E-05	1
10	32	1,00E-05	1,00E-05	1
10	39	1,00E-05	1,00E-05	1
10	67	1,00E-05	1,00E-05	1
10	73	1,00E-05	1,00E-05	1
10	87	1,00E-05	1,00E-05	1
10	90	1,00E-05	1,00E-05	1
10	109	1,00E-05	1,00E-05	1
20	1009	1,00E-05	1,00E-05	2
20	1043	1,00E-05	1,00E-05	2
20	1057	1,00E-05	1,00E-05	2
20	1148	1,00E-05	1,00E-05	2
20	32	1,00E-05	1,00E-05	2

20	39	1,00E-05	1,00E-05	2
20	67	1,00E-05	1,00E-05	2
20	73	1,00E-05	1,00E-05	2
20	87	1,00E-05	1,00E-05	2
20	90	1,00E-05	1,00E-05	2
20	109	1,00E-05	1,00E-05	2
59	1009	1,00E-05	1,00E-05	3
59	1043	1,00E-05	1,00E-05	3
59	1057	1,00E-05	1,00E-05	3
59	1148	1,00E-05	1,00E-05	3
59	20	1,00E-05	1,00E-05	3
59	32	1,00E-05	1,00E-05	3
59	39	1,00E-05	1,00E-05	3
59	67	1,00E-05	1,00E-05	3
59	73	1,00E-05	1,00E-05	3
59	87	1,00E-05	1,00E-05	3
59	90	1,00E-05	1,00E-05	3
59	109	1,00E-05	1,00E-05	3
109	1009	1,00E-05	1,00E-05	4
109	1043	1,00E-05	1,00E-05	4
109	1057	1,00E-05	1,00E-05	4
109	1148	1,00E-05	1,00E-05	4
109	32	1,00E-05	1,00E-05	4
109	39	1,00E-05	1,00E-05	4
109	67	1,00E-05	1,00E-05	4
109	73	1,00E-05	1,00E-05	4
109	87	1,00E-05	1,00E-05	4
109	90	1,00E-05	1,00E-05	4
1043	1009	1,00E-05	1,00E-05	1
1043	1057	1,00E-05	1,00E-05	1
1043	1148	1,00E-05	1,00E-05	1
1043	32	1,00E-05	1,00E-05	1
1043	39	1,00E-05	1,00E-05	1
1043	67	1,00E-05	1,00E-05	1
1043	73	1,00E-05	1,00E-05	1
1043	87	1,00E-05	1,00E-05	1
1043	90	1,00E-05	1,00E-05	1

1057	1009	1,00E-05	1,00E-05	1
1057	1043	1,00E-05	1,00E-05	1
1057	1148	1,00E-05	1,00E-05	1
1057	32	1,00E-05	1,00E-05	1
1057	39	1,00E-05	1,00E-05	1
1057	67	1,00E-05	1,00E-05	1
1057	73	1,00E-05	1,00E-05	1
1057	87	1,00E-05	1,00E-05	1
1057	90	1,00E-05	1,00E-05	1
1148	1009	1,00E-05	1,00E-05	4
1148	1043	1,00E-05	1,00E-05	4
1148	1148	1,00E-05	1,00E-05	4
1148	32	1,00E-05	1,00E-05	4
1148	39	1,00E-05	1,00E-05	4
1148	67	1,00E-05	1,00E-05	4
1148	73	1,00E-05	1,00E-05	4
1148	87	1,00E-05	1,00E-05	4
1148	90	1,00E-05	1,00E-05	4

Fonte: Elaboração própria.