

Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Antônio Candiá Júnior

**Alocação Ótima de Dispositivos de Manobra e Proteção Para Planejamento
de Sistemas de Distribuição**

Juiz de Fora

2016

Antônio Candiá Júnior

**Alocação Ótima de Dispositivos de Manobra e Proteção Para Planejamento
de Sistemas de Distribuição**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc.

Coorientador: Bruno Henriques Dias, D.Sc.

Juiz de Fora

2016

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

Candiá Júnior, Antônio.

Alocação Ótima de Dispositivos de Manobra e Proteção Para Planeja-
mento de Sistemas de Distribuição / Antônio Candiá Júnior. – 2016.

78 f. : il.

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc.

Coorientador: Bruno Henriques Dias, D.Sc.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade
de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2016.

1. Confiabilidade. 2. Distribuição. 3. Sistema Imunológico Artificial
.Oliveira, Leonardo Willer, orient. II. Título.

Antônio Candiá Júnior

**Alocação Ótima de Dispositivos de Manobra e Proteção Para Planejamento
de Sistemas de Distribuição**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 19/12/2016

BANCA EXAMINADORA

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

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

Professor Marcus Theodor Schilling , D.Sc.
Universidade Federal Fluminense

Professor Leandro Ramos de Araujo , D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por estar sempre ao meu lado nos momentos difíceis.

A minha mãe Maria da Conceição, agradeço pelo amor, apoio e incentivo recebido a cada decisão tomada em minha vida.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Leonardo Willer de Oliveira e ao meu coorientador Prof. Dr. Bruno Henriques Dias, pela atenção e disposição prestadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao corpo docente do Programa de Pós Graduação da UFJF.

Meus agradecimentos aos amigos Matheus Alberto de Souza e Fernando de Moraes Cardoso, companheiros de trabalho e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Algo só é impossível até que alguém
duvide e resolva provar ao contrário.”

Albert Einstein * 1879 †1955

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma metodologia para o planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica de média tensão, através da alocação ótima de equipamentos de manobra e de proteção. A proposta se enquadra na fase de planejamento associada à maximização da confiabilidade no fornecimento de energia, com mínimo custo de investimento. A técnica de otimização meta-heurística e bio inspirada denominada sistemas imunológicos artificiais é proposta para aplicação a fim de tratar de modo eficiente a característica discreta do problema de alocação de equipamentos. Um algoritmo de seleção clonal, que aplica os fundamentos da técnica citada considerando as características de redes de distribuição, é utilizado. Índices de confiabilidade da distribuição são utilizados para avaliar a qualidade de soluções candidatas, juntamente com os respectivos custos de investimento. Portanto, as possíveis soluções são avaliadas mediante a busca de um compromisso adequado entre confiabilidade e custo, ambos critérios considerados nos procedimentos da distribuição de energia elétrica referentes à planejamento da expansão. Restrições como a presença de determinados dispositivos em pontos pré-especificados da rede são observadas e atendidas. Os equipamentos contemplados são chaves seccionadoras e de interconexão, manuais ou automáticas, disjuntores e fusíveis. Estudos de casos com quatro sistemas teste conhecidos da literatura especializada são apresentados.

Palavras-chave: Confiabilidade; Planejamento; Sistemas de Distribuição; Otimização.

ABSTRACT

The present work presents a methodology for the expansion planning of medium voltage electric power distribution systems through the optimal allocation of maneuvering and protection equipment. The proposal fits into the planning phase associated with maximizing reliability in energy supply, with minimum investment cost. The meta-heuristic and bio-inspired optimization technique called artificial immunological systems is proposed in order to efficiently treat the discrete characteristic of the equipment allocation problem. A clonal selection algorithm, which make use of the fundamentals of the cited technique considering the characteristics of distribution networks, is used. Distribution reliability indices are used to evaluate the quality of candidate solutions, together with the respective investment costs. Therefore, the possible solutions are evaluated by searching for an adequate compromise between reliability and cost, both criteria considered in the procedures of the distribution of electric power related to the expansion planning. Restrictions such as the presence of certain devices at pre-specified points in the network are observed and met. The equipments contemplated are disconnecting and interconnecting switches, manual or automatic, circuit breakers, reclosers and fuses. Case studies with four test systems from the specialized literature are presented.

Key-words: Reliability; Planning; Distribution Systems; Optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curvas de custos de confiabilidade	20
Figura 2 – Estimação do custo de interrupção	22
Figura 3 – Modelo de rede de confiabilidade série	22
Figura 4 – Sistema tutorial	27
Figura 5 – Camadas de defesa do sistema imunológico natural	38
Figura 6 – Mecanismos de defesa e seus principais mediadores	38
Figura 7 – Edição de receptores	40
Figura 8 – Fluxograma do algoritmo proposto	41
Figura 9 – Função probabilidade de mutação	43
Figura 10 – Codificação de uma solução candidata	45
Figura 11 – Trecho k-m	46
Figura 12 – Exemplo: Sistema 16 barras	47
Figura 13 – Curva de duração de carga de sete patamares	50
Figura 14 – RBTS barramento 5	51
Figura 15 – RBTS barramento 4.	57
Figura 16 – RBTS barramento 3	62
Figura 17 – RBTS barramento 2	65
Figura 18 – Chave de manobra	76
Figura 19 – Chave automática	77
Figura 20 – Fusível	77
Figura 21 – Disjuntor	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Função de Danos ao Cliente (\$/kWp)	21
Tabela 2 – Dados de confiabilidade do sistema tutorial	28
Tabela 3 – Consumidores e cargas do sistema tutorial	28
Tabela 4 – Composição das funções de dano ao cliente	28
Tabela 5 – Índices de confiabilidade para o sistema tutorial	29
Tabela 6 – Parâmetros do Algoritmo	45
Tabela 7 – Codificação do problema via SIA	45
Tabela 8 – Solução candidata para o sistema de 16 barras, considerando o Alimen- tador I	47
Tabela 9 – Custos de equipamentos de manobra e proteção	49
Tabela 10 – Parâmetros históricos dos sistemas RBTS	50
Tabela 11 – Comprimentos para as seções do sistema RBTS - Barramento 5	52
Tabela 12 – Dados de consumidores do sistema RBTS - Barramento 5	52
Tabela 13 – Dados do Caso Base, RBTS5	52
Tabela 14 – Resultado da Análise-1, RBTS5	53
Tabela 15 – Resultados da Análise-2, RBTS5	54
Tabela 16 – Custos de equipamentos de manobra e proteção de [1]	55
Tabela 17 – Resultados do artigo para diferentes horizontes de planejamento	55
Tabela 18 – Resultados do SIA para diferentes horizontes de planejamento	56
Tabela 19 – Comprimento de seções dos alimentadores do sistema RBTS4	58
Tabela 20 – Dados de consumidores do sistema RBTS4	58
Tabela 21 – Resultados Análise-1, RBTS4	59
Tabela 22 – Resultados Análise-2, RBTS4	60
Tabela 23 – Resultado Análise-3, RBTS4	61
Tabela 24 – Comprimentos de seções dos alimentadores do sistema RBTS3	61
Tabela 25 – Dados de consumidores do sistema RBTS3	63
Tabela 26 – Resultados Análise-1, RBTS3	63
Tabela 27 – Resultados Análise-2, RBTS3	64
Tabela 28 – Comprimento de seções dos alimentadores do sistema RBTS2	66
Tabela 29 – Dados de consumidores do sistema RBTS2	66
Tabela 30 – Resultados RBTS2	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AENS	<i>Average Energy not Supplied</i>
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>
CFDC	Composição da Função de Danos ao Cliente
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
ENS	<i>Energy not Supplied</i>
ECOST	O índice de custos esperado pela interrupção
FDC	Função de Danos ao Cliente
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
LOLC	<i>Loss of Load Cost</i>
PPEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
r	Duração média de falha
SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i>
SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency Index</i>
SDE	Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
SIA	Sistemas Imunológicos Artificiais
U	Indisponibilidade
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2	CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE EQUI- PAMENTOS	14
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
1.4	OBJETIVO DO TRABALHO	17
1.5	PUBLICAÇÕES DECORRENTES	17
1.6	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2	CONFIABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DIS- TRIBUIÇÃO	19
2.1	INTRODUÇÃO	19
2.2	CUSTO E CONFIABILIDADE	20
2.3	FUNÇÃO DE DANOS AO CLIENTE	21
2.4	TÉCNICAS E INDICADORES DE AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE	22
2.5	ALGORITMO DE CÁLCULO DO ÍNDICE ECOST	26
2.6	EXEMPLO DO CÁLCULO DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE . .	27
2.7	INFLUÊNCIA SOBRE OS PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE .	31
2.8	CONCLUSÕES PARCIAIS	32
3	METODOLOGIA PROPOSTA	33
3.1	INTRODUÇÃO	33
3.2	MODELAGEM DO PROBLEMA	33
3.2.1	Função Objetivo	34
3.2.2	Restrições	36
3.3	SISTEMA IMUNOLÓGICO ARTIFICIAL	37
3.3.1	Fundamentação Teórica do SIA	38
3.3.2	Algoritmo de Seleção Clonal	40
3.3.3	Codificação do Problema Proposto	45
3.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	48
4	ESTUDO DE CASO	49
4.1	INTRODUÇÃO	49
4.2	DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS	49
4.2.1	Barramento 5 - RBTS5	51
4.2.1.1	<i>RBTS5, Caso Base - Equipamentos apresentados em [2]</i>	52

4.2.1.2	<i>RBTS5, Análise-1</i>	53
4.2.1.3	<i>RBTS5, Análise-2</i>	54
4.2.1.4	<i>RBTS5, Análise-3</i>	55
4.2.2	Barramento 4 - RBTS4	57
4.2.2.1	<i>RBTS4, Análise-1</i>	58
4.2.2.2	<i>RBTS4, Análise-2</i>	59
4.2.2.3	<i>RBTS4, Análise-3</i>	60
4.2.3	Barramento 3 - RBTS3	61
4.2.3.1	<i>RBTS3, Análise-1</i>	62
4.2.3.2	<i>RBTS3, Análise-2</i>	64
4.2.4	Barramento 2 - RBTS2	65
4.2.4.1	<i>Estudo do índice de confiabilidade ASAI</i>	65
4.3	CONCLUSÕES PARCIAIS	68
5	CONCLUSÕES	69
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5.2	TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE A – Equipamentos utilizados	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O fornecimento de energia elétrica é essencial para o desenvolvimento das atividades contemporâneas e, desta forma, sistemas elétricos de potência têm a importante função de manter a continuidade do suprimento deste insumo com níveis satisfatórios de eficiência e qualidade. O crescimento da demanda por energia implica a necessidade de realizar investimentos, com o intuito de reforço dos sistemas de potência focado na confiabilidade e na segurança do suprimento, requisitos diretamente associados ao sucesso de diversos setores da sociedade, como o industrial, comercial, residencial, público e de serviços. Os sistemas de distribuição de energia elétrica (SDE) são importantes no contexto dos sistemas elétricos de potência, por atender diretamente aos setores mencionados e por representar parcela significativa da energia total consumida [3]. Portanto, a operação segura e eficiente destes sistemas colabora para o bem-estar, qualidade de vida e desenvolvimento sócio-econômico. A função básica de um SDE é atender a demanda por energia da forma mais econômica e segura possível, com continuidade e qualidade [4].

Avanços tecnológicos têm possibilitado a flexibilização dos SDE, haja vista sua demanda crescente, através da inserção de automação, medição e comunicação avançada, por exemplo. Esta flexibilização traduz-se na recuperação rápida de falhas, reduzindo custos de interrupção aos serviços públicos, consumidores e contribuintes. O advento destes avanços está contextualizado no conceito amplo de “Redes Inteligentes”, do inglês *"Smart Grids"*. Além de novas tecnologias, este conceito engloba a adoção de novas filosofias e premissas operativas. Em contrapartida, o planejamento e a operação dos SDE tornam-se mais complexos à medida que o portfólio de alternativas e soluções aumenta. As distribuidoras têm se deparado com incertezas sobre restrições econômicas, políticas, sociais e ambientais de impacto no planejamento de seus sistemas. Isto resulta em novos requisitos, que justificam investimentos com otimização de custos aliados à melhoria de confiabilidade. Trata-se do problema global de alocação de capital e operação de recursos com otimização da relação custo-benefício da confiabilidade [5].

Os SDE são tradicionalmente operados com uma configuração topológica radial, a fim de facilitar e simplificar sua operação e proteção [6]. Todavia, uma configuração radial tem menor confiabilidade referente à continuidade do fornecimento de energia quando comparada com a topologia malhada [7]. Por este motivo, as redes de distribuição, embora operadas com configurações radiais, são estruturadas em malha através da utilização de chaves de manobra acopladas aos trechos de seus alimentadores. Estas chaves podem operar normalmente abertas, possibilitando eventual interconexão entre alimentadores, ou normalmente fechadas, flexibilizando o restabelecimento de energia através de seccionamento de trechos.

No conceito amplo de "*Smart Grids*", insere-se ainda o agente conhecido como geração distribuída, que altera os perfis de fluxo de potência das redes tradicionais e a confiabilidade da distribuição [8]. Este novo cenário requer mudanças de paradigmas, envolvendo até a possibilidade de operação parcialmente malhada. Em todas estas situações, a presença estratégica de dispositivos que permitam transferência de carga e isolamento de áreas é fundamental para que as potencialidades de novos avanços possam ser aproveitadas.

Portanto, a confiabilidade de SDE está intimamente associada a alocação de equipamentos de manobra e de proteção, cuja decisão estratégica conduz a melhorias dos indicadores associados. As concessionárias de distribuição têm utilizado religadores no intuito de reduzir a indisponibilidade do fornecimento de energia, tendo em vista que estes equipamentos são capazes de tentar religar automaticamente, por um determinado número de vezes, seções de alimentadores. Isto flexibiliza a operação através do restabelecimento de interrupções decorrentes de faltas temporárias [9]. Outro equipamento importante é o fusível, dispositivo de proteção mais simples, tanto em relação à sua construção física, quanto à sua operação, cuja função é proteger o sistema de sobrecorrentes geradas por curto-circuitos [10]. A proteção também é oferecida por disjuntores, que ainda possibilitam operações de manobra, como desligamentos para manutenções e reparos.

Chaves seccionadoras, por sua vez, proporcionam ao sistema de distribuição a capacidade de reconfiguração, diante da ocorrência de uma falha permanente. Estes equipamentos permitem reduzir interrupções de fornecimento de energia a um número reduzido de consumidores, de acordo com a programação da operação que deve observar prioridades sociais, políticas e econômicas. As chaves seccionadoras também têm a função de isolar trechos na necessidade de se fazer obras de expansão ou de manutenção preventiva [11]. Por fim, as chaves de interconexão viabilizam o remanejamento de consumidores para outros alimentadores durante o restabelecimento de SDE, o que impacta diretamente nos indicadores de confiabilidade.

A satisfação dos consumidores em relação ao serviço de fornecimento de energia elétrica é muito importante. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regula o serviço de distribuição, através dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) [12]. As concessionárias do setor responsabilizam-se, de forma direta ou indireta, pelo fornecimento contínuo e com qualidade da energia. Indicadores como "Duração Equivalente de interrupção por Unidade Consumidora"(DEC) e "Frequência Equivalente de interrupção por Unidade Consumidora"(FEC) [12] permitem aferir a continuidade sob os pontos de vista da frequência e da duração das interrupções. A ANEEL estabelece metas para os referidos indicadores, tanto para os sistemas quanto para os seus alimentadores de distribuição [12].

A capacidade de avaliar o valor de proporcionar um serviço confiável não está bem estabelecida [13], e o desenvolvimento de metodologias neste esforço é promissor.

Estabelecer o valor de confiabilidade do serviço é uma tarefa difícil e subjetiva. Uma alternativa prática, que está sendo amplamente utilizada, é avaliar os impactos e as perdas monetárias incorridas pelos clientes devido a falhas de fornecimento de energia elétrica. Custos de interrupção ao cliente podem fornecer subsídios para definir o valor real de confiabilidade [5].

1.2 CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

A alocação ótima de equipamentos nos sistemas de distribuição de energia elétrica é um problema de difícil resolução, uma vez que tem natureza combinatória. Além disto, o número de soluções possíveis é elevado devido aos vários tipos de equipamentos e diversos locais candidatos. Portanto, o objetivo do problema é responder: “quais equipamentos a alocar?” e; “onde alocar?”. A avaliação de todas as possibilidades é inviável, mesmo se tratando de um estudo de planejamento, pois os tempos necessários são proibitivos para a análise de opções do processo de tomada de decisão.

A análise de confiabilidade para cada solução candidata é complexa, pois está condicionada ao cálculo de diferentes indicadores e a sua correta avaliação mediante as características e requisitos do sistema. Estudos têm sido conduzidos sob o cálculo e a análise de índices diferentes, o que pode gerar soluções diversas e concorrentes. Quando se otimiza confiabilidade visando à redução de custos, índices diversos podem ser obtidos em relação à otimização com foco apenas na frequência ou no tempo de interrupção. Alto nível de confiabilidade e baixo custo são dois requisitos conflitantes entre si, visto que maiores investimentos implicam em maior número de equipamentos de manobra e/ou proteção, aumentando a confiabilidade.

Adicionalmente, o cálculo de indicadores requer uma análise minuciosa do sistema, de seus equipamentos e das interações entre os mesmos e com o sistema. Se alguma interação for avaliada de modo inadequado, indicadores distorcidos podem ser obtidos, comprometendo a decisão a ser tomada. Por fim, o problema de planejamento pode ser modelado através de programação matemática para uma solução assistida por sistema computacional, com função multiobjetivo não-diferenciável, não-linear e inteira mista, envolvendo variáveis contínuas e discretas associadas às decisões de investimento. Desta forma, a resolução deste tipo de problema através de métodos convencionais de programação matemática é difícil ou inviável.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A constante busca por melhoria dos indicadores de confiabilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica pode ser verificada em diversos trabalhos da literatura especializada. Estes trabalhos apresentam propostas de resolução visando otimizar o processo decisório de investimento com base nos diversos indicadores e considerando uma ou mais opções de equipamentos de manobra e/ou proteção [14].

A localização adequada dos dispositivos citados em SDE está intimamente ligada ao benefício que estes podem trazer, tanto na operação, quanto na melhoria dos indicadores de confiabilidade [15], com o menor custo de investimento [15]-[16]. A natureza discreta e combinatória, e o espaço de busca envolvendo as diversas alternativas configuram campo propício para a aplicação de técnicas de otimização meta-heurísticas [17]. Nesta linha, um algoritmo memético de otimização evolucionária é proposto em [18], objetivando a minimização de custos de investimento e a melhoria de índices de confiabilidade. Recozimento simulado [19], colônias de formigas artificiais, enxame de partículas [20], busca tabu [21], algoritmos genéticos [22]-[23] e sistemas imunológicos [24] também têm sido investigados para a resolução deste problema.

A aplicação da técnica denominada busca tabu proposta em [21] tem como propósito otimizar o número e a localização de chaves seccionadoras e dispositivos de proteção em SDE, com custos mínimos de investimento e manutenção. Em [25], o custo ótimo de alocação de chaves seccionadoras em redes primárias de distribuição é buscado também através da determinação do número e da localização estratégica destes equipamentos. Para tanto, são utilizadas técnicas de buscas adaptadas, com ênfase para a meta-heurística conhecida como *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP). A metodologia de otimização utiliza lógica *fuzzy* na busca por soluções que satisfaçam dois objetivos conflitantes, custo de investimento em chaves de manobra e confiabilidade do alimentador de distribuição. O indicador de confiabilidade utilizado é dado pelo custo de interrupção do fornecimento de energia para o consumidor.

O trabalho [26] propõe uma metodologia heurística para o planejamento da expansão de sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica utilizando técnica de otimização clássica, a programação linear binária mista. No modelo, são considerados custos operativos através do cálculo da energia não suprida, bem como custos de investimento associados à alocação de chaves manobráveis e à construção de interconexões entre alimentadores.

A referência [27] propõe uma metodologia para maximizar a confiabilidade de um sistema conhecido na literatura como RBTS, barramento 2. Considera-se na proposta a alocação tanto de chaves de manobra seccionadoras, quanto de trechos de interconexão. O foco é no indicador de confiabilidade denominado *Average Service Availability Index*, designado por ASAI. As análises conduzidas estabelecem a relação entre o referido indicador

e os locais de instalação. O número de equipamentos a serem alocados é pré-estabelecido e o algoritmo decide a sua localização.

A otimização de funções multiobjetivo é complexa. A combinação de diversos objetivos em uma única função é feita através de pesos que tentam estabelecer uma relação apropriada entre os mesmos, por vezes conflitantes. O método de Pareto tem sido aplicado para tais problemas [28], cuja proposta é definir um conjunto de soluções não dominadas, ou seja, concorrentes entre si. De forma generalizada, objetivos típicos do problema de alocação de dispositivos de manobra e/ou proteção em SDE são a minimização dos custos de interrupção, de investimento em equipamentos e de manutenção. Um modelo multiobjetivo baseado na técnica de enxame de partículas é apresentado em [29]. Este modelo inclui chaves seccionadoras e de interconexão entre as opções de planejamento.

Já em [30], o modelo multiobjetivo é baseado em algoritmo genético, visando encontrar um ponto satisfatório entre custos de energia não suprida e de investimento em chaves seccionadoras e interconexões entre alimentadores de redes primárias de distribuição.

O método de simulação de Monte Carlo (MMC) [31] é aplicado em [32]. Este modelo baseado em comportamentos permite estimar a confiabilidade de um sistema com variáveis aleatórias, através de amostras e acúmulo de valores de funções teste relativas à confiabilidade.

Além de chaves operadas manualmente, alguns trabalhos também propõem a avaliação de investimentos em chaves automáticas, telecomandadas e telemedidas, ou seja que podem ser operadas remotamente. Estas chaves permitem uma manobra mais rápida, seja para isolar defeitos ou transferir carga, em tempo real, resultando em um restabelecimento de energia mais ágil, porém requerem maior aporte de investimentos. O investimento em tais dispositivos está a favor das novas regulamentações do setor elétrico, que têm demandado junto às concessionárias de distribuição uma operação mais eficiente, com maiores níveis de qualidade e de continuidade.

A referência [33] apresenta uma metodologia para a alocação de chaves manuais e/ou automáticas através da técnica de recozimento simulado. Já em [24], a técnica meta-heurística bioinspirada conhecida como “sistema imunológico artificial” é aplicada ao problema multiobjetivo de minimização de custos de interrupção e de investimento em chaves de manobra.

A referência [34] propõe algoritmos e software para a alocação ótima de chaves automatizadas por meio de uma matriz lógico estrutural, visando o aumento de confiabilidade através de melhoria dos indicadores "Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora", DEC, “Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora”, FEC, “Frequência e Duração de Interrupção Individuais por Unidade Consumidora”, FIC e DIC, além da "Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora",

DMIC. Estes índices serão descritos no próximo capítulo.

O software *General Algebraic Modeling System* (GAMS) é utilizado em [35] para o planejamento do sistema conhecido na literatura como RBTS, barramento 4. Esta recente referência propõe o planejamento de chaves automáticas e manuais, fusíveis e disjuntores, com o propósito de melhorar o indicador de confiabilidade associado ao custo da confiabilidade, designado como ECOST na literatura. Além da alocação de equipamentos, a referência examina os impactos da inclusão de geração distribuída.

1.4 OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho tem por objetivo propor uma metodologia de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica com foco na alocação ótima de equipamentos de manobra e proteção, visando minimizar o custo total. Para tanto, propõe-se a aplicação da técnica meta-heurística bio inspirada denominada Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA), em virtude de sua capacidade para tratamento das variáveis discretas associadas ao processo decisório de investimento, inseridas no problema de natureza combinatória inteira-mista. Os equipamentos de manobra considerados são chaves seccionadoras e de interconexão, enquanto que os dispositivos de proteção contemplados referem-se a disjuntores e fusíveis.

A abrangência da proposta é determinar quais os equipamentos a investir e sua localização estratégica na rede de distribuição. Mais especificamente, o indicador de confiabilidade considerado é o custo esperado de interrupção aos consumidores (ECOST). Os custos associados englobam o investimento nos equipamentos contemplados e na manutenção programada.

Com base na revisão bibliográfica, ainda não há na literatura uma metodologia que envolva a alocação de todos os equipamentos de manobra e de proteção considerados através da técnica meta-heurística bio inspirada proposta para aplicação no presente trabalho. Este fato configura o caráter inovador da presente proposta de dissertação.

1.5 PUBLICAÇÕES DECORRENTES

Este trabalho resultou na seguinte publicação:

OLIVEIRA, L. W. ; CANDIÁ JÚNIOR, A. ; DIAS, B. H. ; OLIVEIRA, ANGELO R. ; SILVA JUNIOR, I. C. ; OLIVEIRA, E. J. . Alocação Ótima de Chaves em Redes de Distribuição via Sistemas Imunológicos Artificiais.. In: 11th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE 2015), 2015, 2015, São José dos Campos, SP.. 11th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE 2015), 2015.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além deste capítulo introdutório, esta dissertação contém outros quatro capítulos e três apêndices.

O Capítulo 2 apresenta um resumo dos principais tópicos sobre confiabilidade da distribuição, incluindo uma descrição de indicadores considerados neste setor, necessários à compreensão do trabalho.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia proposta nesta dissertação e o Capítulo 4 é dedicado aos estudos de casos. O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões deste trabalho e algumas sugestões de estudos futuros.

O Apêndice A descreve os principais equipamentos de manobra e proteção utilizados em redes de distribuição.

2 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

Confiabilidade em engenharia pode ser definida como a probabilidade de um equipamento desempenhar seu propósito adequadamente durante um determinado período desejado, sob as condições operativas encontradas. Quatro parâmetros importantes são provenientes desta definição, tais como: probabilidade, desempenho adequado, tempo e condições de operação. Ao se avaliar confiabilidade, vários índices são definidos e o termo "confiabilidade" passa a ser utilizado para todos estes de uma forma geral, não estando associado apenas ao conceito de probabilidade. Não existe uma técnica geral para se avaliar a confiabilidade [36].

Dependo do caso, do problema em questão e de suas hipóteses, pode-se ter um método de avaliação próprio a ser utilizado para a modelagem da confiabilidade. Desta forma, a validade da análise está diretamente relacionada com a validade do modelo usado para a representação do sistema [37]. A definição de um nível adequado de confiabilidade é tarefa difícil porque depende da topologia e das consequências diretamente relacionadas aos diversos modos de falha. Muitas vezes, não é importante definir um nível pleno de confiabilidade, mas o quanto a confiabilidade do sistema é melhorada, através de investimentos. Portanto, o objetivo é definir onde se deve investir no sistema a fim de propiciar o máximo benefício em termos de confiabilidade [36].

Durante a fase de projeto, o sistema tem uma confiabilidade inerente, que pode-se deteriorar na ausência de um controle de qualidade adequado. Posteriormente ao planejamento e à construção do sistema, existe a necessidade de se realizar o planejamento das manutenções e operações de forma eficiente, com o propósito de manter a integridade dos equipamentos e garantir a sua confiabilidade. Alguns conceitos básicos são importantes para o desenvolvimento do presente trabalho, a respeito de confiabilidade, os quais são definidos a seguir [38]:

- Falha (interrupções/ano) - evento acidental, por exemplo um curto-circuito, que faz com que um componente de um sistema se torne incapaz de desempenhar sua função, tornando a operação deste inadmissível;
- Tempo de restabelecimento - todo o período decorrido desde a interrupção do fornecimento de energia até o restabelecimento do sistema. Este tempo é composto pelos tempos de localização/manobra e reparo;
- Tempo de manobra - tempo para realizar o deslocamento até as adjacências da falha e fazer a transferência de carga entre alimentadores;
- Tempo de Reparo - período decorrente até a correção da falha.

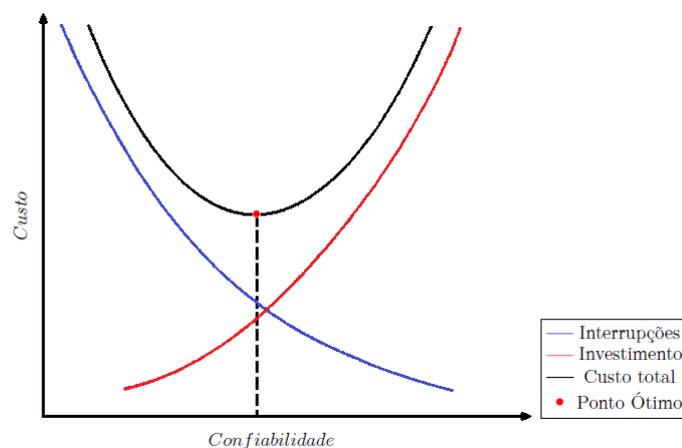
2.2 CUSTO E CONFIABILIDADE

As empresas distribuidoras de energia elétrica têm o dever de tornar transparentes os gastos com investimentos, operação e manutenção de equipamentos instalados em seus sistemas de distribuição. Conseqüentemente, estas estão sempre buscando eficiência em suas decisões, ou seja, minimizar a relação custo-benefício de seus aportes de investimento. Um aporte muito reduzido resulta em queda na qualidade do serviço prestado pela distribuidora diante do aumento da demanda, enquanto que aportes elevados podem comprometer as receitas e o planejamento financeiro da empresa.

Desta forma, estudos têm sido realizados com o intuito de resolver este impasse, objetivando encontrar uma relação entre os custos de investimento, operação e manutenção de equipamentos, e o respectivo benefício reproduzido na qualidade do fornecimento de energia. Assim, a busca constante por formas de melhorar o funcionamento do SDE leva a investimentos que impactem positivamente nos indicadores ou índices de confiabilidade, através da redução das taxas de falha e do tempo de indisponibilidade do serviço de distribuição. Estas melhorias geram satisfação aos clientes e maiores lucros [39].

Devido aos fatores mencionados, as concessionárias de distribuição procuram o ponto em que o investimento seja relativamente baixo, mas suficiente para garantir a qualidade almejada no fornecimento de energia. A título de ilustração, a Figura 1 apresenta as curvas de custo de investimento, número de interrupções e custo total, para um sistema hipotético. Observa-se que melhorar a confiabilidade significa em aumentar significativamente o custo de investimento. Desta forma, o ponto ótimo do problema, dado pelo mínimo do custo total, representa o comprometimento entre o custo investimento e o custo advindo das interrupções.

Figura 1 – Curvas de custos de confiabilidade



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

2.3 FUNÇÃO DE DANOS AO CLIENTE

A determinação dos custos econômicos incorridos pelos clientes devido a contingências que ocasionam quedas de energia tem sido amplamente investigada em estudos da literatura especializada. Uma forma comum de se estimar estes dados é através do levantamento de informações dos clientes conectados à rede elétrica, trecho por trecho, a fim de se determinar os custos ou danos resultantes de interrupções no fornecimento. Tais custos estimados variam com os perfis dos clientes e características das interrupções, como duração, frequência e tempo de ocorrência. A duração é normalmente considerada a principal variável. Sendo assim, o custo de interrupção para determinado tipo de cliente é dado a partir do tempo através de uma função conhecida como “Função de Danos ao Cliente” (FDC) [40].

Uma FDC expressa em unidades monetárias por unidade de pico de demanda anual (kWp) é dada na Tabela 1 e ilustrada na Figura 2. Estes dados por tipo de usuário podem subsidiar o desenvolvimento de modelos de custos tanto para toda a área de serviço, envolvendo diversos consumidores, quanto para pontos de carga individuais [40].

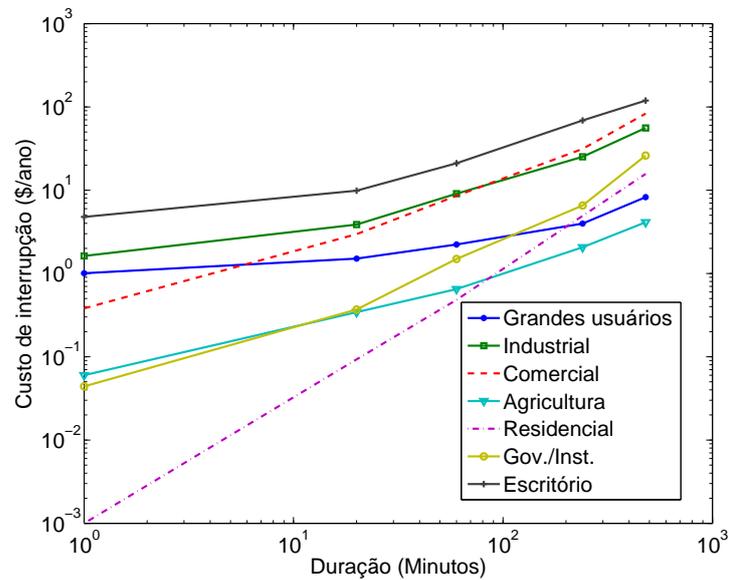
O custo de interrupção em um único ponto de carga é dependente das características de custos do cliente conectado. Com relação a um ponto do sistema em que diversos clientes se conectam, o custo consiste em uma fusão dos custos associados com cada cliente afetado pela interrupção. Esta fusão ou consolidação dos custos é conhecida como “Composição da Função de Danos ao Cliente” (CFDC) [36].

Tabela 1 – Função de Danos ao Cliente (\$/kWp)

Usuário (tipo)	Duração da interrupção e custo (\$/kW)				
	1 min	20 min	1 hora	4 horas	8 horas
Grandes usuários	1,005	1,508	2,225	3,968	8,240
Industrial	1,625	3,868	9,085	25,16	55,805
Comercial	0,381	2,969	8,552	31,317	83,008
Agricultura	0,060	0,343	0,649	2,064	4,120
Residencial	0,001	0,093	0,482	4,914	15,690
Governamental/ Institucional	0,004	0,369	1,492	6,558	26,040
Escritório/ Edifício	4,778	9,878	21,065	68,83	119,16

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 2 – Estimação do custo de interrupção



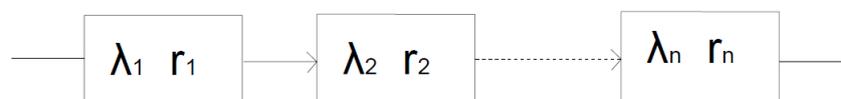
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

2.4 TÉCNICAS E INDICADORES DE AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE

Um sistema de distribuição radial é constituído por um conjunto de componentes em série, incluindo equipamentos de manobra e proteção, alimentadores principais e secundários, trechos, seções e barramentos. Um cliente conectado a um ponto de carga necessita que todos, ou a maioria dos componentes esteja operando de forma adequada. Uma maneira de quantificar o desempenho do sistema, em relação à qualidade do fornecimento de energia aos pontos consumidores, se dá através do cálculo e da análise de indicadores ou índices de confiabilidade. Para tanto, há três parâmetros básicos de confiabilidade para sistemas radiais: *i)* taxa média de falha; *ii)* tempo médio de interrupção e; *iii)* tempo médio de interrupção anual [36].

A Figura 3 representa uma rede de confiabilidade radial, em que a falha de um equipamento acarreta falha de todo o sistema ou da seção à jusante do equipamento sob falha. Este modelo de rede é adequado para o cálculo de indicadores de confiabilidade da distribuição.

Figura 3 – Modelo de rede de confiabilidade série



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os índices de confiabilidade mais comuns para se avaliar o desempenho de um SDE são definidos a seguir.

- (a) Taxa média de falha de uma seção de distribuição (λ_s , falha/ano):

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (2.1)$$

Em que:

λ_i - taxa média de falha do equipamento i da seção s [falhas/ano]; e

n - número de equipamentos da seção s .

- (b) Tempo médio de interrupção por falha de uma seção s (r_s , horas/falha):

$$r_s = \frac{\sum_i^n \lambda_i \cdot r_i}{\sum_i^n \lambda_i}. \quad (2.2)$$

Em que:

r_i - tempo médio de reparo do equipamento i [horas].

- (c) Indisponibilidade de uma seção s (U , horas/ano): representa, em média, as horas em que uma seção de alimentador, ou unidade consumidora, tem seu fornecimento de energia interrompido devido a falhas de equipamentos da seção [12]. O índice ' U ' corresponde ao indicador "Duração de Interrupção Individual por Consumidor"(DIC) na legislação brasileira.

$$U_s = \sum_i^n U_i = \sum_i^n \lambda_i \cdot r_i. \quad (2.3)$$

Em que:

U_i - tempo médio de interrupção anual do equipamento i [horas/ano].

- (d) Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC, horas/ano): Intervalo de tempo que, em média, no período de observação, cada unidade consumidora do conjunto considerado experimentou descontinuidade do suprimento de energia elétrica [12]. Corresponde ao índice "*System Average Interruption Duration Index*"(SAIDI) da literatura.

$$DEC = \frac{\sum_i^n U_i \cdot N_i}{N_{total}}. \quad (2.4)$$

Em que:

N_i - número de consumidores afetados pela falha do equipamento i da seção s ; e

N_{total} - número total de consumidores do sistema.

- (e) Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC): Intervalo de tempo que, em média, no período de observação, cada unidade consumidora experimentou descontinuidade do fornecimento de energia elétrica.
- (f) Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (DMIC): Tempo máximo de interrupção contínua, da distribuição de energia elétrica, para uma unidade consumidora.
- (g) Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC, horas/ano): Número de interrupções ocorridas, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado [12]. Corresponde ao índice "*System Average Interruption Frequency Index*" (SAIFI) da literatura [36].

$$FEC = \frac{\sum_i^n \lambda_i \cdot N_i}{N_{total}} \quad (2.5)$$

- (h) Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (FIC): Número de interrupções ocorridas, no período de observação, em determinada unidade consumidora ou seção de alimentador.
- (i) *Loss of Load Cost* (LOLC): Representa o custo pelo não fornecimento de energia a uma unidade consumidora (ponto de conexão), ou mesmo para o sistema [37].

$$LOLC = \sum_i^I f_i \cdot E[K_i]. \quad (2.6)$$

Em que:

K_i - custo de uma ocorrência da interrupção i ;

f_i - frequência com que ocorre a interrupção i ;

I - número de interrupções; e

E - operador de valor esperado.

- (j) *Customer Average Interruption Duration Index* (CAIDI) [36]: índice de duração média de interrupção para o consumidor, definido pela razão entre o somatório das durações e o número total de interrupções aos consumidores, no período de um ano.

$$CAIDI = \frac{\sum_i^n U_i \cdot N_i}{\sum_i^n \lambda_i \cdot N_i}. \quad (2.7)$$

- (k) *Average Service Unavailability Index* (ASUI) [36]: índice de indisponibilidade média de serviço, definido pela razão entre o número equivalente de horas de indisponibili-

dade aos consumidores e o número total de horas demandadas no período de um ano (8760 horas).

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

- (l) *Average Service Availability Index* (ASAI) [36]: índice de disponibilidade média de serviço, definido pela razão entre o número de horas em que o sistema está disponível aos consumidores e o número total de horas demandadas no período de um ano.

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

- (m) *Energy not Supplied* (ENS) [36]: índice para a energia não suprida, que representa a energia total não fornecida pelo sistema, no período de um ano [36].

$$ENS = \sum_i^n U_i \cdot L_i. \quad (2.10)$$

Em que:

L_i - carga média afetada pela falha do equipamento i .

- (n) *Average Energy not Supplied* (AENS) [36]: índice para a energia média não suprida, definido pela razão entre a energia total não suprida no período de um ano e o número total de consumidores.

$$AENS = \frac{\sum_i U_i \cdot L_i}{N_{total}}. \quad (2.11)$$

- (o) *Custo Esperado por interrupção* (ECOST) - reflete os impactos da duração de interrupção com base na taxa de falha de equipamentos, variação de carga e função de danos ao cliente. Trata-se de um índice analítico baseado em contingência, utilizado para estimar o custo esperado para a falha (\$ / kW-ano), descrito de forma detalhada em [19].

$$ECOST = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^{n_k} L_{ik} * \lambda_j * FDC_j(r_j). \quad (2.12)$$

Em que:

n_k - número de pontos de carga afetados pela contingência j ;

n_j - número de contingências;

n_i - número de patamares de carga;

L_{ik} - carga do ponto k para o i -ésimo patamar de carga; e

$FDC(d_j)$ - custo de interrupção (\$/kW) ao consumidor conectado ao ponto k , para a contingência j com duração de interrupção r_j .

A ANEEL regulamenta padrões para que as concessionárias forneçam energia com qualidade aos seus consumidores, estabelecendo valores máximos para os indicadores de continuidade, que devem ser analisados e comparados periodicamente com os valores apurados pelas concessionárias de distribuição. Estes procedimentos são denominados de "Metas de Continuidade e Padrão de Continuidade", conduzidos através de análise dos seguintes índices: DEC, FEC, DIC, FIC e DMIC [12].

2.5 ALGORITMO DE CÁLCULO DO ÍNDICE ECOST

O algoritmo de cálculo do índice de confiabilidade utilizado nesta dissertação é descrito a seguir.

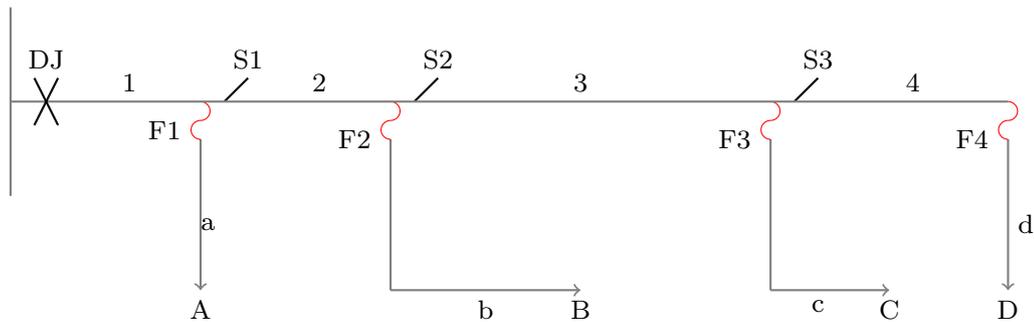
1. Considere uma contingência j na rede de distribuição, para um nível de carga i . Alguns clientes de um alimentador são submetidos a interrupção de energia decorrente da contingência, até que o componente ou seção defeituosa seja reparada ou substituída. Se houver alguma fonte alternativa, como geração distribuída ou interconexão com outro alimentador, a interrupção a alguns clientes é mais curta através de medidas de restabelecimento.
2. Identifique todos os clientes afetados pela contingência, n_k . Para tanto, teoria de grafos e técnicas de busca em profundidade [41] podem ser usadas.
3. Identifique a duração de interrupção para cada cliente, r_j , dada pelo tempo de reparo para aqueles sem acesso a fontes alternativas ou interconexões, e pelo tempo de manobra para os pontos com possibilidade de restabelecimento.
4. Obtenha o custo de interrupção para cada ponto de carga, $C_{jk}(r_j)$, usando a função de dano ao consumidor, FDC.
5. Calcule a contribuição da contingência para o indicador ECOST, através da equação 2.12.
6. Se todas as contingências em todas as seções, tanto primárias quanto laterais, tiverem sido consideradas, fim do algoritmo de cálculo de ECOST. Caso contrário, retorne ao Passo 1.

2.6 EXEMPLO DO CÁLCULO DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE

As redes de distribuição de energia elétrica são planejadas e construídas com alimentadores principais, derivados a partir de subestações de distribuição, e derivações ou ramais laterais. Dispositivos de manobra e de proteção têm como objetivo aumentar a confiabilidade destas redes, que podem dispor de chaves de interconexão entre alimentadores operando normalmente abertas, e chaves seccionadoras operando normalmente fechadas para o isolamento de seções defeituosas.

Para explicar os procedimentos de cálculo de alguns índices de confiabilidade, o sistema tutorial mostrado na Figura 4 [36] é utilizado. Nesta figura, as chaves seccionadoras são S1, S2 e S3 e têm tempo de manobra de 0,5 h. Os fusíveis são designados por F1, F2, F3 e F4 e o disjuntor é representado como DJ.

Figura 4 – Sistema tutorial



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

As taxas de falha são proporcionais aos comprimentos dos trechos. O alimentador principal envolve os trechos '1', '2', '3' e '4' e tem taxa de falha de 0,1 falha/km-ano. Os trechos laterais, representados por 'a', 'b', 'c' e 'd', têm taxa de falha de 0,2 falha/km-ano. Os dados de confiabilidade deste sistema tutorial são mostrados na Tabela 2. Os dados de carga e de número de clientes conectados aos pontos 'A', 'B', 'C' e 'D' são mostrados na Tabela 3.

Considera-se que em cada barra há uma combinação de clientes dada por 40% comerciais e 60% residenciais. Utilizando os dados de FDC para consumidores residenciais e comerciais da Tabela 1, a composição das funções de dano ao cliente nos pontos de carga da Fig. 4 é exemplificada a seguir para a duração de 1 minuto. Seguindo o mesmo procedimento de cálculo, os resultados da composição para outros intervalos de tempo são mostrados na Tabela 4.

$$CFDC(1 \text{ min.}) = 0,40 * (0,381) + 0,60 * (0,001) = 0,1530(\$/kW)$$

Tabela 2 – Dados de confiabilidade do sistema tutorial

<i>Componente</i>	<i>comprimento (km)</i>	<i>Taxa de falha (falha/ano)</i>	<i>Tempo de reparo (h)</i>
Principal			
1	2	0,2	4
2	1	0,1	4
3	3	0,3	4
4	2	0,2	4
Lateral			
a	1	0,2	2
b	3	0,6	2
c	2	0,4	2
d	1	0,2	2

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 3 – Consumidores e cargas do sistema tutorial

<i>Ponto de carga</i>	<i>Número de consumidores</i>	<i>Carga média conectada (kW)</i>
A	1000	5000
B	800	4000
C	700	3000
D	500	2000

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 4 – Composição das funções de dano ao cliente

Duração	\$/kW
1 min	0,1530
20 min	1,2434
1 hora	3,7100
4 horas	15,4752
8 horas	42,6172

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Com os dados das Tabelas 2, 3 e 4, calcula-se os índices de confiabilidade dos pontos de carga do sistema tutorial, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Índices de confiabilidade para o sistema tutorial

	Carga A				Carga B				Carga C				Carga D			
	λ_i	r_i	U_i	ECOST	λ_i	r_i	U_i	ECOST	λ_i	r_i	U_i	ECOST	λ_i	r_i	U_i	ECOST
Seção Principal																
1	0,2	4	0,8	15,4752	0,2	4	0,8	12,3802	0,2	4	0,8	9,2851	0,2	4	0,8	6,1901
2	0,1	0,5	0,05	0,9307	0,1	4	0,4	6,1901	0,1	4	0,4	4,6426	0,1	4	1,6	3,0950
3	0,3	0,5	0,15	2,7921	0,3	0,5	0,15	2,2337	0,3	4	1,2	13,9277	0,3	4	2,4	9,2851
4	0,2	0,5	0,1	1,8914	0,2	0,5	0,1	1,4891	0,2	0,5	0,1	1,1168	0,2	4	1,6	6,1901
Seção Lateral																
a	0,2	2	0,4	7,5771												
b					0,6	2	1,2	18,1850								
c									0,4	2	0,8	9,0925				
d													0,2	2	0,4	3,0308

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A partir dos resultados da Tabela 5, pode-se calcular índices de confiabilidade. O cálculo de alguns destes índices é apresentado na sequência.

Taxas de falha e tempos médios de interrupção

- Ponto A:

$$\lambda_s = 0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2 + 0,2 = 1,0 \text{ falha/ano.};$$

$$U_s = 0,2 * 4 + 0,1 * 0,5 + 0,3 * 0,5 + 0,2 * 0,5 + 0,2 * 2 = 1,5 \text{ horas/ano.};$$

$$r_s = \frac{U_s}{\lambda_s} = 1,5 \text{ horas/falha.}$$

- Ponto B:

$$\lambda_s = 0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2 + 0,6 = 1,4 \text{ falha/ano.};$$

$$U_s = 0,2 * 4 + 0,1 * 4 + 0,3 * 0,5 + 0,2 * 0,5 + 0,6 * 2 = 2,65 \text{ horas/ano.};$$

$$r_s = \frac{U_s}{\lambda_s} = 1,89 \text{ horas/falha.}$$

- Ponto C:

$$\lambda_s = 0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2 + 0,4 = 1,2 \text{ falha/ano.};$$

$$U_s = 0,2 * 4 + 0,1 * 4 + 0,3 * 4 + 0,2 * 0,5 + 0,4 * 2 = 3,3 \text{ horas/ano.};$$

$$r_s = \frac{U_s}{\lambda_s} = 2,75 \text{ horas/falha.}$$

- Ponto D:

$$\lambda_s = 0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2 + 0,2 = 1,0 \text{ falha/ano.};$$

$$U_s = 0,2 * 4 + 0,1 * 4 + 0,3 * 4 + 0,2 * 4 + 0,2 * 2 = 3,6 \text{ horas/ano.};$$

$$r_s = \frac{U_s}{\lambda_s} = 3,6 \text{ horas/falha..}$$

Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

$$FEC = \frac{\sum_i^n \lambda_i \cdot N_i}{N_{total}} = \frac{1,0 * 1000 + 1,4 * 800 + 1,2 * 700 + 1,0 * 500}{3000} = 1,15 \text{ int./cons-ano.}$$

Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

$$DEC = \frac{\sum_i^n U_i \cdot N_i}{N_{total}} = \frac{1,5 * 1000 + 2,65 * 800 + 3,3 * 700 + 3,6 * 500}{3000} = 2,587 \text{ h/cons-ano.}$$

Customer Average Interruption Duration Index

$$CAIDI = \frac{DEC}{FEC} = \frac{2,587}{1,15} = 2,23 \text{ horas de interrupção ao cons..}$$

Average Service Unavailability Index

$$ASUI = \frac{DEC}{8760} = \frac{2,587}{8760} = 0,00029452.$$

Average Service Availability Index

$$ASAI = 1 - 0.00029452 = 0.99970548.$$

Energy not Supplied

$$ENS = \sum_i^n U_i \cdot L_i = 1,5 * 5000 + 2,65 * 4000 + 3,3 * 3000 + 3,6 * 2000 = 35200 \text{ kWh/ano.}$$

Average Energy not Supplied

$$AENS = \frac{\sum_i U_i \cdot L_i}{N_{total}} = \frac{35200}{3000} = 11,7 \text{ kWh/ total de cons..}$$

Custo Esperado por Interrupção

O indicador ECOST é calculado a seguir para o ponto de carga 'A', considerando-se contingências simples em todos os trechos do sistema tutorial. Como a Tabela 4 não contempla o intervalo de 0,5 h, uma interpolação se faz necessária utilizando-se os valores $r_a = 0,333$ e $r_c = 1,000$ da tabela para o cálculo de ECOST.

- Contingência no trecho 1:

$$ECOST_A = L_A * \lambda_1 * CFDC_A(4) = 5000 * 0,2 * 15,4752 = 15,4752 \text{ k\$/ano.}$$

- Contingência no trecho 2:

$$\frac{CFDC(r_b) - CFDC(r_a)}{CFDC(r_c) - CFDC(r_a)} = \frac{r_b - r_a}{r_c - r_a},$$

$$\frac{CFDC(0, 500) - 1, 243}{3, 710 - 1, 243} = \frac{0, 500 - 0, 333}{1, 000 - 0, 333};$$

$$CFDC(0, 500) = 1, 861;$$

$$ECOST_A = L_A * \lambda_2 * CFDC_A(0, 5) = 5000 * 0, 1 * 1, 861 = 0, 930 \text{ k\$/ano.}$$

- Contingência no trecho 3:

$$ECOST_A = L_A * \lambda_3 * CFDC_A(0, 5) = 5000 * 0, 3 * 1, 861 = 2, 7921 \text{ k\$/ano.}$$

- Contingência no trecho 4:

$$ECOST_A = L_A * \lambda_4 * CFDC_A(0, 5) = 5000 * 0, 2 * 1, 861 = 1, 8914 \text{ k\$/ano.}$$

- Contingência no trecho 'a':

$$ECOST_A = L_A * \lambda_a * CFDC_A(2) = 5000 * 0, 2 * 7, 5771 = 7, 5771 \text{ k\$/ano.}$$

O procedimento de cálculo de ECOST para o ponto de carga 'A' pode ser generalizado para os demais pontos.

2.7 INFLUÊNCIA SOBRE OS PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE

Ao se realizar um estudo de confiabilidade, é indispensável dispor de um banco de dados referente aos componentes do sistema sob estudo. A taxa de falha e o tempo médio de reparo de cada elemento do sistema são as informações de maior importância para este estudo [42].

Inúmeros fatores, além das falhas inerentes a cada equipamento, podem causar a interrupção do fornecimento de energia aos consumidores de uma determinada rede, como fatores externos normalmente relacionados a questões ambientais ou intervenção humana. Estes eventos decorrem principalmente de erros de operação e manutenção da rede, descargas atmosféricas, vendavais, quedas de árvores e contato com animais, podendo acarretar em danos mecânicos nos ramais de distribuição [43]. Por estas razões, há um montante significativo de ocorrências de falhas em um SDE, ocasionando descontinuidade no suprimento.

Falhas simultâneas em equipamentos diferentes são eventos raros, uma vez que em condições normais, falhas em dispositivos presentes no sistema são eventos independentes entre si. Todavia, sob condições climáticas adversas, muitos equipamentos podem falhar simultaneamente, acarretando maior número de consumidores desprovidos do fornecimento de energia [42]. Um banco de dados válido, com taxas de falhas e tempos de reparo compatíveis com cada equipamento e região, deve levar em consideração todos os fatores citados para uma modelagem mais fiel do sistema em questão.

2.8 CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo apresentou os principais indicadores ou índices de confiabilidade do segmento de distribuição de energia elétrica, bem como procedimentos de cálculo destes indicadores, utilizados na presente dissertação. Alguns destes índices constituem-se como metas de desempenho para as distribuidoras. O índice mais relevante na metodologia proposta nesta dissertação é o referente ao custo esperado por interrupção ou ECOST. A metodologia de cálculo foi descrita através de um sistema tutorial [36] para fins didáticos. Adicionalmente, foram feitas algumas considerações referentes a fatores que influenciam os parâmetros de confiabilidade de uma rede de distribuição.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

3.1 INTRODUÇÃO

A metodologia proposta na presente dissertação para a o planejamento de dispositivos de manobra e de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica baseia-se na modelagem de um problema de otimização cujo objetivo é a alocação ótima destes dispositivos. Mais especificamente, o modelo proposto visa determinar o número, o tipo e a localização de diferentes dispositivos, compreendendo chaves seccionadoras e de interconexão, disjuntores e fusíveis. O objetivo pretende buscar o equilíbrio entre os custos da confiabilidade, representado pelo indicador de custo esperado por interrupção, ECOST, e o custo de investimento em novos equipamentos. Dada a natureza discreta de um problema de alocação de recursos, propõe-se como técnica de resolução do modelo de otimização não linear e inteiro-mista a técnica meta-heurística bioinspirada denominada Sistemas Imunológicos Artificiais. Este capítulo apresenta a modelagem do problema de otimização, descreve alguns aspectos sobre a técnica de resolução e introduz o algoritmo proposto nesta dissertação.

3.2 MODELAGEM DO PROBLEMA

As redes de distribuição radiais, constituídas basicamente de subestações das quais derivam um ou mais alimentadores, são o foco do presente trabalho. Cada alimentador é dividido em uma ou mais seções de linha e trechos laterais que podem ter ou não dispositivos de proteção. Esta é a forma mais frequente de configuração da rede, haja vista que uma operação radial favorece a coordenação eficaz dos dispositivos de proteção. Para aumento da confiabilidade, interconexões entre alimentadores são construídas a fim de permitir o restabelecimento de energia após a ocorrência de falhas.

Sobre os equipamentos de proteção contemplados nesta dissertação, os fusíveis são dispositivos de proteção de baixo custo que podem isolar a falha. Providos de capacidade de interrupção, devem ser substituídos após sua operação. O disjuntor, por sua vez, é capaz interromper a falha sem a necessidade de substituição após cada operação, além de permitir manobras de abertura e fechamento para manutenções programadas.

De modo geral, a presença de equipamentos de manobra e/ou proteção tende a aumentar a confiabilidade do sistema, minimizando o impacto de falhas para os consumidores. Porém, restrições de investimento limitam esta presença de acordo com a realidade das empresas distribuidoras de energia. Desta forma, o modelo de otimização deve considerar ambos os objetivos, aumento de confiabilidade e minimização de investimentos necessários, através da determinação estratégica de tipo, número e localização de equipamentos. A função objetivo descrita a seguir tenta aliar estes compromissos.

3.2.1 Função Objetivo

O custo total de confiabilidade (CTC) pode ser formulado como função não linear explícita das variáveis de decisão do problema de planejamento de equipamentos de manobra e proteção em uma rede de distribuição. Neste problema, as variáveis discretas de decisão são listadas a seguir:

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{Instalação de chave seccionadora no início do trecho } i; \\ 2 & \text{Instalação de chave seccionadora no final do trecho } i; \\ 3 & \text{Instalação de chave seccionadora no início e no final do trecho } i; \\ 0 & \text{Ausência de chave seccionadora no trecho } i. \end{cases}$$

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{Instalação de fusível no trecho } i; \\ 0 & \text{Ausência de fusível no trecho } i. \end{cases}$$

$$W_i = \begin{cases} 1 & \text{Instalação de disjuntor no trecho } i; \\ 0 & \text{Ausência de disjuntor no trecho } i. \end{cases}$$

$$Z_i = \begin{cases} 1 & \text{Instalação de trecho de interconexão no caminho candidato } i; \\ 0 & \text{Ausência de interconexão no caminho candidato } i. \end{cases}$$

De acordo com as variáveis X_i , chaves seccionadoras podem ser alocadas tanto no início, quanto no final de trecho, o que impacta nos indicadores de confiabilidade do sistema. As demais variáveis são binárias, indicando alocação ou ausência de investimento no respectivo trecho ou caminho candidato.

Uma técnica baseada em simulação de contingência é usada para formular o CTC como uma função matemática de índices básicos de confiabilidade e das variáveis decisórias descritas, conforme formulado a seguir:

$$CTC = C_{inv} + CIC + CM. \quad (3.1)$$

Em que:

C_{inv} - custo de investimento em equipamentos de manobra e proteção;

CIC - custo de interrupção ao cliente; e

CM - custo da manutenção, geralmente proporcional ao custo de investimento.

O custo de investimento é constituído das parcelas formuladas a seguir.

$$C_{inv} = C_{ch} + C_f + C_{dj} + C_{inter}; \quad (3.2)$$

$$C_{ch} = \sum_i^{n_{ch}} (CI_{ch} * X_i); \quad (3.3)$$

$$C_f = \sum_i^{n_f} (CI_f * Y_i); \quad (3.4)$$

$$C_{dj} = \sum_i^{n_{dj}} (CI_{dj} * W_i); \quad (3.5)$$

$$C_{inter} = \sum_i^{n_{inter}} (CI_{inter} * Z_i). \quad (3.6)$$

Em que:

C_{ch} , C_f , C_{dj} , C_{inter} - custos de chaves seccionadoras, fusíveis, disjuntores e de interconexões, respectivamente;

CI_{ch} , CI_f , CI_{dj} , CI_{inter} - custos de investimento unitários de chaves seccionadoras, fusíveis, disjuntores e de interconexões, respectivamente, incluindo investimento de capital, instalação e manutenção;

n_{ch} , n_f , n_{dj} , n_{inter} - número de chaves seccionadoras, fusíveis, disjuntores e interconexões candidatas, respectivamente.

O CIC consiste no dano causado pela interrupção do fornecimento de energia, dado pelo indicador de confiabilidade ECOST, formulado no capítulo anterior e rerepresentado a seguir.

$$CIC = ECOST = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^{n_k} L_{ik} * \lambda_j * FDC_j(r_j). \quad (3.7)$$

Portanto, a função objetivo contempla os principais requisitos estabelecidos para um SDE em termos de confiabilidade, ou seja, mínimo custo de interrupção de energia aos consumidores, com austeridade no planeamento dos custos de investimento e manutenção. Para um horizonte de planeamento de n_{anos} , o valor presente do custo total deve ser obtido conforme formulado a seguir.

$$CTC = \sum_{i=1}^{n_{anos}} CTC_i * \frac{1}{(1 + tx)^i}. \quad (3.8)$$

Em que:

CTC_i - custos de confiabilidade do ano i ; e

tx - taxa de desconto.

3.2.2 Restrições

O problema de planejamento de equipamentos de manobra e proteção em SDE está sujeito a restrições técnicas e econômicas, que são incorporadas ao modelo de programação não-linear inteira-mista proposto. As restrições econômicas são definidas na forma de limitação do número de chaves, dispositivos de proteção e interconexões, conforme formulado a seguir.

$$\sum_i^{n_{ch}} X_i \leq N_{ch}; \quad (3.9)$$

$$\sum_i^{n_f} Y_i \leq N_f; \quad (3.10)$$

$$\sum_i^{n_{dj}} W_i \leq N_{dj}; \quad (3.11)$$

$$\sum_i^{n_{inter}} Z_i \leq N_{inter}; \quad (3.12)$$

$$X_i + Y_i + Z_i + W_i \leq 1 \text{ se } X_i \neq 2, \text{ ou} \quad (3.13)$$

$$X_i + Y_i + Z_i + W_i \leq 2 \text{ se } X_i = 2, \text{ ou}$$

$$X_i + Y_i + Z_i + W_i \leq 3 \text{ se } X_i = 3.$$

Em que:

N_{ch} , N_f , N_{dj} , N_{inter} - números máximos de chaves seccionadoras, fusíveis, disjuntores e trechos de interconexão, respectivamente.

As restrições técnicas são baseadas em práticas de configuração e utilitários de rede, sendo formuladas como:

$$Y_i = 1, \forall i \in SL; \quad (3.14)$$

$$Y_i = 0, \forall i \in TSP; \quad (3.15)$$

$$W_i = 1, \forall i \in SP; \quad (3.16)$$

$$Z_i = 0, \forall i \in TE. \quad (3.17)$$

Em que:

SL - conjunto de trechos que iniciam seções laterais;

TSP - conjunto de seções primárias;

SP - conjunto de trechos que iniciam alimentadores primários; e

TE - conjunto de trechos existentes nos alimentadores primários ou laterais e candidatos à alocação de equipamentos.

As restrições em 3.14 e 3.15 estabelecem que os trechos iniciais de derivações laterais devem receber a alocação de fusíveis, e que estes elementos não devem ser alocados em trechos de seções de alimentadores primários. A restrição 3.16, por sua vez, estabelece que disjuntores devem ser alocados nos trechos iniciais de alimentadores primários. Por fim, a restrição 3.17 indica que uma interconexão só pode ser construída em um trecho ainda não existente.

Além das restrições anteriores, a configuração deve ser radial. No caso de mudanças na capacidade de unidades de geração, configuração e carga da rede, a configuração da proteção deve ser recalculada e reajustada [44].

3.3 SISTEMA IMUNOLÓGICO ARTIFICIAL

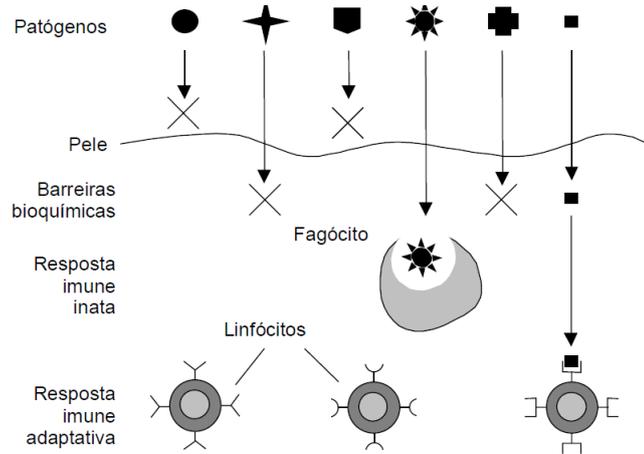
A técnica meta-heurística utilizada no presente trabalho para o tratamento das variáveis discretas X_i , Y_i , W_i e Z_i , associadas às opções de investimento em equipamentos de manobra e proteção, denomina-se Sistema Imunológico Artificial. Esta técnica inspira-se no sistema imunológico natural adaptativo dos animais vertebrados e foi desenvolvida através de observações das funções e princípios imunológicos da teoria imunológica natural para a resolução de problemas reais [45]. A sua aplicabilidade estende-se a diferentes tarefas em várias áreas de pesquisa como, por exemplo, reconhecimento de padrões, aprendizado de máquinas e otimização [46].

Os problemas de otimização, em específico, beneficiam-se de características como capacidade de processamento de informação, diversidade na investigação do espaço de soluções e preservação de soluções candidatas ótimas locais encontradas durante o processo de busca [46]. Recentemente, aplicações de SIA têm surgido, entre as quais se pode citar os trabalhos de [47], [48], [24] e [35], sendo o último publicado em 2016 em assunto correlato ao da presente dissertação. Adicionalmente, esforços para a associação de SIA com outras metodologias, como lógica *fuzzy* e redes neurais artificiais, tem sido verificados [49]. A fim de proporcionar um melhor entendimento desta ferramenta computacional, é necessário introduzir os conceitos de seleção clonal e maturação de afinidade.

3.3.1 Fundamentação Teórica do SIA

A inspiração do SIA, o sistema imune adaptativo natural, consiste no conjunto de mecanismos responsáveis pelo combate a invasores externos aos organismos, como substâncias tóxicas, protegendo-os contra doenças. Tais invasores são denominados de antígenos e os agentes que os combatem, anticorpos, que são relativamente específicos para cada antígeno. A Figura 5 apresenta a arquitetura de camadas de defesa do sistema imunológico natural [46].

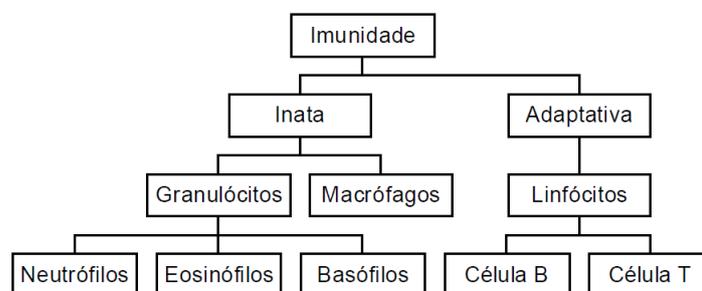
Figura 5 – Camadas de defesa do sistema imunológico natural



Fonte: Retirado de [46]

Normalmente, a pele funciona como uma barreira primária que evita a invasão de diversos microrganismos. Caso seja atravessada por agentes patogênicos, estes encontram uma barreira secundária de natureza bioquímica, cujo pH e temperatura são impróprios para sua sobrevivência. No caso de insuficiência dos dois primeiros sistemas, os sistemas imunes inato e adaptativo entram em ação.

Figura 6 – Mecanismos de defesa e seus principais mediadores



Fonte: Retirado de [46]

A resposta do sistema imune inato é imediata, alertando aos outros sistemas sobre a invasão e detectando uma grande variedade de antígenos, incluindo vírus e parasitas,

distinguindo-os dos tecidos saudáveis do próprio corpo. Porém, a maioria é capaz de superar as defesas iniciais, evoluindo através de mutação e exigindo mecanismos mais especializados, como a imunidade adaptativa, estrutura mais complexa capaz de produzir anticorpos específicos para um antígeno.

Os mecanismos fundamentais do sistema imune adaptativo, particularmente importantes para a técnica SIA são:

- Produção de células ou linfócitos B na medula óssea, emissores de anticorpos;
- Seleção clonal;
- Hipermutação somática;
- Edição de receptores;
- Seleção negativa.

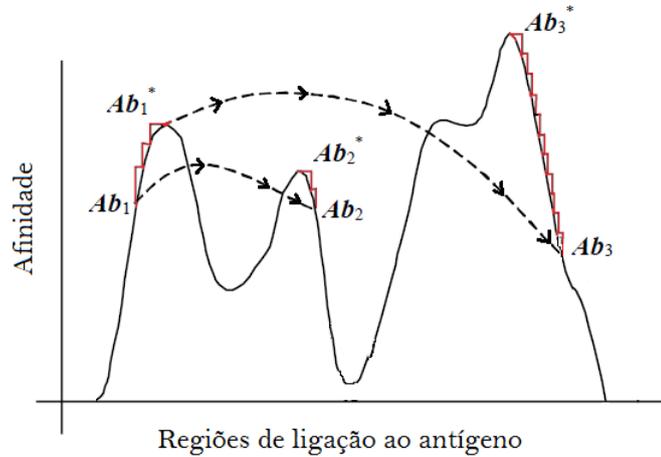
De forma aleatória, a medula óssea realiza a produção de linfócitos B. O material genético é armazenado e, por meio de recombinações genéticas, segmentos são selecionados para a formação de nova célula B, capaz de reconhecer apenas um tipo específico de antígeno pela complementaridade ou afinidade de ligação. A ativação da célula B e a maturação de afinidade ocorrem quando esta é superior a um valor limiar. Os processos de seleção clonal e hipermutação somática permitem ao organismo produzir variedades de células com alta afinidade ao antígeno. Tanto o linfócito B quanto o anticorpo deste originado, têm a mesma afinidade para um antígeno e, portanto, estes elementos se misturam na fundamentação da técnica SIA.

A seleção clonal representa a escolha dos linfócitos B ativados para clonagem, cuja taxa é proporcional à afinidade. Após este processo, variações são introduzidas no repertório de anticorpos através do mecanismo hipermutação somática, em que os clones podem sofrer mutações dependendo de sua afinidade, de modo a priorizar a produção de anticorpos mais afins para o repertório. A exploração local do espaço de possíveis soluções é realizada por meio da atividade simultânea dos mecanismos de seleção clonal e hipermutação somática. No SIA aplicado à otimização, o aumento de afinidade do repertório está associado à aproximação do ponto ótimo para o problema em questão.

O mecanismo de edição de receptores introduz maiores variações entre as soluções candidatas, aumentando a diversidade e promovendo a busca global, porém com uma taxa reduzida. Sua finalidade é evitar a estagnação do processo evolutivo em pontos ótimos locais, complementando a hipermutação somática. Estes dois processos constituem a maturação de afinidade e são ilustrados na Figura 7 [49]. Na figura, a evolução da solução Ab_1 para Ab_1^* , na mesma região, ocorre através dos mecanismos de seleção clonal e

hipermutação somática, enquanto que a evolução de Ab_1^* para outras regiões, Ab_2 ou Ab_3 dá-se por edições de receptores.

Figura 7 – Edição de receptores



Fonte: Retirado de [46]

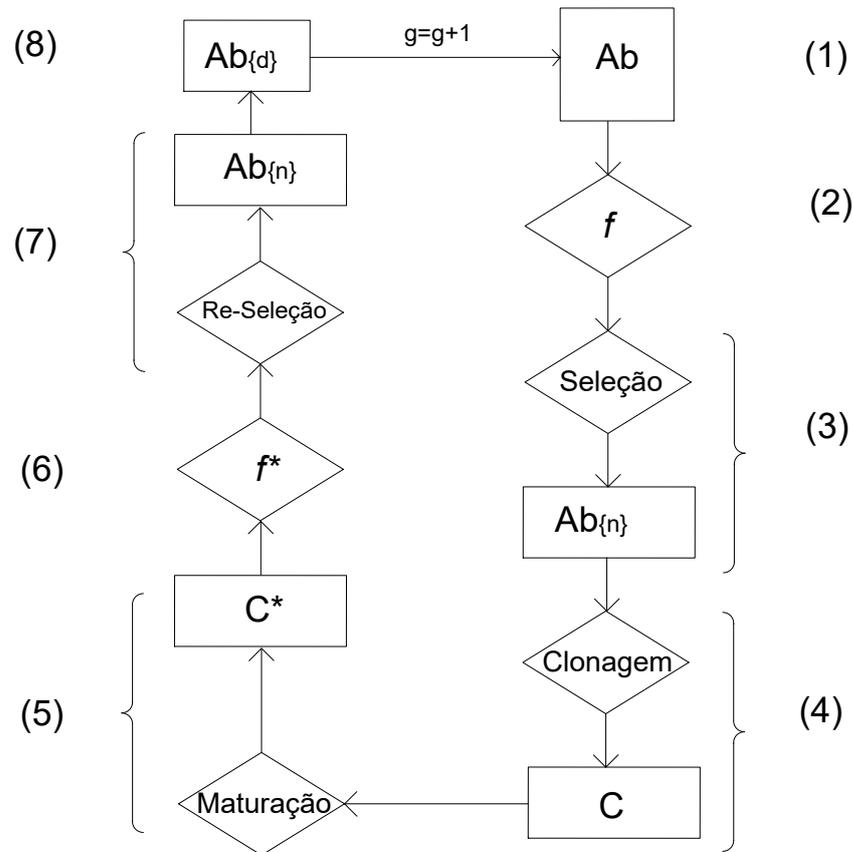
Durante as gerações aleatórias provenientes dos processos de hipermutação somática e edição de receptores, o problema denominado de resposta auto-imune, que consiste no ataque por anticorpos a células saudáveis do próprio organismo, pode surgir. Tais anticorpos são associados a pontos ineficazes de solução em problemas de otimização, devendo, portanto, ser eliminados através de um processo denominado de seleção negativa.

3.3.2 Algoritmo de Seleção Clonal

Em SIA aplicados a problemas de otimização, faz-se uma analogia entre as soluções candidatas e os anticorpos do organismo. Os mecanismos de reconhecimento de padrões de antígenos pelos anticorpos foram investigados e traduzidos para mecanismos de busca de problemas de otimização matemática [49], por aliar de forma eficiente busca local e global, através de processos de intensificação e diversidade, respectivamente. Mais especificamente, os mecanismos aplicados incluem-se na seleção clonal, ou seja, na seleção das melhores soluções candidatas a fim de lhes atribuir maior probabilidade de disseminação durante o processo de otimização, e na maturação de afinidade.

O algoritmo utilizado nesta dissertação baseia-se no processo de seleção clonal e consiste em uma aplicação dos mecanismos do SIA descritos anteriormente de forma sistematizada. Este algoritmo, denominado CLONR [17], é proposto para a alocação ótima de equipamentos de manobra e proteção em SDE por se aderir ao problema, pois foi desenvolvido de forma dedicada para considerar características e restrições de redes de distribuição [17]. O fluxograma do algoritmo é apresentado na Figura 8, cujos passos são descritos na sequência.

Figura 8 – Fluxograma do algoritmo proposto



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Passo 1: Geração da população inicial de anticorpos Ab - Este passo é efetuado unicamente na primeira geração ($g = 1$). Cada anticorpo representa uma solução candidata para o problema de alocação. O repertório Ab contém N_{ab} anticorpos. Ressalta-se que Ab é codificado por uma matriz $[N_{ab} \times L]$, em que L é o número de atributos de cada anticorpo e corresponde ao número de trechos candidatos à alocação de equipamentos (N_{te}), somado ao número de caminhos candidatos a interconexão da rede elétrica (N_{tc}). Cada atributo de um anticorpo define o equipamento alocado.

Passo 2: Avaliação da afinidade ' f ' dos anticorpos de Ab - A afinidade de cada anticorpo é inversamente proporcional à função objetivo formulada na equação 3.1, pois se trata de um problema de minimização.

Passo 3: Seleção dos ' n ' melhores anticorpos de Ab para clonagem - São selecionados ' n ' anticorpos diferentes de Ab com maior afinidade para compor o conjunto Ab_n .

Passo 4: Clonagem dos anticorpos de Ab_n - São clonados os anticorpos do conjunto

Ab_n , resultando no conjunto de clones C. O número de clones é diretamente proporcional à afinidade normalizada dos anticorpos de Ab_n . O número de clones (N_c) para cada anticorpo selecionado é dado pela equação 3.18.

$$N_c(i) = \text{round}(\beta \cdot f_i^*) \quad (3.18)$$

Em que:

$N_c(i)$ - número total de clones associados ao anticorpo i ;

β - parâmetro que controla o processo de clonagem;

f_i^* - afinidade normalizada do anticorpo i ; e

$\text{round}(\cdot)$ - o operador de arredondamento para o valor inteiro mais próximo.

A afinidade normalizada f_i^* é calculada em função da afinidade do anticorpo i (f_i) conforme equação 3.19 [50].

$$f_i^* = \frac{1}{1 + e^{(-\frac{f_i - f_m}{\delta^*})}} \quad (3.19)$$

Em que:

δ^* - desvio padrão das afinidades dos anticorpos do conjunto Ab_n ; e

f_m - média aritmética das afinidades dos anticorpos de Ab_n .

Destaca-se que, com a finalidade de aprimorar o processo de otimização, [50] propôs os cálculos de afinidade normalizada da equação 3.19 e do número de clones da equação 3.18, que consistem em um refinamento do algoritmo de aplicação de SIA originalmente proposto em [46]. A normalização do tipo sigmoideal da equação 3.19 possibilita obter uma distribuição mais apropriada dos valores de afinidade dentro da faixa normalizada [50]. A afinidade normalizada de um clone genérico ic de um anticorpo i é igual a afinidade normalizada de i ($f_{ic}^* = f_i^*$).

Passo 5: Hipermutação Somática dos anticorpos de C - Os anticorpos de C são sujeitos ao processo de hipermutação somática formando o conjunto de mutantes C^* . A probabilidade de mutação de um clone ic é inversamente proporcional à afinidade normalizada f_{ic}^* , conforme equação 3.20 [50].

$$p_{ic} = e^{(-\rho \cdot f_{ic}^*)} \quad (3.20)$$

Em que:

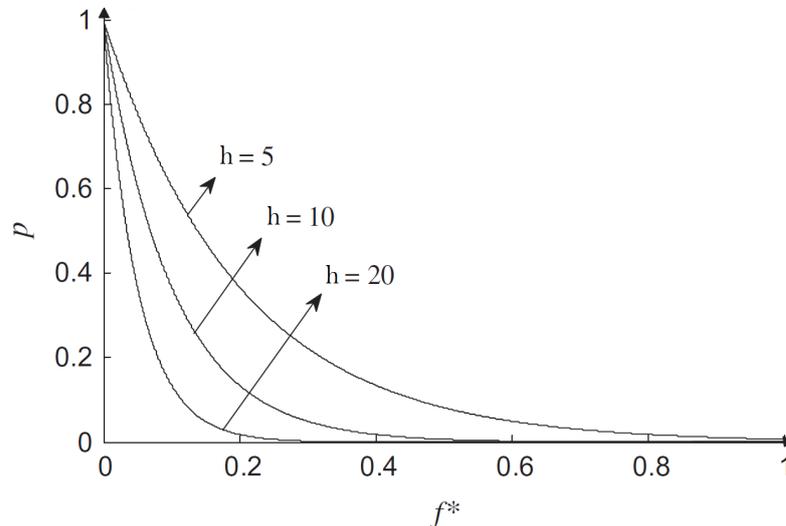
p_{ic} - probabilidade de mutação do clone ic , no intervalo $[0,1]$; e

h - parâmetro que coordena o processo de hipermutação somática, controlando o amortecimento da função exponencial da equação 3.20.

Percebe-se que, para um mesmo valor de afinidade normalizada, a probabilidade de mutação aumenta com a diminuição do parâmetro h . Quanto maior o valor de h , menor é o amortecimento, conforme ilustrado na Figura 9, onde se pode ainda notar que a probabilidade de mutação p é inversamente proporcional à afinidade normalizada f^* .

Visto que a mutação é um processo probabilístico, podem existir clones do conjunto C^* sem nenhuma alteração em relação ao conjunto C . Depois de realizar o cálculo de probabilidades de mutação conforme equação 3.20, um número aleatório é gerado no intervalo $[0,1]$ para cada clone de C . Se este número aleatório for maior que a probabilidade de mutação p_{ic} , o clone permanece inalterado, caso contrário, sofre mutação.

Figura 9 – Função probabilidade de mutação



Fonte: Retirado de [17]

Utilizando o fato de que para um mesmo valor de afinidade normalizada, a probabilidade de mutação aumenta com a diminuição do valor de h , utiliza-se a técnica de intercalamento entre gerações de alta e baixa mutação proposta em [17], para aumentar a eficiência do processo de busca. A ideia é iniciar uma geração de alta mutação quando o processo de busca está estagnado, ou seja, quando a diversidade da população é baixa, através da diminuição do parâmetro h ($h = h_2 < h_1$), em que h_1 é o valor inicial de h . À medida que o algoritmo evolui, se a diversidade aumenta, o valor de h pode ser restabelecido para h_1 . Duas condições são utilizadas para a detecção de estagnação do processo de busca e, conseqüentemente, alteração do parâmetro h [17]:

- A melhor solução do repertório Ab permanece inalterada durante um número de gerações igual a g^* ; ou

- A diversidade do repertório Ab é inferior a um determinado limite ($limd$).

Dessa forma, evita-se convergência prematura em regiões de estagnação do algoritmo. Quando as duas condições apresentadas não são mais válidas, o valor inicial de h é restabelecido. A diversidade da população de anticorpos (div) verificada na segunda condição é calculada de acordo com a equação 3.21.

$$div = \frac{N_{ab} - dist}{N_{ab}} \quad (3.21)$$

Em que ' $N_{ab} - dist$ ' é o número de indivíduos únicos, ou seja, indivíduos que não se repetem no repertório Ab .

Passo 6: Avaliação da afinidade f^* dos anticorpos mutados C^* - Mesmo procedimento do Passo 2.

Passo 7: Re-seleção - As ' n ' melhores soluções são selecionadas (Ab_n) para substituir as ' n ' piores do conjunto Ab .

Passo 8: Edição de Receptores - São gerados de forma aleatória ' d ' novos anticorpos para constituir o conjunto (Ab_d), através da mesma estratégia de geração do primeiro passo. Este mecanismo de atuação visa evitar a convergência prematura do algoritmo em soluções subótimas, conduzindo o processo de otimização para novas regiões do espaço de busca.

Após a execução do Passo 8, uma geração do algoritmo CLONR é contabilizada e o critério de convergência é verificado. A convergência do algoritmo é obtida quando:

- O número de gerações (g) atinge um valor máximo igual a g_{max} ; ou
- A melhor solução do repertório A_b permanece inalterada durante um número de gerações igual g_{est} .

No momento em que a convergência é alcançada, o algoritmo CLONR é finalizado. Caso contrário, o processo de otimização retorna ao Passo 2. As Tabelas 6 e 7 apresentam os parâmetros do algoritmo proposto e a codificação do problema de alocação de equipamentos utilizando este algoritmo, respectivamente. Os dados apresentados na Tabela 6 foram especificados a partir de testes empíricos. Ressalta-se que para todos os SDE testados nesta dissertação, as definições desses parâmetros são as mesmas.

Tabela 6 – Parâmetros do Algoritmo

N_{ab}	$N_{te} + N_{tc}$	h	h_1	1
			h_2	0,2
gmax	100	gest	20	
β	20	g*	5	
n	$0,06 * N_{ab}$	limd	0,5	
d	$0,03 * N_{ab}$	b	2	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Em que: b é o número de atributos alterados em cada anticorpo selecionado para mutação.

Tabela 7 – Codificação do problema via SIA

SIA	Correspondência no problema de alocação de equipamentos
Anticorpo	Decisões para trechos e caminhos candidatos
Tamanho do anticorpo (L)	Número total de trechos e caminhos candidatos
Atributo	Tipo de equipamento
Afinidade	Inversamente proporcional ao valor da função objetivo, equação 3.1

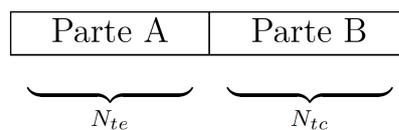
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Durante os processos de avaliação de afinidades, são descartados dos processos de seleção clonal e de maturação de afinidades os anticorpos que apresentam valor da função objetivo maior que o valor calculado sem alocação de equipamentos, bem como os anticorpos associados a soluções candidatas inactiváveis. A eliminação destes anticorpos consiste no processo de seleção negativa do sistema imune natural, descrito anteriormente.

3.3.3 Codificação do Problema Proposto

Uma solução candidata para o problema de alocação de equipamentos de manobra e proteção proposto é representada por um conjunto de parâmetros organizados de forma vetorial, conforme Figura 10.

Figura 10 – Codificação de uma solução candidata



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Em que: ' N_{te} ' e ' N_{tc} ' são os números de trechos existentes e de trechos candidatos, respectivamente.

A Parte 'A', com ' N_{te} ', posições, armazena as decisões de alocação de equipamentos para os trechos existentes, enquanto que a Parte 'B' armazena as decisões sobre a construção de interconexões para os caminhos candidatos, com ' N_{tc} ' posições. As posições da Parte 'A' destinadas a um trecho são definidas como:

- 0 - ausência de equipamento;
- 1 - chave no início do trecho;
- 2 - fusível no trecho; ou
- 3 - disjuntor no trecho.

Para a análise de alocação de chaves seccionadoras no início ou no final de um trecho $k-m$, saindo da barra k e chegando à barra m , este é dividido em três partes, conforme Figura 11. Daí, os subtrechos $k-s$ e $p-m$ passam a ser considerados de forma independente, com decisões independentes no que se refere à alocação de chaves. Portanto, uma decisão por alocação no trecho $k-s$ significa chave no início do trecho original $k-m$. Por outro lado, a alocação em $p-m$ representa uma chave posicionada no final do trecho original $k-m$. Neste caso, supondo a possibilidade de alocação de chaves seccionadoras no início ou no final de trechos, o número de atributos de um anticorpo do SIA passa a ser:

$$L = 2 * N_{te} + N_{tc}$$

No cálculo anterior de ' L ' para análises envolvendo a possibilidade de alocação de seccionadoras no início ou no final de trechos, $2 * N_{te}$ consiste no número de posições reservadas para os trechos existentes. No trecho da Figura 11 por exemplo, os subtrechos $k-s$ e $p-m$ são candidatos, enquanto que o trecho $s-p$ não, totalizando, portanto, duas posições para cada trecho original $k-m$, conforme formulação de ' L '. N_{tc} , por sua vez, é o número de posições reservadas a interconexões candidatas.

Figura 11 – Trecho k-m



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A parte 'B', por sua vez, codifica as decisões sobre as interconexões, em que o valor '0' significa ausência de interconexão no caminho candidato correspondente, e '1' indica construção da interconexão. A relação dos elementos da Parte 'A' com as variáveis de decisão introduzidas na metodologia proposta é feita a seguir:

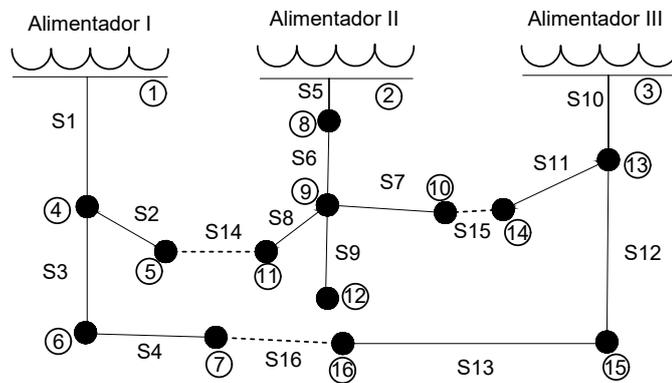
$X_i = 1, 2$ ou 3 , se $A'_i = 1$ (em que A'_i é a posição de um subtrecho de i , conforme estratégia para alocação no início ou final de trecho); caso contrário $X_i = 0$;

$Y_i = 1$ se $A_i = 2$; caso contrário $Y_i = 0$;

$Z_i = 1$ se $A_i = 3$; caso contrário $Z_i = 0$.

Para exemplificar, considera-se a rede de distribuição composta de três alimentadores de 23 kV, contendo 16 trechos, de [51], apresentada na Fig. 12. Considera-se os 4 trechos existentes do primeiro alimentador (S1, S2, S3 e S4) como candidatos à alocação de equipamentos ($N_{te} = 4$), e os dois caminhos tracejados 'S14' e 'S16' como candidatos à construção de interconexões ($N_{tc} = 2$).

Figura 12 – Exemplo: Sistema 16 barras



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Considerando o alimentador I

Tabela 8 – Solução candidata para o sistema de 16 barras, considerando o Alimentador I

S1	S2	S3	S4	S14	S16
3	2	0	1	0	1

Equipamentos Interconexão

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

De acordo com a codificação descrita para o problema de alocação ótima de equipamentos via SIA, a solução da Tabela 8 determina a alocação de um disjuntor e um fusível nos trechos S1 e S2, respectivamente. O algoritmo decidiu alocar duas chaves seccionadoras, sendo uma no final de S3 e outra no início de S4. Por fim, uma interconexão é indicada para construção no caminho candidato S16.

3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo apresentou a formulação matemática do problema de planejamento de equipamentos de manobra e de proteção em SDE. Da mesma forma, foram apresentados os fundamentos básicos da técnica meta-heurística bioinspirada SIA e sua aplicação através do algoritmo CLONR, utilizado nesta dissertação de forma adaptada ao problema de planejamento da confiabilidade. Os objetivos deste problema envolvem a minimização de custos de investimento e de confiabilidade, sujeita a restrições sobre a alocação de determinados tipos de equipamentos em trechos e alimentadores da rede. Estas restrições foram obtidas de referências e práticas adotadas na distribuição.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta alguns estudos de casos com o propósito de avaliar a metodologia proposta nesta dissertação para a alocação ótima de equipamentos de manobra e de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica, baseada na aplicação da técnica Sistema Imunológico Artificial. Os estudos são realizados utilizando-se dados de um sistema teste de confiabilidade denominado RBTS, disponibilizados com a intenção de fornecer uma base para métodos de análise de confiabilidade, incluindo assistidos por computador. Este sistema, amplamente conhecido e divulgado na literatura especializada, apresenta seis barramentos, dos quais cinco são barramentos de carga, Barra 2 a Barra 6, supridos por uma única Subestação, localizada na Barra 1, a partir de onze geradores e nove linhas. Os dados básicos e os resultados de confiabilidade encontram-se publicados nas referências [2] e [52].

4.2 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS

Nos estudos de caso apresentados nesse capítulo, são feitas as seguintes considerações:

- Os custos associados aos equipamentos de manobra e de proteção são apresentados na Tabela 9 [35].

Tabela 9 – Custos de equipamentos de manobra e proteção

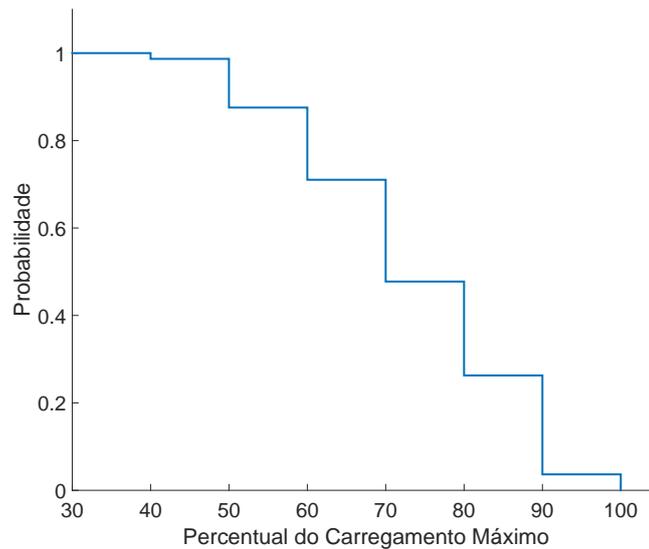
Equipamento	Custo (\$)
Chave Manual	2500,00
Chave Automática	4700,00
Fusível	1500,00
Disjuntor	6000,00

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

- O custo de construção de interconexões, retirado de [30], considera a distância do trecho construído (em km) e o custo unitário (\$/km) do trecho construído. Nesta dissertação, assim como em [30], considera-se a distância de 1,0 km para todos os caminhos candidatos e o valor unitário do trecho de \$ 2000,00. Adicionalmente, no caso de decisão pela construção da interconexão, inclui-se no custo o valor de uma chave de interconexão, \$2500,00 conforme [30].
- Como em [53], o estudo de caso considera o custo de manutenção anual de 2% do custo anual de investimento, o período de vida útil dos equipamentos de vinte anos e a taxa de juros de 8% ao ano.

- Uma curva de duração de carga incluindo sete patamares é considerada [19]. Em cada patamar, há um incremento de carga de 10%, variando de 40% a 100%, com as respectivas probabilidades 0,0132, 0,1114, 0,1651, 0,2328, 0,2147, 0,2263 e 0,0365. Esta curva é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Curva de duração de carga de sete patamares



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

- Os dados relacionados à Função de Dano ao Cliente são extraídos da Tabela 1 do Capítulo 2.
- Os dados essenciais de confiabilidade, como tipos de consumidores e cargas máxima e média em cada ponto, são fornecidos no decorrer deste capítulo. Já as taxas de falha e tempo médio de reparo dos vários componentes de distribuição, tais como transformadores e seções de alimentadores, são obtidos de [52], conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros históricos dos sistemas RBTS

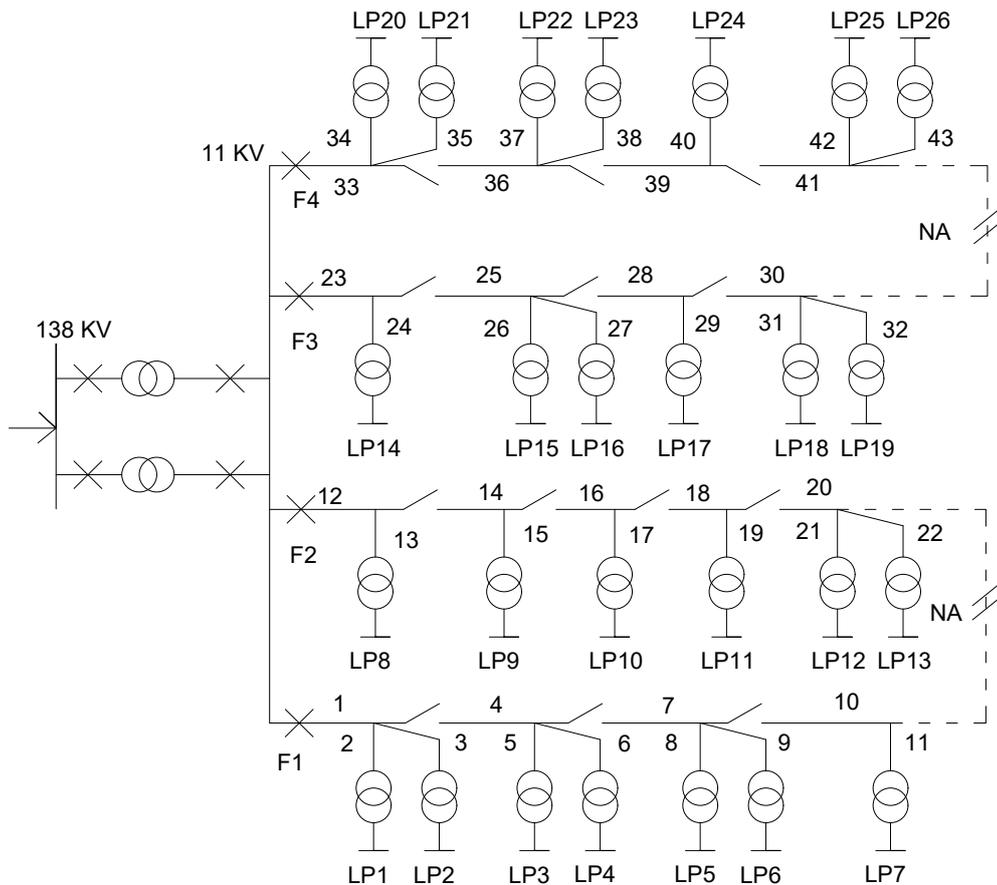
Parâmetros históricos de confiabilidade		
	Linhas aéreas 11 kV	Transformador 11/0,415 kV
Taxa anual de falha (falha/km.ano)	0,065	0,015
Tempo médio de reparo (h/falha)	5	200
Tempo médio de chaveamento (h)	1	1

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.2.1 Barramento 5 - RBTS5

O Barramento 5 do sistema RBTS é tipicamente urbano e composto por consumidores dos tipos residencial, governamental/institucional, escritório/edifícios e clientes comerciais. O pico de carga é de 20 MW. O diagrama unifilar deste barramento é mostrado na Figura 14.

Figura 14 – RBTS barramento 5



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Todos os disjuntores no sistema são identificados por 'X' e os alimentadores são operados de forma radial, porém estruturados em malha através de dois trechos de interconexão normalmente abertos (NA). Na ocorrência de contingência em algum alimentador, as interconexões permitem o restabelecimento de energia através de transferência de cargas para outros alimentadores. Os trechos de distribuição apresentam três comprimentos diferentes, 0,5, 0,65 e 0,8 km, conforme Tabela 11.

Os tipos de clientes, níveis de carga individuais médias e de pico, bem como o número de clientes, por ponto de carga, são apresentados na Tabela 12.

Tabela 11 – Comprimentos para as seções do sistema RBTS - Barramento 5

Comprimento de alimentador (km)	Número da secção do alimentador
0,5	1, 6, 9, 13, 14, 18, 21, 25, 27, 31, 35, 36, 39 e 42
0,65	4, 7, 8, 12, 15, 16, 19, 22, 26, 28, 30, 33, 37 e 40
0,8	2, 3, 5, 10, 11, 17, 20, 23, 24, 29, 32, 34, 38, 41 e 43

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 12 – Dados de consumidores do sistema RBTS - Barramento 5

Pontos de carga	Tipo de consumidor	Carga (pico - kW)	Carga (média - kW)	Número de consumidores
1, 2, 20 e 21	Residencial	762,5	426,9	210
4, 6, 15 e 25	Residencial	745,0	417,1	240
9, 10, 11, 13 e 26	Residencial	574,0	321,3	195
3, 5, 8, 17 e 23	Instalações do governo	1110,0	624,7	1
7, 14, 18, 22 e 24	Comercial	740,0	408,9	15
12, 16 e 19	Escritórios	616,7	378,6	1
		\sum 20000	\sum 11290	\sum 2858

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.2.1.1 RBTS5, Caso Base - Equipamentos apresentados em [2]

O Caso Base consiste na configuração de equipamentos de manobra e de proteção apresentada em [2] para o sistema em estudo. Esta configuração é apresentada na Tabela 13, que inclui os valores do indicador de confiabilidade ECOST, o custo de investimento e o custo total para a mesma.

Tabela 13 – Dados do Caso Base, RBTS5

	Quantidade	Localização
Chaves Seccionadoras Manuais	13	4, 7, 10, 14, 16, 18, 20, 25, 28, 30, 36, 39 e 41
Fusíveis	26	2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 22, 24, 26, 27, 29, 31, 32, 34, 35, 37, 38, 40, 42 e 43
Disjuntores	4	1, 12, 23 e 33
Trechos de Interconexão	2	(20 - 10) e (30 - 41)
ECOST [\$/ano]		240031,86
Custo Inv. [\$/ano]		11878,38
Custo Total [\$/ano]		251910,24

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Pode-se perceber que o sistema apresenta uma grande quantidade de equipamentos instalados, sendo quatro disjuntores localizados nas saídas dos alimentadores, ou seja, nos trechos '1', '12', '23' e '33'. Os fusíveis estão em todos os trechos laterais, enquanto que as chaves manuais situam-se em todos os trechos dos quatro alimentadores principais. O Caso Base dispõe ainda dos dois trechos de interconexão, chaves NA, que estão localizadas entre dois alimentadores e ligadas no final do trecho.

4.2.1.2 RBTS5, Análise-1

Esta subseção apresenta os resultados de alocação ótima de equipamentos no sistema RBTS5, conforme metodologia proposta, considerando a possibilidade de investimentos em chaves manuais, fusíveis, disjuntores e trechos de interconexão. Neste estudo, chaves manobráveis só são permitidas para alocação no início de trechos, mesma premissa do Caso Base. Os trechos representados por NA na Figura 14 consistem em caminhos candidatos à construção de interconexões, ou seja, não se encontram previamente alocados nesta análise. Os resultados para a solução ótima encontrada são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultado da Análise-1, RBTS5

	Quantidade	Localização
Chaves Seccionadoras Manuais	9	4, 7, 14, 18, 20, 25, 30, 36 e 41
Fusíveis	14	3, 6, 9, 15, 17, 19, 22, 24, 27, 32, 35, 38, 40 e 43
Disjuntores	19	1, 2, 5, 8, 10, 12, 13, 16, 21, 23, 26, 28, 29, 31, 33, 34, 37, 39 e 42
Trechos de Interconexão	2	(20 - 10) e (30 - 41)
ECOST [\$/ano]		229268,19
Custo Inv. [\$/ano]		18925,84
Custo Total [\$/ano]		248194,03

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

De acordo com a Tabela 14, o algoritmo proposto nesta dissertação alocou 19 disjuntores. Destes, quatro estão localizados nos trechos que saem da subestação. A metodologia proposta determina a substituição de quatro chaves situadas em alimentadores principais no Caso Base e de 11 fusíveis localizados em trechos laterais por disjuntores.

O trecho lateral '11' não recebeu alocação de equipamentos e diversos trechos laterais receberam fusíveis. As chaves manuais, por sua vez, foram alocadas em alguns

trechos de alimentadores principais. Por fim, o algoritmo proposto determinou a construção das duas interconexões candidatas.

Comparando com o Caso Base, percebe-se uma redução de 1,47% no custo total. Em relação ao custo dos danos causados aos consumidores, houve uma melhoria de 4,48%, devida em parte ao maior aporte de investimento em disjuntores.

4.2.1.3 RBTS5, Análise-2

Nesta análise, o propósito é avaliar os efeitos de se considerar dispositivos de manobra automáticos, inseridos no contexto de automação da SDE e *Smart Grids*, e pouco explorados em estudos da literatura especializada. O tempo de chaveamento deste equipamento é de 1,0 minuto e o custo de cada dispositivo é de \$ 4700,00. Os resultados apresentados na Tabela 15 são referentes a solução encontrada pelo SIA nesta análise.

Tabela 15 – Resultados da Análise-2, RBTS5

	Quantidade	Localização
Chaves Seccionadoras Automáticas	9	4, 7, 16, 18, 28, 30, 36, 39 e 41
Fusíveis	13	3, 6, 9, 15, 17, 19, 22, 27, 32, 35, 38, 40 e 43
Disjuntores	17	1, 2, 5, 8, 10, 12, 13, 21, 23, 24, 26, 29, 31, 33, 34, 37 e 42
Trechos de Interconexão	2	(20 - 10) e (30 - 41)
ECOST [\$/ano]	229182,94	
Custo Inv. [\$/ano]	19641,95	
Custo Total [\$/ano]	248824,59	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A solução obtida nesta análise tem o custo um pouco superior a proposta anterior, o que justifica, pela qualidade é a automação. As chaves automáticas, apesar de mais caras do que as manuais, apresentam melhor relação custo-benefício devido ao seu maior benefício em termos de melhoria do indicador de confiabilidade, ECOST, haja vista seu tempo de manobra, 1,0 minuto, ser bem inferior ao tempo de manobra de uma chave manual, 1,0 hora conforme Tabela 10. Este estudo aponta, portanto, a automação de SDE como alternativa promissora para os sistemas modernos. Ainda, a redução de custos devido a avanços tecnológicos, aliada ao aumento no rigor de regulação por parte das agências do setor elétrico quanto ao serviço de distribuição de energia, tenderá a aumentar a automação das redes elétricas. Nove chaves automáticas, 13 fusíveis e nove disjuntores

foram alocados. Adicionalmente, as duas interconexões candidatas foram construídas. A redução em relação ao custo total, comparado com o Caso Base, é de 1,22%.

4.2.1.4 RBTS5, Análise-3

Esta análise visa prover um estudo de comparação com uma referência da literatura [1], a fim de avaliar a eficácia da metodologia de alocação ótima proposta nesta dissertação. Para tanto, considera-se a alocação ótima de chaves manuais, fusíveis e disjuntores. Ainda, com o propósito de realizar uma comparação adequada, os custos utilizados nesta análise são obtidos de [1], conforme 16, e os trechos de interconexão são considerados como já existentes.

Tabela 16 – Custos de equipamentos de manobra e proteção de [1]

Equipamento	Custo (\$)
Disjuntor	3771
Chave Manual	1553
Fusível	1358

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A Tabela 17 apresenta a solução ótima obtida por [1]. Uma consideração importante a se fazer é que o artigo citado não forneceu o horizonte de planejamento. Deste modo, adotou-se na presente dissertação três horizontes de planejamento, 5, 10 e 20 anos para fins de comparação com a referida referência. Desta forma, os custos associados à solução encontrada pela referência foram obtidos através do modelo de cálculo de confiabilidade desenvolvido na presente dissertação. Os resultados da metodologia proposta baseada em SIA são apresentados na Tabela 18, em que 'Q.' significa 'Quantidade de equipamentos'.

Tabela 17 – Resultados do artigo para diferentes horizontes de planejamento

	Quantidade	Localização	
Chaves Seccionadoras Manuais	4	7, 20, 28 e 33	
Fusíveis	24	2, 3, 5, 6, 8, 9, 13, 15, 17, 19, 21, 22, 24, 26, 27, 29, 31, 34, 35, 37, 38, 40, 42 e 43	
Disjuntores	4	1, 11, 12, 23, 32 e 33	
Trechos de Interconexão	2	(20 - 10) e (30 - 41)	
Horizontes de planejamento [anos]			
	5	10	20
ECOST [\$ /ano]	250500,20		
Custo Inv. [\$ /ano]	17187,10	10631,32	8403,60
Custo Total [\$ /ano]	267687,30	261131,52	258903,80

Tabela 18 – Resultados do SIA para diferentes horizontes de planejamento

	Horizontes de planejamento [anos]					
	5		10		20	
	Q.	Localização	Q.	Localização	Q.	Localização
Chaves Seccionadoras Manuais	9	4, 7, 14, 18, 20, 28, 30, 36 e 41	8	4, 14, 18, 20, 25, 30, 36 e 41	8	4, 14, 18, 20, 25, 30, 36 e 41
Fusíveis	14	3, 6, 9, 15, 17, 19, 22, 24, 27, 32, 35, 38, 40 e 43	12	3, 6, 9, 15, 17, 19, 22, 24, 32, 35, 38, 40 e 43	11	3, 6, 9, 15, 19, 22, 27, 32, 35, 38 e 43
Disjuntores	18	1, 2, 5, 8, 10, 12, 13, 16, 21, 23, 26, 29, 31, 33, 34, 37, 39 e 42	22	1, 2, 5, 7, 8, 10, 12, 13, 16, 17, 21, 23, 24, 26, 28, 29, 31, 33, 34, 37, 39 e 42	24	1, 2, 5, 7, 8, 10, 12, 13, 16, 17, 21, 23, 24, 26, 28, 29, 31, 33, 34, 37, 39 e 42
Trechos de Interconexão	2	(20 - 10) e (30 - 41)	2	(20 - 10) e (30 - 41)	2	(20 - 10) e (30 - 41)
ECOST [\$/ano]	230070,58		228090,87		227324,07	
CustoInv. [\$/ano]	25897,31		17586,26		14599,86	
Custo Total [\$/ano]	255967,88		245677,12		241923,93	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

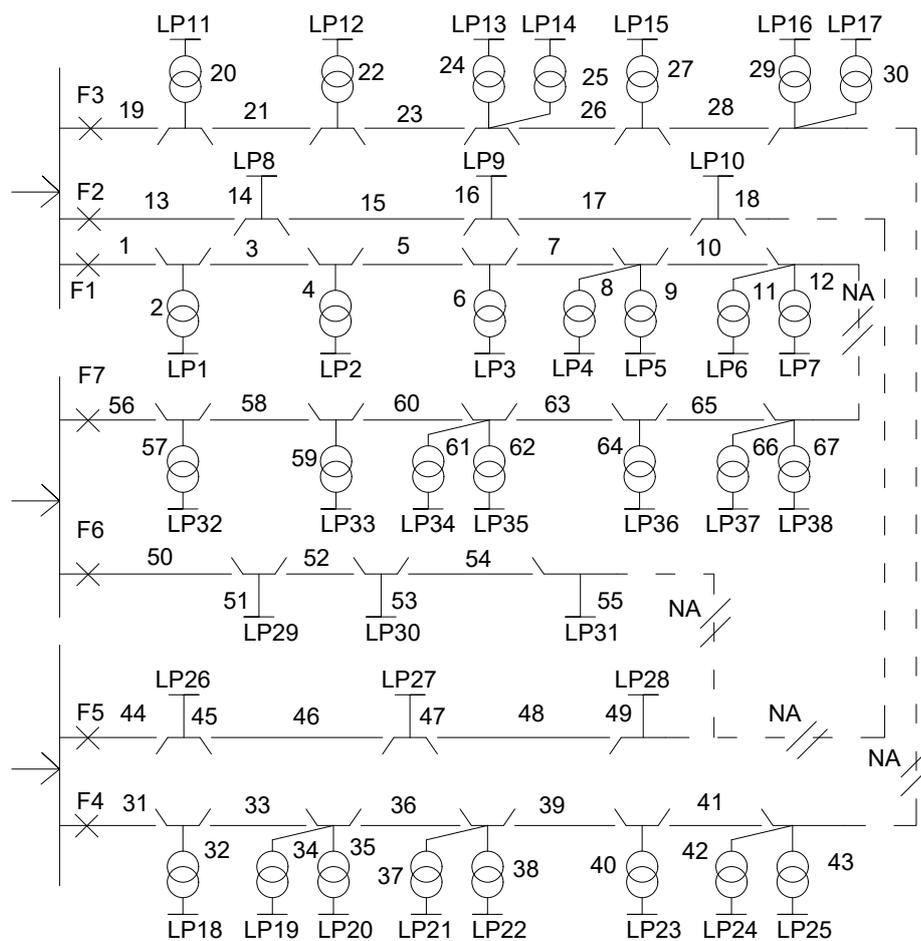
Observa-se que, para os três horizontes de planejamento, o algoritmo proposto nesta dissertação obteve resultados mais favoráveis do que os da literatura [1], considerando-se as premissas efetuadas anteriormente sobre o horizonte de planejamento. Os custos de investimento do SIA são maiores, porém os valores de custo total e de ECOST são menores para todos os horizontes. Isto se deve à alocação ótima dos dispositivos de proteção obtida pelo SIA.

Conclui-se que quanto maior o horizonte de planejamento, maior é o número de disjuntores presentes no sistema conforme solução ótima, visto que este equipamento promove uma melhoria considerável na confiabilidade de SDE.

4.2.2 Barramento 4 - RBTS4

O sistema RBTS4 tem pico de carga total de 40 MW e apresenta uma configuração do tipo urbana compreendendo clientes residenciais, industriais, comerciais e governamentais/institucionais. A Figura 15 apresenta o diagrama deste sistema, cujos alimentadores são operados de forma radial, como quatro trechos de interconexão ou normalmente abertos.

Figura 15 – RBTS barramento 4.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os trechos dos alimentadores principais e secundários apresentam três comprimentos diferentes, 0,6, 0,75 e 0,8 km, conforme 19. Os números e tipos de clientes, bem como os níveis de carga individuais médias e de pico, são dados na 20.

Tabela 19 – Comprimento de seções dos alimentadores do sistema RBTS4

Comprimento (km)	Número da secção do alimentador
0,6	2, 6, 10, 14, 17, 21, 25, 28, 30, 34, 38, 41, 43, 46, 49, 51, 55, 58, 61, 64 e 67
0,75	1, 4, 7, 9, 12, 16, 19, 22, 24, 27, 29, 32, 35, 37, 40, 42, 45, 48, 50, 53, 56, 60, 63 e 65
0,8	3, 5, 8, 11, 13, 15, 18, 20, 23, 26, 31, 33, 36, 39, 44, 47, 52, 54, 57, 59, 62 e 66

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 20 – Dados de consumidores do sistema RBTS4

Pontos de carga, LP	Tipo de consumidor	Carga (pico - kW)	Carga (média - kW)	Número de consumidores
1, 2, 3, 4, 11, 12, 13, 18, 19, 20, 21, 32, 33, 34 e 35	Residencial	886,9	545,0	220
5, 14, 15, 22, 23, 36 e 37	Residencial	813,7	500,0	200
8, 10, 26, 27, 28, 29 e 30	Pequenos Usuários	1630,0	1000,0	1
9 e 31	Pequenos Usuários	2445,0	1500,0	1
6, 7, 16, 17, 24, 25 e 38	Comercial	671,4	415,0	10
		\sum 40000,0	\sum 24580,0	\sum 4779

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.2.2.1 RBTS₄, Análise-1

Para fins de comparação, usou-se um artigo da literatura [19], cuja proposta é alocar apenas chaves seccionadoras manuais, ao custo de \$ 20,377.00 cada, ou seja, determinar o número e a localização destes equipamentos, com o objetivo de minimização dos custos de interrupção, investimento e manutenção, conforme equação 3.1.

A Tabela 21 apresenta os resultados obtidos pela metodologia proposta, confrontados com os dados do Caso Base [2] e os obtidos na literatura [19]. Nesta tabela, 'I' significa início de trecho, 'F' final de trecho e 'A' chaves em ambos os terminais.

Na solução da literatura [19], no total 14 chaves são alocadas, enquanto a metodologia proposta nesta dissertação determina apenas oito chaves para alocação. Em relação ao Caso Base [ref.], a solução de [19] apresenta redução no custo total de 18,7 %, enquanto que o algoritmo proposto resulta em maior redução, 29,22 %. Verifica-se, portanto, uma alocação mais estratégica via metodologia proposta, com menor custo de energia não suprida, através da priorização de pontos de carga de maior importância e, portanto, de maior dano causado por interrupção.

Tabela 21 – Resultados Análise-1, RBTS4

	[19]		Metodologia Proposta		Caso Base	
	Q.	Localização	Q.	Localização	Q.	Localização
Chaves Seccionadoras Manuais	14	10F, 15F, 17I, 28F, 36I, 41F, 46F, 48F, 52I, 54F, 58F, 60I, 63I e 65I	8	5I, 15I, 23I, 36I, 54I, 60I, 65I e 48F	51	1F, 3A, 5A, 7A, 10A, 13F, 15A, 17A, 19F, 21A, 23A, 26A, 28A, 31F, 33A, 36A, 39A, 41A, 44F, 46A, 48A, 50F, 52A, 54A, 56F, 58A, 60A, 63A e 65A
Fusíveis	38	2, 4, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 25, 27, 29, 30, 32, 34, 35, 37, 38, 40, 42, 43, 45, 47, 49, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 62, 64, 66 e 67	38	2, 4, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 25, 27, 29, 30, 32, 34, 35, 37, 38, 40, 42, 43, 45, 47, 49, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 62, 64, 66 e 67	38	2, 4, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 25, 27, 29, 30, 32, 34, 35, 37, 38, 40, 42, 43, 45, 47, 49, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 62, 64, 66 e 67
Disjuntores	7	1I, 12I, 19I, 31I, 44I, 50I e 56	7	1I, 12I, 19I, 31I, 44I, 50I e 56	7	1I, 12I, 19I, 31I, 44I, 50I e 56
Trechos de Interconexão	4	(28 - 41), (17 - 48), (54 - 48) e (10 - 65)	4	(28 - 41), (17 - 48), (54 - 48) e (10 - 65)	4	(28 - 41), (17 - 48), (54 - 48) e (10 - 65)
ECOST [\$ /ano]		184489,29		170254,14		148773,17
Custo Inv. [\$ /ano]		32363,52		18493,44		117895,69
Custo Total [\$ /ano]		216852,81		188747,58		266668,85

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.2.2.2 RBTS₄, Análise-2

Esta análise visa avaliar a alocação de chaves manuais juntamente com dispositivos de proteção, disjuntores e fusíveis, no sistema RBTS₄. Para tanto, compara-se os resultados da referência [35] com os obtidos pelo método proposto. A curva de duração de carga de sete patamares da Figura 13 é desconsiderada nesta análise, sendo contemplado apenas o nível de 100 % do carregamento máximo, haja vista que a referência de comparação também considera apenas este nível. Os resultados da alocação dos dispositivos de manobra e proteção são mostrados na Tabela 22. A solução proposta nesta dissertação apresenta o melhor resultado em termos de custo total, devido à inclusão de dois disjuntores no início dos trechos '39' e '48'.

Tabela 22 – Resultados Análise-2, RBTS4

	[35]		Metodologia Proposta		Caso Base	
	Q.	Localização	Q.	Localização	Q.	Localização
Chaves Seccionadoras Manuais	14	5F, 10I, 15I, 17I, 21I, 26I, 36I, 39I, 46I, 48I, 52I, 54I, 60I e 63I	47	1F, 3A, 5A, 7A, 10A, 13F, 15A, 17A, 19F, 21A, 23A, 26A, 28F, 31F, 33A, 36A, 39F, 41A, 44F, 46A, 48F, 50F, 52A, 54A, 56F, 58F, 60A, 63A E 65A	51	1F, 3A, 5A, 7A, 10A, 13F, 15A, 17A, 19F, 21A, 23A, 26A, 28A, 31F, 33A, 36A, 39A, 41A, 44F, 46A, 48A, 50F, 52A, 54A, 56F, 58A, 60A, 63A E 65A
Fusíveis	38	2, 4, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 25, 27, 29, 30, 32, 34, 35, 37, 38, 40, 42, 43, 45, 47, 49, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 62, 64, 66 e 67	36	2, 4, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 25, 27, 29, 30, 32, 34, 35, 37, 38, 40, 42, 43, 45, 47, 51, 53, 57, 59, 61, 62, 64, 66 e 67	38	2, 4, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 25, 27, 29, 30, 32, 34, 35, 37, 38, 40, 42, 43, 45, 47, 49, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 62, 64, 66 e 67
Disjuntores	7	1I, 12I, 19I, 31I, 44I, 50I e 56	9	1I, 12I, 19I, 31I, 39I, 44I, 48I, 50I e 56I	7	1I, 12I, 19I, 31I, 44I, 50I e 56
Trechos de Interconexão	4	(28 - 41), (17 - 48), (54 - 48) e (10 - 65)	4	(28 - 41), (17 - 48), (54 - 48) e (10 - 65)	4	(28 - 41), (17 - 48), (54 - 48) e (10 - 65)
ECOST [\$/ano]		257849,97		216140,42		216345,65
Custo Inv. [\$/ano]		18696,11		29950,67		30073,67
Custo Total [\$/ano]		276546,07		246091,09		246419,32

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.2.2.3 RBTS₄, Análise-3

Esta análise tem como propósito um estudo sobre a alocação de dispositivos de proteção, disjuntores e fusíveis, juntamente com chaves seccionadoras automáticas, para o sistema RBTS₄, utilizando-se como base de comparação a referência [35]. A Tabela 23 apresenta os resultados, em que se pode observar uma decisão mais estratégica via metodologia proposta, com melhoria de 11,01% em relação à referência de comparação. No resultado via método proposto, o dano ao consumidor é reduzido em aproximadamente 15,45%.

Tabela 23 – Resultado Análise-3, RBTS4

	[35]		Metodologia Proposta	
	Q.	Localização	Q.	Localização
Chaves Seccionadoras Automáticas	15	5I, 10I, 15I, 17I, 21I, 26I, 33F, 36F, 39I, 41F, 48I, 52I, 54I, 60I e 63I	48	1F, 3A, 5A, 7A, 10A, 13F, 15A, 17A, 19F, 21I, 23A, 26I, 28A, 31F, 33A, 36A, 39A, 41A, 44F, 46A, 48A, 50F, 52A, 54A, 56F, 58I, 60A, 63A e 65A
Fusíveis	38	2, 4, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 25, 27, 29, 30, 32, 34, 35, 37, 38, 40, 42, 43, 45, 47, 49, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 62, 64, 66 e 67	33	2, 4, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 20, 24, 25, 27, 29, 30, 32, 34, 35, 37, 38, 40, 42, 43, 45, 47, 51, 57, 59, 61, 62, 64, 66 e 67
Disjuntores	7	1I, 12I, 19I, 31I, 44I, 50I e 56	7	1I, 12I, 19I, 31I, 44I, 50I e 56I
Trechos de Interconexão	4	(28 - 41), (17 - 48), (54 - 48) e (10 - 65)	4	(28 - 41), (17 - 48), (54 - 48) e (10 - 65)
ECOST [\$/ano]		254909,58		215522,86
Custo Inv. [\$ano]		19003,61		28228,66
Custo Total [\$/ano]		273913,19		243751,52

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.2.3 Barramento 3 - RBTS3

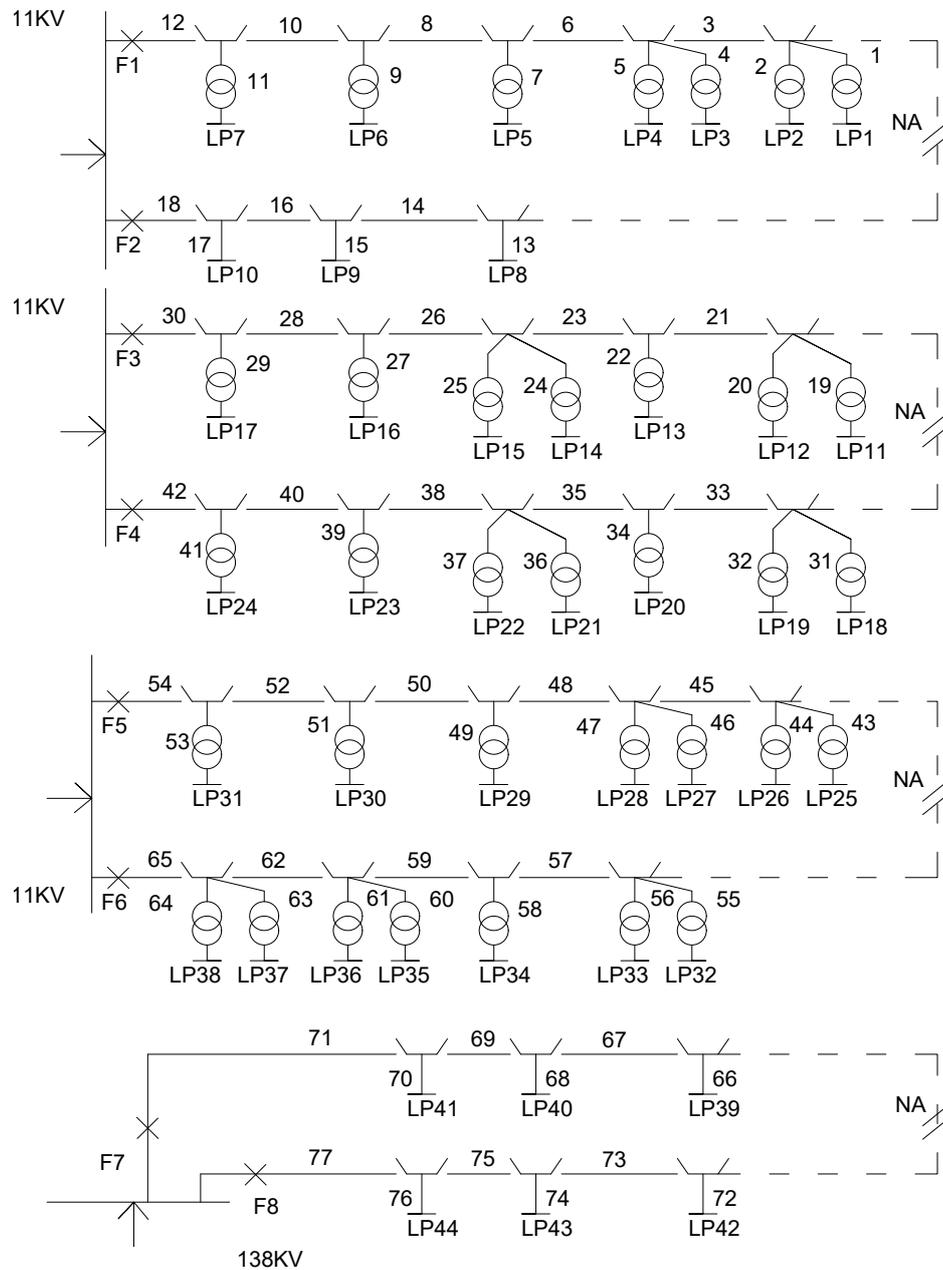
Este sistema, de [2] e ilustrado na Figura 16, atende a consumidores industriais, escritórios, clientes residenciais e comerciais, com pico de carga de 85 MW. A Tabela 24 informa os comprimentos dos trechos, enquanto que a Tabela 25 apresenta os dados dos consumidores.

Tabela 24 – Comprimentos de seções dos alimentadores do sistema RBTS3

Comprimento (km)	Número da secção do alimentador
0,6	1, 2, 3, 7, 11, 12, 15, 21, 22, 29, 30, 31, 36, 40, 42, 43, 48, 49, 50, 56, 58, 61, 64, 67, 70, 72 e 76
0,8	4, 8, 9, 13, 16, 19, 20, 25, 26, 32, 35, 37, 41, 46, 47, 51, 53, 57, 60, 62, 65, 68, 71, 75 e 77
0,9	5, 6, 10, 14, 17, 18, 23, 24, 27, 28, 33, 34, 38, 39, 44, 45, 52, 54, 55, 59, 63, 66, 69, 73 e 74

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 16 – RBTS barramento 3



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.2.3.1 RBTS3, Análise-1

Para este caso de estudo, não se encontrou na literatura uma referência para comparação em termos de alocação ótima de equipamentos de manobra e de proteção. Portanto, esta análise consiste em avaliar a metodologia proposta quanto à alocação de chaves seccionadoras automáticas, equipamentos de proteção e trechos de interconexão, através de comparação com o Caso Base, ou seja, a configuração de equipamentos inicialmente

Tabela 25 – Dados de consumidores do sistema RBTS3

Ponto de carga, LP	Tipo de consumidor	Carga (pico - kW)	Carga (média - kW)	Número de consumidores
1, 4, 5, 6, 7, 20, 24, 32 e 36	Residencial	836,7	468,4	250
11, 12, 13, 18 e 25	Residencial	850,0	475,8	230
2, 15, 26 e 30	Residencial	775,0	433,9	190
39, 40 e 44	Grandes Consumidores	6916,7	4388,6	1
41, 42 e 43	Grandes Consumidores	11583,3	7349,6	1
8, 9 e 10	Pequenas Industrias	1016,7	847,2	1
3, 16, 17, 19, 28, 29, 31, 37 e 38	Comercial	522,2	288,6	15
14 e 27	Escritórios	925,0	568,0	1
		\sum 85000,0	\sum 52630,0	\sum 5805

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

apresentada em [2]. A Tabela 26 apresenta os resultados obtidos e os dados do Caso Base, em que se pode verificar uma melhoria de 3,19% no custo total através da metodologia proposta.

Tabela 26 – Resultados Análise-1, RBTS3

	Caso Base		SIA	
	Q.	Localização	Q.	Localização
Chaves Seccionadoras Manuais	58	3A, 6A, 8A, 10A, 12F, 14A, 16A, 18F, 21A, 23A, 26A, 28A, 30F, 33A, 35A, 38A, 40A, 42F, 45A, 48A, 50A, 52A, 54F, 57A, 59A, 62A, 65F, 67A, 69A, 71F, 73A, 75A e 77F	27	10A, 6F, 3F, 18F, 16I, 14F, 28I, 26F, 21F, 40F, 38F, 33F, 52F, 50I, 48F, 45A, 62A, 57F, 71F, 69F, 67F, 77F, 75F e 73F
Fusíveis	44	1, 2, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 20, 22, 24, 25, 27, 29, 31, 32, 34, 36, 37, 39, 41, 43, 44, 46, 47, 49, 51, 53, 55, 56, 58, 60, 61, 63, 64, 66, 68, 70, 72, 74 e 76	41	1, 2, 4, 5, 7, 9, 11, 15, 17, 19, 20, 22, 24, 25, 27, 29, 31, 32, 34, 36, 37, 39, 41, 43, 44, 46, 47, 49, 51, 53, 55, 56, 58, 60, 61, 63, 64, 68, 70, 74 e 76
Disjuntores	8	12I, 18I, 30I, 42I, 54I, 65I, 71I e 77I	17	8I, 12I, 14I, 18I, 30I, 23I, 42I, 35I, 54I, 59I, 65I, 69I, 67I, 71I, 77I, 75I e 73I
Trechos de Interconexão	4	(1 - 13), (19 - 31), (43 - 55) e (66 - 72)	4	(1 - 13), (19 - 31), (43 - 55) e (66 - 72)
ECOST [\$/ano]		179522,13		175964,73
Custo Inv. [\$/ano]		31547,26		28358,36
Custo Total [\$/ano]		211069,38		204323,09

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.2.3.2 *RBTS3, Análise-2*

Esta análise tem por objetivo um estudo adicional sobre o SDE e as opções de configuração ótima de equipamentos de manobra e proteção via metodologia proposta, com ausência de interconexões entre os alimentadores. Para comparação, considera-se o Caso Base de [2] também sem interconexões entre seus alimentadores principais. Os resultados são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Resultados Análise-2, RBTS3

	Caso Base		Metodologia Proposta	
	Q.	Localização	Q.	Localização
Chaves Seccionadoras Manuais	58	3A, 6A, 8A, 10A, 12F, 14A, 16A, 18F, 21A, 23A, 26A, 28A, 30F, 33A, 35A, 38A, 40A, 42F, 45A, 48A, 50A, 52A, 54F, 57A, 59A, 62A, 65F, 67A, 69A, 71F, 73A, 75A e 77F	3	10I, 50I e 45I
Fusíveis	44	1, 2, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 20, 22, 24, 25, 27, 29, 31, 32, 34, 36, 37, 39, 41, 43, 44, 46, 47, 49, 51, 53, 55, 56, 58, 60, 61, 63, 64, 66, 68, 70, 72, 74 e 76	41	1, 2, 4, 5, 7, 9, 11, 15, 17, 19, 20, 22, 24, 25, 27, 29, 31, 32, 34, 36, 37, 39, 41, 43, 44, 46, 47, 49, 51, 53, 55, 56, 58, 60, 61, 63, 64, 68, 70, 74 e 76
Disjuntores	8	12I, 18I, 30I, 42I, 54I, 65I, 71I e 77I	17	6I, 12I, 14I, 18I, 30I, 23I, 42I, 35I, 54I, 59I, 65I, 69I, 67I, 71I, 77I, 75I e 73I
Trechos de Interconexão	0		0	
ECOST [\$ano]		251285.43		246219,08
Custo Inv. [\$ano]		29497.25		19475,02
Custo Total [\$ano]		280782.69		265694,10

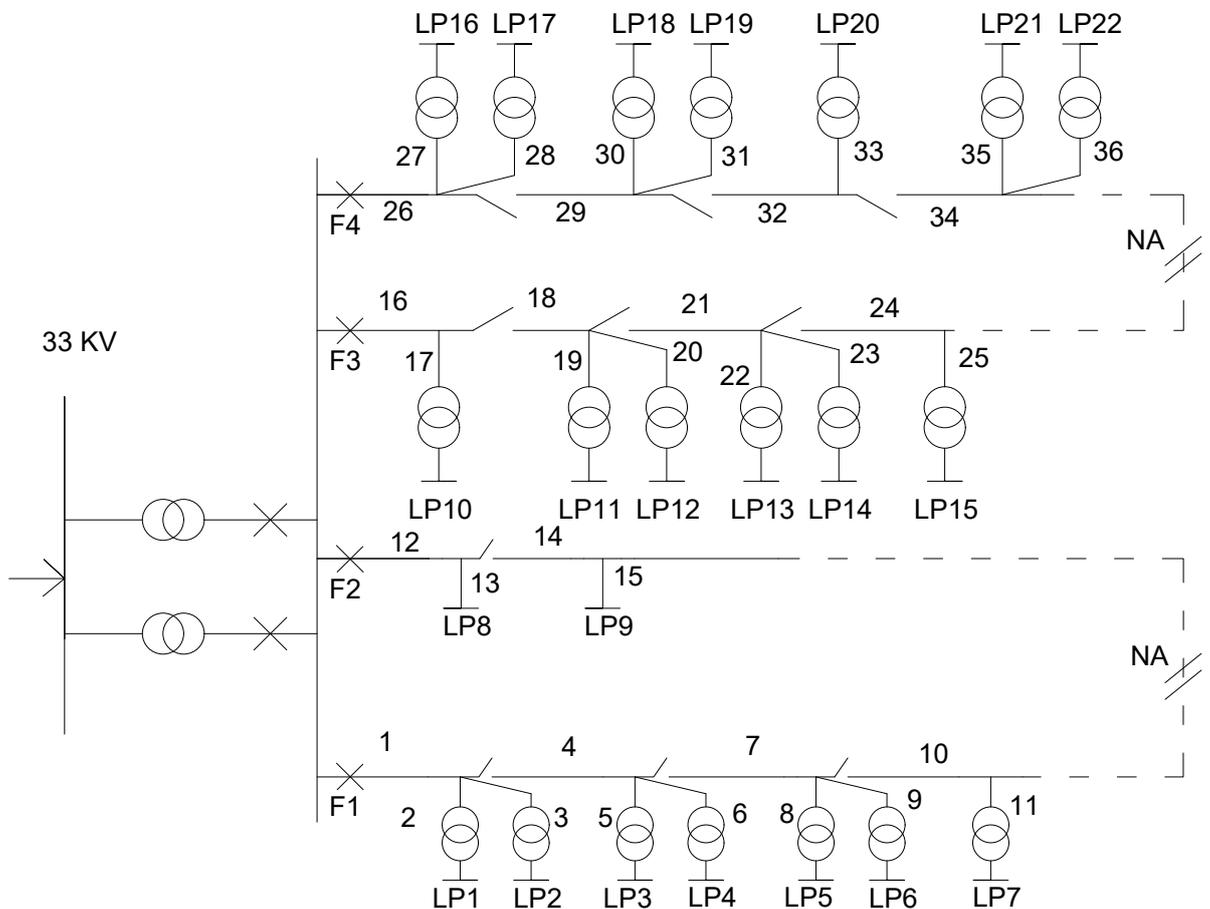
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Através deste estudo, constata-se que a ausência de interconexões entre alimentadores principais eleva significativamente os custos totais do planejamento, confirmando a importância destes recursos em SDE. Nestas condições, o algoritmo proposto nesta dissertação priorizou a alocação de equipamentos de proteção ao investimento em chaves de manobra, haja vista que a efetividade destas chaves na ausência do recurso de interconexão é reduzida.

4.2.4 Barramento 2 - RBTS2

O barramento 2 do sistema teste RTBS, de [52], consiste em uma rede de distribuição tipicamente urbana, composta por consumidores dos tipos residencial, governamental/institucional, escritório/edifícios e clientes comerciais. O diagrama unifilar deste sistema, cujo pico de carga é 20 MW, é apresentado na Figura 17. Os comprimentos dos trechos dos alimentadores principais e secundários são mostrados na Tabela 28 e a Tabela 29 apresenta os números e tipos de clientes, além dos níveis de carga individuais médias e de pico.

Figura 17 – RBTS barramento 2



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.2.4.1 Estudo do índice de confiabilidade ASAI

A análise conduzida para este caso consiste no planejamento de dispositivos de manobra e de proteção em SDE guiado por um indicador alternativo de confiabilidade, a fim de avaliar a eficácia da metodologia proposta nesta dissertação quanto à otimização de outros indicadores. A referência [27], que utiliza o mesmo indicador, é utilizada para

Tabela 28 – Comprimento de seções dos alimentadores do sistema RBTS2

Comprimento (km)	Número da seção do alimentador
0,6	2, 6, 10, 14, 17, 21, 25, 28, 30 e 34
0,75	1, 4, 7, 9, 12, 16, 19, 22, 24, 27, 29, 32 e 35
0,8	3, 5, 8, 11, 13, 15, 18, 20, 23, 26, 31, 33 e 36

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 29 – Dados de consumidores do sistema RBTS2

Pontos de carga, LP	Tipo de consumidor	Carga (pico - kW)	Carga (média - kW)	Número de consumidores
1, 2, 3, 10 e 11	Residencial	866,8	535,0	210
12, 17, 18 e 19	Residencial	729,1	450,0	200
8	Pequenos Usuários	1627,9	1000,0	1
9	Pequenos Usuários	1872,1	1150,0	1
4, 5, 13, 14, 20 e 21	Grandes Consumidores	916,7	566,0	1
6, 7, 15, 16 e 22	Comercial	750,0	454,0	10
		\sum 20000,0	\sum 12291,0	\sum 1908

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

comparação. O indicador em questão é o índice de disponibilidade média de serviço, *Average Service Availability Index*, ou ASAI, introduzido no Capítulo 2, e os recursos de investimento são chaves seccionadoras manuais e interconexões, nas mesmas condições de [27].

A referência [27], ao contrário dos estudos anteriores, preestabelece os números de equipamentos. Esta referência apresenta planos de obras para os números fixos de 4, 5 e 6 chaves seccionadoras, e para números de interconexões fixos em 0, 1 e 2, totalizando, portanto, 9 planos, um para cada combinação de números fixos de chaves e interconexões. Portanto, a proposta é otimizar apenas os locais a receber os recursos, haja vista que os números são prefixados em diferentes análises. As mesmas condições foram adotadas nesta dissertação para o sistema RBTS2 para fins de comparação.

Destaca-se que soluções de boa qualidade são aquelas que aproximam o indicador ASAI de '1'. Como este índice varia de '0' a '1', a função objetivo do modelo de otimização, neste estudo particular, consiste na maximização de ASAI através da determinação de locais ótimos para a alocação de chaves de manobra e interconexões. As restrições do problema de planejamento são as mesmas consideradas para os demais casos.

A Tabela 30 apresenta os resultados obtidos pela metodologia proposta baseada em SIA, juntamente com os da referência de comparação. Apenas uma combinação não foi possível de se comparar, devido a uma inconsistência nos dados obtidos da referência: o

sistema apresenta 36 trechos candidatos e, segundo a referência, há alocações nos trechos '66' e '70 para esta combinação. Deste modo, foi possível comparar os resultados da metodologia proposta para oito combinações de números fixos de chaves e interconexões.

As linhas da Tabela 30 apresentam resultados para números fixos de chaves (4, 5 e 6), enquanto que as colunas referem-se a números fixos de interconexões (0, 1 ou 2). Nas linhas de 'Localização', os dados entre colchetes '[']' referem-se aos números dos trechos em que chaves são alocadas e os dados entre parênteses são relativos às interconexões.

Tabela 30 – Resultados RBTS2

			0	1	2
4	[27]	Localização	[3, 7, 21 e 32]	[13, 17, 66, 70] (5 - 31)	[4,21, 32, 34] (8, 30) (25, 35)
		ASAI	0.999562067025855	–	0.999567730873342
	SIA	Localização	[4, 7, 21 e 32]	[4, 21, 29 e 32] (25 35)	[4,21, 29 e 32] (11 15) (25 35)
		ASAI	0.999568738885748	0.999572314374198	0.999575021074178
5	[27]	Localização	[3, 7, 21, 29, 32]	[7, 10, 24, 32, 34] (5 - 33)	[4, 7, 21, 32, 34] (5 - 31, 25-35)
		ASAI	0.999564517056009	0.999559211768491	0.999572406930893
	SIA	Localização	[4, 7, 18, 21 e 32]	[4,18, 21, 29 e 32] (25 35)	[4,18, 21, 29 e 32] (11 15) (25 35)
		ASAI	0.999571352251246	0.999579711131902	0.999582417831882
6	[27]	Localização	[3, 7, 18, 21, 29 e 32]	[4, 14, 21, 24, 32 e 34] (25-35)	[4, 7, 21, 29, 32, 34] (11 15) (25 35)
		ASAI	0.999567130421507	0.999565150174912	0.999579834800091
	SIA	Localização	[4, 7, 18, 21, 29 e 32]	[4, 7, 18, 21, 29 e 32] (25-35)	[4, 7, 18, 21, 29 e 32] (11 15) (25 35)
		ASAI	0.999573802281400	0.999584142186438	0.999587093889433

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Observa-se na Tabela 30 que a metodologia proposta determina soluções de melhor qualidade, ou seja, de maior indicador ASAI, para todas as combinações em que foi possível realizar a comparação com [27]. À medida em que se aumenta o número de chaves seccionadoras, melhora-se o indicador de confiabilidade, conforme esperado, pois estes recursos reduzem o tempo de interrupção aos consumidores. O mesmo raciocínio pode ser estendido para as interconexões. Portanto, o melhor resultado obtido é aquele em que se aloca seis recursos, sendo quatro chaves de manobra e duas interconexões, resultando em um ASAI de 0.9995871.

4.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo apresentou resultados obtidos com alguns sistemas de distribuição amplamente divulgados na literatura especializada em estudos de confiabilidade. Diversas análises foram conduzidas, a fim de se avaliar o comportamento da metodologia proposta mediante diferentes indicadores e alternativas de investimentos em recursos diversos. Em se tratando de uma técnica meta-heurística, não se pode garantir o ponto ótimo global de solução de forma generalizada para qualquer caso. No entanto, para os casos testados nesta dissertação, a metodologia proposta conduziu aos melhores resultados em todos os estudos.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação apresentou uma proposta de alocação ótima de dispositivos de manobra e proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica, no âmbito do planejamento da expansão destes sistemas, fase de definição da confiabilidade. O objetivo buscado foi minimizar os custos totais de planejamento, que incluem os custos associados à interrupção de energia aos consumidores durante um horizonte de operação, bem como os custos de investimento em diferentes opções de equipamentos.

Durante os estudos e revisão bibliográfica realizados, pode-se constatar a importância do problema de planejamento de SDE de forma assistida por sistemas computacionais aliados a modelos matemáticos adequados para o tratamento das diversas e complexas características do problema proposto. O grande número de alternativas de expansão e investimento inviabiliza a avaliação exaustiva de todas as opções possíveis, reforçando a importância anteriormente mencionada. A revisão também permitiu identificar os principais indicadores de confiabilidade de redes de distribuição, através dos quais este requisito pode ser convenientemente avaliado. A presente dissertação baseou-se na utilização do indicador de custo de interrupção aos consumidores, uma vez que o objetivo global do problema de planejamento é a redução dos custos totais.

Para alcançar um planejamento eficiente, com razoabilidade de custo e qualidade, as opções de investimento devem focar-se na determinação estratégica de pontos da rede elétrica para a alocação de equipamentos, tanto de manobra, quanto de proteção. Dado que o problema geral de alocação envolve variáveis discretas associadas às muitas opções de localização, tipo e número de equipamentos, uma técnica meta-heurística bioinspirada foi proposta para aplicação na dissertação, uma vez que problemas com as características citadas criam ambiente propício para tais técnicas. Mais especificamente, a técnica denominada Sistemas Imunológicos Artificiais, baseada no sistema imune adaptativo de animais vertebrados, foi proposta para utilização. A escolha desta técnica deveu-se à possibilidade de aplicação de um algoritmo já adaptado para representar restrições de redes de distribuição e fundamentado na referida técnica. Além disto, a aplicação deste algoritmo ao problema de planejamento da confiabilidade proposto, considerando-se todas as opções de investimento contempladas nesta dissertação, é inédita, o que caracteriza aspecto inovador da contribuição.

A metodologia desenvolvida aliou o algoritmo de sistema imune artificial, para as decisões ótimas de investimento, com um modelo de cálculo de confiabilidade, desenvolvido durante a realização desta dissertação com base em referências tradicionais e reconhecidas da literatura. Este modelo foi exaustivamente testado à luz de comparações com as referências citadas, com o propósito de validação da metodologia de cálculo de confiabilidade.

Para todos os sistemas testados, o método de cálculo mostrou-se aderente aos resultados da literatura.

Sobre a contextualização do presente trabalho no cenário de redes modernas de distribuição, ou redes inteligentes, destaca-se a adequação do modelo de confiabilidade desenvolvido para representar o comportamento de dispositivos automáticos com reduzidos tempos de resposta, como chaves de manobra. Observou-se que a inserção de premissas de automação é SDE é promissora, com base na viabilidade dos investimentos apontados, tanto para as distribuidoras, através de redução de seus custos totais, quanto para consumidores, através de redução dos custos de interrupção de fornecimento.

Com os estudos apresentados nesta dissertação, observou-se que ao se alocar equipamentos de proteção no sistema de distribuição, o custo de investimento se eleva, porém as melhorias em termos de confiabilidade são proeminentes. Outra análise importante está relacionada aos trechos de interconexão, que permitem ao fornecimento de energia ser restabelecido por rotas alternativas, melhorando significativamente os resultados de confiabilidade do sistema. E, finalmente, pode-se confirmar a eficácia da ferramenta meta-heurística bioinspirada, sistemas imunológicos artificiais, através de seu bom desempenho em alguns sistemas de distribuição amplamente divulgados na literatura em estudos de planejamento de confiabilidade e/ou sob outros índices de desempenho.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido nesta dissertação identificou alguns pontos potenciais para continuidade, deixando algumas questões e sugestões para trabalhos futuros. Estas sugestões são listadas a seguir:

- Representação de geração distribuída no problema de planejamento da confiabilidade;
- Representação de faltas momentâneas no modelo de cálculo da confiabilidade;
- Avaliação de outras técnicas meta-heurísticas para o planejamento ótimo de dispositivos de manobra e de proteção;

REFERÊNCIAS

- [1] SOHN, J., NAM, S., PARK, J., “Value-based radial distribution system reliability optimization”, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS PWRS*, v. 21, n. 2, pp. 941, 2006.
- [2] BILLINTON, R., JONNAVITHULA, S., “A test system for teaching overall power system reliability assessment”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 4, pp. 1670–1676, 1996.
- [3] GÖNEN, T., *Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design*. CRC Press, 2014.
- [4] BILLINTON, R., “Evaluation of reliability worth in an electric power system”, *Reliability Engineering & System Safety*, v. 46, n. 1, pp. 15–23, 1994.
- [5] WACKER, G., BILLINTON, R., “Customer cost of electric service interruptions”, *Proceedings of the IEEE*, v. 77, n. 6, pp. 919–930, 1989.
- [6] KHODR, H., OLSINA, F., DE OLIVEIRA-DE JESUS, P., YUSTA, J., “Maximum savings approach for location and sizing of capacitors in distribution systems”, *Electric Power Systems Research*, v. 78, n. 7, pp. 1192–1203, 2008.
- [7] JUNIOR, B. R. P., COSSI, A. M., CONTRERAS, J., MANTOVANI, J. R. S., “Multiobjective multistage distribution system planning using tabu search”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 8, n. 1, pp. 35–45, 2014.
- [8] METKE, A. R., EKL, R. L., “Security technology for smart grid networks”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 1, n. 1, pp. 99–107, 2010.
- [9] LEÃO, R. P., MEDEIROS, E., SILVEIRA, J. G., MEDEIROS, M. S., PINHEIRO, T. M., “Avaliação do Compromisso no Uso de Religadores em Alimentadores com Cargas Sensíveis”, *Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica. Aracaju-SE*, 2003.
- [10] GERS, J. M., HOLMES, E. J., *Protection of electricity distribution networks*. v. 47. IET, 2004.
- [11] DA SILVA, L. G. W., PEREIRA, R. A., MANTOVANI, J. R. S., “Alocação otimizada de dispositivos de controle e proteção em redes de distribuição”, *Revista Controle & Automação*, v. 21, n. 3, pp. 294–307, 2010.
- [12] PRODIST, A., “Agência Nacional de Energia Elétrica-Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8–Qualidade da Energia Elétrica”, 2012.
- [13] ALLAN, R., BILLINTON, R., “Reliability assessment of large electric power systems”, 1988.
- [14] GONTIJO, M. M., *Modelagem e Otimização dos Indicadores de confiabilidade na Reconfiguração das Redes em Sistemas de Distribuição*, Ph.D. Thesis, Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2007.

- [15] 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*, v. 136, pp. 101–108, 2015.
- [16] DE ASSIS, L. S., VIZCAI, J. F., USBERTI, F. L., LYRA, C., CAVELLUCCI, C., VON ZUBEN, F. J., OTHERS, “Switch allocation problems in power distribution systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 30, n. 1, pp. 246–253, 2015.
- [17] DE OLIVEIRA, L. W., DE OLIVEIRA, E. J., GOMES, F. V., SILVA, I. C., MARCATO, A. L., RESENDE, P. V., “Artificial immune systems applied to the reconfiguration of electrical power distribution networks for energy loss minimization”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 56, pp. 64–74, 2014.
- [18] BERNARDON, D., SPERANDIO, M., GARCIA, V., RUSSI, J., CANHA, L., ABAIDE, A., DAZA, E., “Methodology for allocation of remotely controlled switches in distribution networks based on a fuzzy multi-criteria decision making algorithm”, *Electric Power Systems Research*, v. 81, n. 2, pp. 414–420, 2011.
- [19] BILLINTON, R., JONNAVITHULA, S., “Optimal switching device placement in radial distribution systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 3, pp. 1646–1651, 1996.
- [20] MORADI, A., FOTUHI-FIRUZABAD, M., “Optimal switch placement in distribution systems using trinary particle swarm optimization algorithm”, *IEEE Transactions on power delivery*, v. 23, n. 1, pp. 271–279, 2008.
- [21] DA SILVA, L. G. W., PEREIRA, R. A. F., ABBAD, J. R., MANTOVANI, J. R. S., “Optimised placement of control and protective devices in electric distribution systems through reactive tabu search algorithm”, *Electric Power Systems Research*, v. 78, n. 3, pp. 372–381, 2008.
- [22] DA SILVA, L. G. W., 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: *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES*, pp. 51–56, 2004.
- [23] DE ASSIS, L. S., GONZÁLEZ, J. F. V., USBERTI, F. L., LYRA, C., VON ZUBEN, F., “Optimal allocation of remote controlled switches in radial distribution systems”. In: *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–8, 2012.
- [24] CHEN, C.-S., LIN, C.-H., CHUANG, H.-J., LI, C.-S., HUANG, M.-Y., HUANG, C.-W., “Optimal placement of line switches for distribution automation systems using immune algorithm”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 3, pp. 1209–1217, 2006.
- [25] LEITE, J. B., NETO, W. P. M., MANTOVANI, J. R. S., “ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE CHAVES DE MANOBRAS PARA RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.” *XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, Brasil*, 2010.
- [26] SOUSA, J. D., “Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica através de um modelo de Programação Linear Inteiro Misto (plim)”, *Tese (doutorado)* -

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2013.

- [27] WENYU, Y., JIAN, L., JIANMIN, Y., HAIPENG, D., MENG, S., “Optimal allocation of switches in distribution networks”. In: *Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004. Fifth World Congress on*, v. 6, pp. 5155–5159, 2004.
- [28] AUGUSTO, O. B., BENNIS, F., CARO, S., “A new method for decision making in multi-objective optimization problems”, *Pesquisa Operacional*, v. 32, n. 2, pp. 331–369, 2012.
- [29] SAHOO, N., GANGULY, S., DAS, D., “Multi-objective planning of electrical distribution systems incorporating sectionalizing switches and tie-lines using particle swarm optimization”, *Swarm and Evolutionary Computation*, v. 3, pp. 15–32, 2012.
- [30] PEREIRA, K., GALLEGO, L. A., FRANCO, E. M., “Modelo Matemático para a Alocação de Chaves Seccionadoras e Ramais de Interconexões em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”, *SBSE-2014*.
- [31] GOLDBARG, M. C., LUNA, H. P. L., *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*. v. 2.
- [32] BILLINTON, R., WANG, P., “Distribution system reliability cost/worth analysis using analytical and sequential simulation techniques”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 13, n. 4, pp. 1245–1250, 1998.
- [33] MORADI, A., FOTUHI-FIRUZABAD, M., RASHIDI-NEJAD, M., “A reliability cost/worth approach to determine optimum switching placement in distribution systems”. In: *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, pp. 1–5, 2005.
- [34] BERNARDON, D., SPERANDIO, M., GARCIA, V., FERREIRA, A., CANHA, L., ABAIDE, A., CARDOSO JR, G., DAZA, E., COMASSETTO, L., “Alocação ótima de Chaves Telecomandadas nas Redes de Distribuição para Aumento da Confiabilidade dos Sistemas”, *VII CBQEE-Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, pp. 1–6, 2009.
- [35] HEIDARI, A., AGELIDIS, V. G., KIA, M., POU, J., AGHAEI, J., SHAFIE-KHAH, M., CATALAO, J. P., “Reliability Optimization of Automated Distribution Networks with Probability Customer Interruption Cost Model in the Presence of DG Units”, *IEEE Transactions on Smart Grid*.
- [36] BILLINTON, R., ALLAN, R. N., *Reliability evaluation of engineering systems*. Springer, 1992.
- [37] LEITE DA SILVA, A., MELLO, J., “Comparação de Métodos Alternativos para Avaliação dos Custos de Perda de Carga em Sistemas de Geração e Transmissão”, *XII CBA, Uberlândia, Minas Gerais*, 1998.
- [38] DE ENERGIA ELÉTRICA-VOL, C. D., “I, Planejamento de Sistemas de Distribuição”, *Editora Campus/Eletróbrás, Rio de Janeiro*, 1982.

- [39] BROWN, R., GUPTA, S., CHRISTIE, R., VENKATA, S., FLETCHER, R., “Automated primary distribution system design: reliability and cost optimization”. In: *Transmission and Distribution Conference, 1996. Proceedings., 1996 IEEE*, pp. 1–6, 1996.
- [40] GHAJAR, R. F., BILLINTON, R., “Economic costs of power interruptions: a consistent model and methodology”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 28, n. 1, pp. 29–35, 2006.
- [41] TARJAN, R., “Depth-first search and linear graph algorithms”, *SIAM journal on computing*, v. 1, n. 2, pp. 146–160, 1972.
- [42] GUIMARÃES, A. C. R., *Confiabilidade de Sistemas de Distribuição: Calibração de Dados e Mecanismos para Avaliação de Desempenho*, Ph.D. Thesis, Universidade Federal DE Itajubá, 2006.
- [43] BROWN, R. E., *Electric power distribution reliability*. CRC press, 2008.
- [44] ARIFF, M., PAL, B., SINGH, A., “Estimating dynamic model parameters for adaptive protection and control in power system”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 30, n. 2, pp. 829–839, 2015.
- [45] DE CASTRO, L. N., VON ZUBEN, F. J., “The clonal selection algorithm with engineering applications”. In: *Proceedings of GECCO*, v. 2000, pp. 36–39, 2000.
- [46] DE CASTRO, L. N., VON ZUBEN, F. J., “Learning and optimization using the clonal selection principle”, *IEEE transactions on evolutionary computation*, v. 6, n. 3, pp. 239–251, 2002.
- [47] PATHAK, V., DHYANI, P., “Neuronal feature extraction through autonomous segmentation using density conscious artificial immune algorithm”. In: *2015 Third International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*, pp. 326–329, 2015.
- [48] QIAN, S., YE, Y., JIANG, B., WANG, J., “Constrained Multiobjective Optimization Algorithm Based on Immune System Model”, *IEEE Transactions on Cybernetics*, v. 46, n. 9, 2015.
- [49] DE CASTRO, L. N., “Engenharia imunológica: desenvolvimento e aplicação de ferramentas computacionais inspiradas em sistemas imunológicos artificiais”, *Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP*, 2001.
- [50] RESENDE, P., OLIVEIRA, L., OLIVEIRA, E., GOMES, F., OLIVEIRA, A., VARIZ, A., SILVA JR, I., “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*, p. 5, 2011.
- [51] CIVANLAR, S., GRAINGER, J., YIN, H., LEE, S., “Distribution feeder reconfiguration for loss reduction”, *IEEE Trans. Power Del.:(United States)*, v. 3, n. 3, 1988.
- [52] ALLAN, R. N., BILLINTON, R., SJARIEF, I., GOEL, L., SO, K., “A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results”, *IEEE Transactions on Power systems*, v. 6, n. 2, pp. 813–820, 1991.

- [53] VILLASANTI, A., BARAN, B., GARDEL, P., “Multiobjective allocation of remotely controlled switches in an electric distribution power system”. In: *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES*, pp. 1–7, 2008.
- [54] FERREIRA, G., *Otimização da Confiabilidade de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: uma Abordagem Considerando a Seleção e Alocação de Dispositivos de Proteção e Manobras*, Ph.D. Thesis, Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2009.
- [55] CARDOSO, A. J. D. R., “Ensaio das Funções de Sobrecorrente e Distância Utilizando Relé Digital de Proteção e Aplicação de Sinais com Caixa de Teste”, 2009.

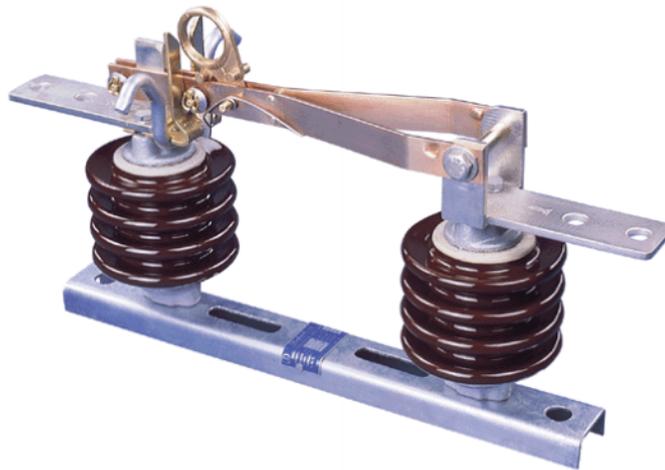
APÊNDICE A – Equipamentos utilizados

Os principais dispositivos usados nas redes de distribuição são as chaves fusíveis, chaves seccionadoras e disjuntores.

- Chaves de manobras

As chaves de manobras ou chaves seccionadoras são equipamentos utilizados em sistemas de distribuição para isolar trechos da rede, remanejar cargas ou isolar dispositivos, como reguladores de tensão, religadores, entre outros. As chaves podem ser de abertura motorizada ou manual. As de abertura manual são operadas através de vara de manobras ou por um mecanismo mecânico que permite a abertura a determinada distância. As chaves de abertura motorizada podem ser operadas remotamente. Na Figura 18 mostra a chave monopolar, de abertura manual. Estas são as mais comumente empregadas nas redes de distribuição, devido principalmente ao custo reduzido. De maneira geral, as chaves de manobras podem ser operadas sob carga. [54].

Figura 18 – Chave de manobra

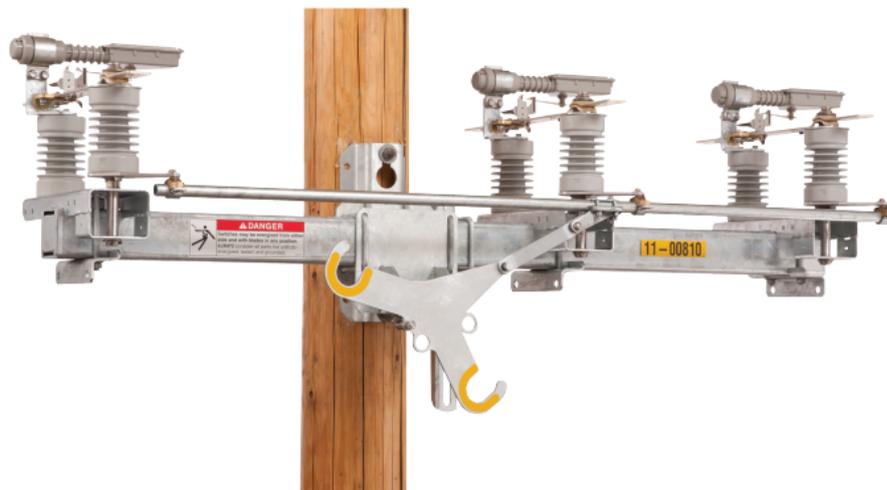


A Figura 19 mostra uma chave de manobra, de operação remota (automática). Devido ao custo elevado, este tipo de dispositivo é empregado em alimentadores de grande porte e/ou grande importância. Possuindo como grande vantagem, a redução da duração das interrupções.

- Elo Fusível

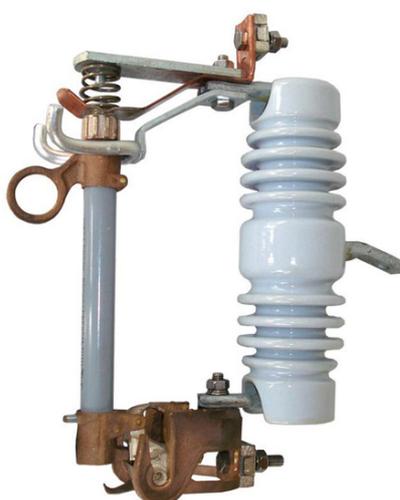
É um dispositivo eletromecânico de custo relativamente baixo, que provê a proteção monofásica do circuito. Sua ação se dá quando a corrente alcança um valor acima da capacidade máxima tolerável pelo elo fusível, ocasionando a fusão do mesmo e interrupção do circuito, exigindo sua substituição manual [54]. São muitos os tipos e

Figura 19 – Chave automática



aplicações deste dispositivo, porém, em sistemas de distribuição, são amplamente usadas as chaves fusíveis. Os principais componentes da chave fusível tipo expulsão são: base (isolador de porcelana ou resina epóxi), elo fusível, cartucho ou porta fusível (tubo de fibra isolante) e elementos de fixação (aço zincado), conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Fusível



O elo fusível é o elemento substituível do conjunto, sendo este responsável pela detecção de sobrecorrentes. É composto pelos seguintes elementos: botão com arruela (fixa a parte superior do elo na parte superior do cartucho, e dá continuidade elétrica), elemento fusível (estanho ou liga de estanho, prata ou níquel-cromo), tubo protetor (composto de fibra orgânica isolante) e cordoalha de cobre estanhado (fixa o elo na parte inferior do cartucho). É comum a utilização em paralelo com o elemento fusível, de um fio de alta resistência mecânica e elétrica, para evitar o alongamento (ou mesmo o rompimento) do elemento fusível devido a esforços de tração [54].

- Disjuntor

Disjuntores são equipamentos projetados para interromper e restabelecer correntes de defeito de um sistema de energia elétrica gastando a menor quantidade de tempo, se possível menos de 8 ciclos (0,1333 segundos). São equipamentos que dependem diretamente do relé de proteção para o seu funcionamento correto, pois sem o mesmo, o disjuntor é apenas uma chave de manobra que não efetua qualquer proteção no sistema. Uma consideração importante na fabricação dos disjuntores é que eles devem ser robustos para estar em condições de operar mesmo sujeito aos ambientes com poeira, substâncias químicas, umidade, entre outros. Um exemplo de disjuntor é mostrado na figura 21.

Figura 21 – Disjuntor



A abertura ou fechamento dos contatos do disjuntor deve ser comandado por um operador ou por um dispositivo que consiga sentir anormalidades no sistema elétrico. No momento em que o disjuntor é solicitado a operar, ocorre a energização da bobina de disparo, que aciona o mecanismo de abertura dos contatos. Esse mecanismo pode ser mola, ar comprimido, solenoide ou hidráulico. A corrente do circuito se mantém devido a ocorrência do arco-elétrico mesmo depois dos contatos estarem separados. Paralelamente ao acionamento do mecanismo de abertura, o processo de extinção de arco-elétrico também é efetuado. Uma garantia importante que deve ser dada pelo disjuntor é que o arco-elétrico não irá retornar devido a tensão de re-ignição e o meio parcialmente ionizado. O comando de fechamento do disjuntor também pode ser realizado pelo operador do sistema. Esse processo é mais simples do que o de abertura, porque depois de efetuado o comando ocorre a energização da bobina de fechamento que aciona o mecanismo que fechando os contatos [55].