

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Faculdade de Engenharia - Campus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**"ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE DISPOSITIVOS DE
PROTEÇÃO EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA"**

Dissertação submetida à Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira - UNESP -
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.

Aluno : Luis Gustavo Wesz da Silva
Orientador : José Roberto Sanches Mantovani

Ilha Solteira - SP
Maio de 2002

Índice

Lista de Figuras.....	iv
Lista de Gráficos	vi
Lista de Tabelas	vii
Resumo.....	viii
Abstract	x
1 - Introdução.....	1
2 - Equipamentos e Dispositivos de Proteção Utilizados em Sistemas de Distribuição.....	8
2.1 – Chaves-Fusíveis.....	10
2.2 – Elos Fusíveis.....	11
2.3 – Religador	14
2.4 - Seccionalizador	17
2.5 – Disjuntor Equipado com Relé.....	20
3 - Alocação Ótima dos Dispositivos de Proteção em S.D.E.E.	22
3.1 – Definição dos Índices de Confiabilidade do Sistema.....	23
3.2 – Modelagem Matemática Proposta para o Problema de Alocação de Dispositivo de Proteção	25
3.2.1 – Formulação da Função Objetivo.....	26
3.2.2 – Restrições do Problema.....	40
3.3 – Exemplo Ilustrando a Metodologia.....	43
4 - Técnica de Solução do Problema de Alocação Ótima dos Dispositivos de Proteção em S.D.E.E.....	47
4.1 – Algoritmo Genético Básico.....	47

4.1.1 – População Inicial.....	48
4.1.2 – Seleção.....	49
4.1.3 – Recombinação.....	50
4.1.4 – Mutação.....	51
4.1.5 – Parâmetros de Controle do Algoritmo Genético.....	52
4.2 – Algoritmo Genético Intermediário.....	54
4.2.1 – Representação.....	55
4.2.2 – População Inicial.....	55
4.2.3 – Seleção e Recombinação.....	56
4.2.4 – Mutação.....	57
4.3 – Algoritmos Genéticos Aplicados na Solução Ótima do Problema de Alocação Ótima da Proteção.....	57
5 - Resultados.....	61
5.1 – Circuito com 7 pontos possíveis para alocação [4].....	62
5.2 – Circuito com 9 pontos possíveis para alocação [1].....	66
5.3 – Circuito com 18 pontos possíveis para alocação [3].....	72
5.4 – Circuito Real com 20 pontos possíveis para alocação.....	77
5.5 – Análise Comparativa dos Resultados.....	83
6 - Conclusão.....	85
Bibliografia.....	87

Lista de Figuras

Figura 3.1. Classificação das Seções do Alimentador.

Figura 3.2 Circuito Radial Simples com Ramificação

Figura 3.3 – Circuito Ilustrativo para Interpretação da Parcela II da F.O

Figura 3.4 – Ilustração dos Efeitos da Alocação de Religadores nos Ramais na F.O devido Incidência de Faltas Temporárias.

Figura 3.5 – Efeito da Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados na Seção Principal para Faltas Permanentes na Seção Principal sobre os Consumidores da Seção Principal.

Figura 3.6 – Efeito da Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados na Seção Principal para Faltas Permanentes na Seção Principal sobre os Consumidores dos Ramais.

Figura 3.7 – Efeito da Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados nos Ramais para Faltas Permanentes nos Ramais sobre os Consumidores dos Ramais.

Figura 3.8 – Efeito da Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados nos Ramais ou na Seção Principal para Faltas Permanentes nos Ramais sobre os Consumidores a Jusante do Ramal (Ramais e da Seção Principal).

Figura 3.9 – Efeito da Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados nos Ramais ou na Seção Principal para Faltas Permanentes nos Ramais sobre os Consumidores a Montante do Ramal (Ramais).

Figura 3.10 – Efeito da Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados nos Ramais ou na Seção Principal para Faltas Permanentes nos Ramais sobre os Consumidores a Montante do Ramal (Seção Principal).

Figura 3.11. Circuito Radial Simples com 7 Pontos.

Figura 4.1. Configuração Candidata a Recombinação.

Figura 4.2. Configuração Recombinada.

Figura 4.3. Exemplo de Mutação.

Figura 4.4. Estrutura Básica de um Algoritmo Evolutivo.

Figura 4.5. Esquema de Codificação de Cromossomo–Alocação Ótima da Proteção.

Figura 4.6. Estrutura Geral do Algoritmo Implementado.

Figura 5.1. Circuito Radial Simples com 7 Pontos.

Figura 5.2. Circuito Radial Simples com 9 Pontos.

Figura 5.3. Circuito Radial Simples com 18 Pontos.

Figura 5.4. Circuito Radial Simples com 20 Pontos.

Lista de Gráficos

Gráfico 5.1. Média da Função Objetivo vs Número de Iterações, Circuito-1.
Algoritmo Genético Básico.

Gráfico 5.2. Média da Função Objetivo vs Número de Iterações, Circuito-1.
Algoritmo Genético Intermediário.

Gráfico 5.3. Média da Função Objetivo vs Número de Iterações, Circuito-2.
Algoritmo Genético Básico.

Gráfico 5.4. Média da Função Objetivo vs Número de Iterações, Circuito-2.
Algoritmo Genético Intermediário.

Gráfico 5.5. Média da Função Objetivo vs Número de Iterações, Circuito-3.
Algoritmo Genético Básico.

Gráfico 5.6. Média da Função Objetivo vs Número de Iterações, Circuito-3.
Algoritmo Genético Intermediário.

Gráfico 5.7. Média da Função Objetivo vs Número de Iterações, Circuito-4.
Algoritmo Genético Básico.

Gráfico 5.8. Média da Função Objetivo vs Número de Iterações, Circuito-4.
Algoritmo Genético Intermediário.

Lista de Tabelas

- Tabela 2.1. Composição Probabilística entre os Tipos de Faltas e a Composição das mesmas.
- Tabela 2.2. Critérios para Alocação de Chaves em Sistema de Distribuição
- Tabela 3.1 Dados do Circuito da Figura 3.4.
- Tabela 5.1 Dados do Circuito-1.
- Tabela 5.2 Resultados para o Circuito-1 – Função Objetivo que Considera o Número de Clientes (N_{qi}).
- Tabela 5.3 Resultados para o Circuito-1 – Função Objetivo que Considera a Carga Média (L_{qi}).
- Tabela 5.4 Dados do Circuito-2.
- Tabela 5.5 Resultados para o Circuito-2 – Função Objetivo que Considera o Número de Clientes (N_{qi}).
- Tabela 5.6 Resultados para o Circuito-2 – Função Objetivo que Considera a Carga Média (L_{qi}).
- Tabela 5.7 Dados do Circuito-3.

Tabela 5.8 Resultados para o Circuito-3 – Função Objetivo que Considera o Número de Clientes (N_{qi}).

Tabela 5.9 Resultados para o Circuito-3 – Função Objetivo que Considera a Carga Média (L_{qi}).

Tabela 5.10 Dados do Circuito-4.

Tabela 5.11 Resultados para o Circuito-4 – Função Objetivo que Considera o Número de Clientes (N_{qi}).

Tabela 5.12 Resultados para o Circuito-4 – Função Objetivo que Considera a Carga Média (L_{qi}).

Tabela 5.13 Comparação dos Parâmetros de Controle para os Testes Realizados com os Diferentes Tipos de Algoritmos Genéticos Utilizados

Resumo

A alocação de dispositivos de proteção em pontos estratégicos dos circuitos de distribuição melhoram a qualidade do serviço de fornecimento de energia elétrica e os índices de confiabilidade do sistema

Neste trabalho apresenta-se uma formulação matemática para o problema de alocação de dispositivos de proteção, que considera a possibilidade de adicionar dispositivos de proteção em lugares estratégicos, visando melhorar o índice de confiabilidade da rede (ICR), sendo assim atender os consumidores com uma energia confiável, desta forma aumentando o faturamento das concessionárias, e cumprindo com as exigências estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

O problema de alocação de dispositivos é formulado como um problema de programação não linear inteiro do tipo binário (0/1), considerando-se uma função objetivo não linear e um conjunto de restrições lineares. Para a solução deste problema propõe-se o uso de algoritmo genético básico e uma versão referenciada como algoritmo genético intermediário, ambos adaptados com base nos estudos realizados no transcórrer do desenvolvimento deste trabalho. Este Algoritmo Genético Intermediário utiliza conceitos envolvidos nos algoritmos genéticos Básico e Construtivo. Como resultado da aplicação destes algoritmos na solução do problema de alocação de dispositivos de proteção em redes de distribuição, obtém-se os tipos e os locais onde deverão ser alocados esses dispositivos em alimentadores de distribuição com vistas a melhorar os índices de confiabilidade do

sistema. Apresentam-se resultados da metodologia proposta para alguns circuitos típicos de distribuição.

Abstract

Protective devices allocation in distribution circuits strategic points improve the electric energy supply quality and the system reliability index.

In this work, it is presented a mathematical formulation for the protective devices allocation problem, that considers the possibility to add protective devices in strategic points to minimize the network reliability index and, therefore, attending the users with a reliable low energy cost, increasing the utilities invoice according to the exigencies established by ANEEL (Brazilian National Electric Energy Agency).

The devices allocation problem is formulated as a non-linear integer binary programming (0/1), considering a non-linear objective function and a linear constraints set. To solve this problem it is proposed a constructive basic genetic algorithm and also an intermediate one adapted during the development of this work. This intermediate genetic algorithm uses concepts dealing with basic and constructive genetic algorithms. With this application algorithm results it is obtained the types and places where will be allocated the protective devices and distribution feeders. It is presented results based on the proposed methodology to some typical distribution systems.

1 - Introdução

Na elaboração de projetos de proteção em sistemas aéreos de distribuição, deve-se levar sempre em consideração que o aspecto da proteção de equipamentos é um dos objetivos, mas não se constitui em sua finalidade única. Considere-se que esse objetivo, em princípio, já deve ter sido atingido no âmbito dos esquemas de proteção da subestação e, portanto, a proteção de distribuição pode dar ênfase ao aspecto da continuidade do suprimento, evitando que uma falha tenha um envolvimento muito grande em termos de carga e/ou consumidores atingidos, além de procurar reduzir os tempos de localização dessa falha e de recomposição do sistema em operação. Contudo, convém ressaltar que a alocação de vários dispositivos de proteção em série, como geralmente requer um esquema de boa confiabilidade, tende a tornar mais lenta a proteção dos alimentadores na subestação, o que pode acarretar, em alguns casos, danos aos equipamentos, até em consequência de fadiga mecânica. Assim sendo, quando se procura atingir altos níveis de confiabilidade na operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica, a preocupação com a proteção e segurança deve aumentar proporcionalmente.

O princípio básico de proteção é a técnica de selecionar, coordenar, ajustar e aplicar os vários equipamentos e dispositivos protetores a um sistema elétrico, de forma a guardar entre si uma determinada relação, tal que uma anormalidade no sistema possa ser isolada, sem que outras partes do mesmo sejam afetadas.

Não há, até o momento um procedimento único para a utilização dos dispositivos de proteção em relação às empresas concessionárias de energia elétrica, isto é os esquemas de proteção variam de empresa para empresa.

A alocação de dispositivos de proteção é um tema que tem sido abordado por alguns pesquisadores da área de Engenharia Elétrica, com alguns trabalhos publicados na literatura especializada [1-6]. Soudi e Tomsovic (1998) [4], a partir dos índices de confiabilidade definidos com base nos padrões das concessionárias americanas, propõem a melhoria desses índices através das ações preventivas oferecidas pelas respostas rápidas dos dispositivos de proteção, localizadores de faltas e sensores instalados nas redes. Com base nesta filosofia e nas características de atuação e coordenação dos dispositivos de proteção, tais como disjuntores, religadores de linha, seccionadores e fusíveis que atuam diretamente na capacidade de restauração do sistema ou parte do sistema para faltas permanentes e temporárias, formulam o problema de alocação de proteção em alimentadores de distribuição como um problema de confiabilidade. O circuito é dividido em alimentador principal e ramais laterais de categorias 1, 2 e 3: O ramal de categoria 1 lateral é curto e não se permite a alocação de dispositivos de proteção; O ramal de categoria 2 lateral é usualmente maior que o de categoria 1 e permite-se apenas alocação de fusíveis, e o ramal de categoria 3 lateral é fortemente carregado ou longo e vários tipos de dispositivos de proteção podem ser instalados. A aplicação dos conceitos de índices de confiabilidade e com base nas características de atuação dos dispositivos de proteção em circuitos de distribuição, considerando separadamente o alimentador principal e os ramais laterais resultaram na formulação de um problema de otimização não linear com variáveis inteiras e binárias que indicam a alocação (1) ou não (0) de um determinado tipo de dispositivo de proteção em um ponto pré-selecionado do circuito. Essa função objetivo da forma que foi considerada nesse artigo, reflete os inconvenientes da alocação de dispositivos de proteção na confiabilidade e que deve portanto ser minimizada para melhoria dos índices de confiabilidade do alimentador sob análise. As restrições consideradas são referentes a problemas de coordenação, números de dispositivos de proteção disponíveis para alocação entre outras. Para solução do problema de otimização não linear resultante utilizam manipulações algébricas para tornar o problema linear e propõem para solução técnicas heurísticas baseadas no conhecimento do problema.

Aplicam a metodologia proposta para solução do problema de alocação de proteção em um sistema teste com sete pontos de alocação possíveis. Soudi e Tomsovic (2001) [1], utilizam a mesma formulação do problema de alocação proposta no trabalho detalhado anteriormente, porém propõem para solução do problema técnicas de programação multi-objetivos referenciada na literatura especializada como *Programação por Metas*. Para aplicar essa técnica de solução trabalham diretamente com os efeitos dos dispositivos de proteção nos índices de confiabilidade considerando aspectos referentes à faltas permanentes e temporárias, considerando simultaneamente os dois objetivos. Restrições para problemas de coordenação e limitações de projeto são também incluídas na formulação. Soudi e Tomsovic (1999) [3], utilizam novamente a mesma formulação, porém apresentam uma análise sob os aspectos da complexidade e eficiência computacional de vários algoritmos de otimização para solução do problema de alocação ótima. Dentre esses algoritmos destacam-se os que utilizam conceitos de programação matemática *Multi Objetivo* juntamente com *Lógica Fuzzy*, Algoritmo de *Branch and Bound*, *Programação Binária* e *Programação Linear* entre outras. Apresentam resultados dos testes realizados para um sistema contendo seção principal e vários ramais laterais totalizando um total de dezoito pontos possíveis para alocação de dispositivos de proteção.

Kagan et alii (1997) [5], descrevem uma metodologia para otimizar o montante da energia não distribuída (END) ou o corte de cargas em redes primárias de distribuição, através da substituição e inserção de dispositivos de proteção. A instalação de dispositivos de proteção em alimentadores primários de distribuição tem como uma das suas principais finalidades melhorar os índices de confiabilidade do sistema através da redução dos tempos de interrupção e da END. Dispositivos de seccionamento permitem, por outro lado, que aqueles trechos do sistema que apresentem defeitos permanentes possam ser devidamente isolados e reparados. A metodologia proposta aborda alguns aspectos como: reconfiguração da rede, representação da rede por blocos de carga, cálculo do ganho devido à substituição/instalação de chaves e geração de alternativas de substituição/instalação de chaves. A reconfiguração da rede, consiste nos seguintes passos: 1 – Determinação de uma Rede Reduzida Equivalente (RRE), a qual observa-se a existência de sobrecargas em trechos não-radiais, a rede será reconfigurada executando-se um procedimento de otimização, o qual é aplicado a uma RRE. Nesta rede todos os trechos radiais são

transformados em nós equivalentes conectados ao tronco de alimentador do qual eles se derivam. Trechos adjacentes da rede com mesma bitola são substituídos por trechos individuais equivalentes, e nós adjacentes no tronco da rede são também substituídos por equivalentes, desde que a carga total do conjunto de nós não supere um valor previamente especificado.

2 – Determinação da distribuição viável de fluxo de potência na RRE. Nesta etapa utiliza-se algoritmo de transporte *Out-Of-Kilter*, o qual permite determinar a distribuição de fluxo de custo mínimo com atendimento aos limites de carregamento máximo. Para eliminar sobrecargas em trechos não-radiais, o algoritmo foi adaptado de forma a permitir o fechamento de chaves de socorro entre alimentadores e a saturação da carga.

3 – Radialização e atualização da RRE otimizada, na reconfiguração pode produzir redes não-radiais tornando necessária uma etapa final de radialização da RRE otimizada.

Representação da rede por blocos de cargas, em que na metodologia proposta bloco de carga é definido como sendo o conjunto de trechos de rede compreendidos entre chaves de seccionamento/proteção. Para cada rede obtida na reconfiguração determina-se a rede equivalente por blocos de carga, a qual será utilizada no estudo de substituição/inserção de chaves. O ganho devido à substituição/inserção de chaves, é o ganho resultante da substituição de uma chave existente, ou da inserção de uma nova chave. Este ganho é obtido pela diferença entre as seguintes parcelas: somatório do valor presente dos benefícios anuais produzidos pela chave em consideração, em cada ano este benefício corresponde à diferença entre o custo da END global sem a chave e o custo da END global considerando a chave instalada, e o somatório do valor presente dos custos anuais associados à chave (aquisição, instalação e manutenção da chave). Alternativas de substituição/inserção de chaves foram propostas e implementadas na forma de um sistema computacional. A interação entre o sistema e o usuário é particularmente importante na fase de geração de alternativas de substituição/inserção de chaves, pois a qualidade das alternativas propostas depende diretamente do conhecimento que o usuário tem da rede elétrica. Com o objetivo de ilustrar os recursos da metodologia proposta para o estudo de substituição e inserção de chaves, foi proposta na simulação de uma rede real de distribuição. Kagan e Oliveira (2001) [6], baseado na política de privatizações das companhias de distribuição no Brasil e na necessidade de atender índices mínimos de confiabilidade, formulam um modelo para determinar os índices individuais de duração e

frequência (DIC) e (FIC), para uma dada rede. O modelo de simulação é baseado sobre uma representação estatística da rede. Trata principalmente dos dados como demanda e o comprimento total dos alimentadores, números de consumidores, tipo de cabo, área de cobertura, tempo médio de restauração. Os índices de qualidade são baseados nas taxas médias de faltas e no tempo de restauração, bem como alguns critérios gerais que são incorporados através da experiência prática dos técnicos das concessionárias, em relação à proteção e instalação de equipamentos de interrupção ao longo da rede. O cálculo dos índices de confiabilidade é executado por simulações de faltas em todas as ramificações, considerando as taxas de faltas correspondentes e o tempo médio de restauração. As curvas probabilística de distribuição para os índices DIC e FIC são obtidos para todas as combinações para os dados que descrevem os alimentadores de distribuição das companhias. A metodologia proposta foi implementada no software que obtém probabilisticamente curvas de distribuição no que diz respeito a índice DIC e FIC para que se possa fazer uma análise de risco.

Wang e Thorp (2001) [2], salientam neste trabalho que faltas ocultas denotam as operações incorretas que usualmente permanecem não detectadas até que condições anormais de operação sejam alcançadas. Descrevem que relatórios técnicos das concessionárias americanas mostram que as falhas na operação de relés têm uma importância significativa na propagação de perturbações nos sistemas elétricos. Afirmam que a redundância e sobre-proteção nos projetos de proteção enquanto se prevêem danos físicos individuais, tendem a promover faltas ocultas, propagar longas correntes de perturbações e como resultado compromete a confiabilidade global. Neste artigo, define-se a vulnerabilidade e confiabilidade do sistema de proteção, e quantifica-se o estudo do impacto das faltas ocultas. Propõem que é crucial revisar a atual filosofia de proteção e investigar a factibilidade de melhorar a confiabilidade do sistema através de uma atualização parcial do sistema de proteção. Embora o benefício de aplicar relés modernos seja obvio, a questão onde pô-los não pode ser respondida facilmente sem uma análise detalhada de vulnerabilidade. Relés deveriam ser selecionados para atuarem de tal maneira que a confiabilidade global do sistema de proteção seja maximizada. Carência de recursos computacionais e algoritmos eficientes têm sido o maior obstáculo para o estudo de blecautes no sistema de potência. Neste artigo, introduz-se um algoritmo de busca

randômica, baseado no método de simulação de Monte Carlo, para uma busca mais rápida de caminhos importante com vistas a reduzir a vulnerabilidade do sistema. O objetivo é definir as locações mais vulneráveis num sistema de potência real, caracterizar numericamente a vulnerabilidade, e encontrar a solução mais econômica para atualizar o sistema de proteção.

Neste trabalho apresenta-se uma formulação matemática para o problema de alocação ótima de dispositivos de proteção em circuitos de distribuição, visando melhorar o Índice de Confiabilidade da Rede (ICR) sujeita a restrições de natureza técnica e econômica, sendo assim atender os consumidores com uma energia confiável e de baixo custo, desta forma, aumentando o faturamento das concessionárias e cumprindo com as exigências estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Dessa forma o problema de alocação é formulado considerando uma função objetivo não linear que busca representar matematicamente os benefícios e inconvenientes de se alocar dispositivos de proteção em pontos pré-selecionados dos circuitos de distribuição, considerando os índices de faltas permanentes e temporárias em cada seção do circuito, o número de consumidores ou a potência média instalada. As restrições consideradas para o problema refletem limitações técnicas e econômicas, tais como problemas de coordenação de dispositivos de proteção em série, número disponível de equipamentos disponíveis para alocação, importância do alimentador sob análise, topologia do circuito entre outras. O resultado que se obtém da aplicação desse tipo de análise é um problema de programação matemática com variáveis binárias composto por uma função objetivo não linear sujeita a um conjunto de restrições lineares.

Para solução desse problema propõe-se neste trabalho o uso de Algoritmos Genético adaptado para solução desse tipo de problema. Utilizando a formulação e metodologia propostas foram analisados vários circuitos testes da literatura e um circuito real, obtendo-se em todos os testes soluções de boa qualidade.

Organização do Texto

No Capítulo 2 descrevem-se, de uma forma geral, as principais funções e de que forma são especificados e utilizados os equipamentos de proteção em sistema de distribuição de energia elétrica.

No Capítulo 3 é apresentada uma modelagem matemática para a alocação de dispositivos de proteção, visando melhorar o Índice de Confiabilidade da Rede (ICR), causado pelas interrupções dos alimentadores devido à incidência de faltas permanentes e temporárias. Neste capítulo, também é mostrado um exemplo de como é montada a função objetivo e as restrições para o problema de alocação ótima de dispositivos de proteção, para um circuito da literatura, com 7 pontos possíveis para a alocação.

No Capítulo 4 apresentam-se os conceitos básicos envolvendo as técnicas de otimização, algoritmos genético básico e intermediário, adotados para solução do problema de alocação ótima de dispositivos de proteção, conforme formulado neste trabalho.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados da alocação de dispositivos de proteção para exemplos da literatura com 7, 9, 18 pontos possíveis para alocação de dispositivos de proteção e também de um exemplo real de um circuito com 20 pontos possíveis para alocação de dispositivos de proteção.

As conclusões encontradas neste trabalho, através dos testes realizados, serão mencionadas no capítulo 6.

2 - Equipamentos e Dispositivos de Proteção Utilizados em Sistemas de Distribuição

Os sistemas de distribuição de energia elétrica estão susceptíveis à faltas que podem ser temporárias ou permanentes. As faltas temporárias são aquelas cuja duração é limitada ao período necessário para restabelecer o serviço através de operação automática do equipamento de proteção que desligou o circuito ou parte dele. As faltas permanentes são todas as interrupções não classificadas como temporárias ou programadas. Na Tabela-2.1 [8], apresentam-se dados estatísticos entre os tipos de faltas e a composição das mesmas.

Tabela–2.1: Composição Probabilística entre os Tipos de Faltas e Composição das mesmas

	%	Permanentes(%)	Transitórias(%)
Trifásicas	2	95	5
Bifásicas	11	70	30
Fase-Terra	79	20	80
Outros	8	-	-

Essas faltas no sistema são normalmente provocadas pela ação de descargas atmosféricas, contatos de árvores e animais às partes vivas do sistema, falhas de equipamento e erro humano.

Visando reduzir o desligamento dos alimentadores de distribuição são tomadas várias ações preventivas, dentre as quais destacam-se a instalações de pára-raios, podas de árvores, instalação de proteção contra animais e manutenção de equipamentos. Tais medidas preventivas não eliminam todas as ocorrências de faltas e assim, dispositivos de proteção são instalados para detectarem estas faltas e isolar a seção do circuito de distribuição. Dispositivos de proteção previnem ou minimizam os riscos para equipamentos do sistema, melhoram a confiabilidade e a qualidade do serviço prestado aos consumidores e aumento de faturamento para a concessionária de energia elétrica.

Em geral, a proteção de um sistema de distribuição consiste de um disjuntor na S/E com religadores de linhas, seccionalizadores e fusíveis ao longo do alimentador e sobre as derivações.

As principais funções dos dispositivos de proteção utilizados nas redes de distribuição, são:

- Interrupção: devem interromper todos os curto-circuitos dentro de sua capacidade nominal;
- Deteccção: devem sentir correntes anormais e por outro lado, devem permitir a circulação contínua de correntes normais;
- Capacidades de Manobras: devem ser capazes de permitir manobras sob correntes normais e anormais;
- Desconexão do Circuito: devem ser capazes de abrir o circuito com e sem carga.

Os dispositivos de proteção devem satisfazer os seguintes objetivos:

- Prevenir ou minimizar riscos a equipamentos, eliminando condições anormais;
- Melhorar a confiabilidade do serviço removendo o menor trecho possível do circuito para uma dada falta;

- Prevenção de segurança contra choques para a população, removendo um circuito sob falta da rede.

Neste capítulo apresentam-se as características técnicas e de operação dos dispositivos de comando e proteção utilizados em sistema de distribuição de energia elétrica.

2.1 – Chaves-Fusíveis

Tem por finalidade prover o sistema de proteção monofásica, permitindo manobras em certas situações, porém não possui a capacidade de religamento automático, sendo assim todas as faltas temporárias são tratadas como sendo permanentes. Trata-se de um dispositivo de seccionamento automático de baixo custo.

As chaves-fusíveis eliminam o arco elétrico devido à geração de gases no cartucho, e a formação desses gases origina altas pressões internas. Quanto maior a corrente de curto-circuito, maior quantidade de gases destinada a extinguir o arco, o revestimento interno do cartucho deve ser dimensionado para produzir a quantidade de gases necessária. A pressão interna do cartucho depende do diâmetro interno do tubo e de seu comprimento, corrente, bitola do elo e tempo de arco. Dentro do tubo se estabelece um gradiente de pressão com um valor mínimo no orifício de saída e máxima no terminal vedado do tubo. Princípio da ação e reação, devido a expulsão dos gases, a chave-fusíveis e a estrutura do suporte se move, fazendo assim a abertura da mesma. As chaves fusíveis são formadas pelos seguintes componentes: base de porcelana, cartucho, engate superior, encaixe inferior, mecanismo para abertura em carga.

Quando a proteção é feita por chave-fusível, esta pode ser instalada na derivação do ramal ou junto ao transformador, sendo comum qualquer uma dessas soluções. Na Tabela-2.2 considerando-se características nominais e físicas, apresentam-se os critérios adotados para alocação de chaves em sistemas de distribuição.

Tabela – 2.2: Critérios para Alocação de Chaves em Sistema de Distribuição

Tensão Nominal ($V_{nominal}$)	<p>Para Sistemas Trifásicos (3ϕ): $V_{nominal} \geq V_{linha}$</p> <p>Para Sistemas Monofásicos (1ϕ): $V_{nominal} \geq V_{fase}$</p>
Nível Básico de Isolamento (NBI)	Deve estar de acordo com o nível básico de isolamento do sistema (o dispositivo deve suportar durante um pequeno intervalo de tempo uma tensão entre 6 a 7 vezes maior que a tensão nominal).
Corrente de Interrupção	<p>Deve ser maior ou igual a máxima corrente de falta possível, sobre a chave-fusível.</p> <p style="text-align: center;">Interrupção Simétrica \geq $I_{m\acute{a}x}$ simétrica da falta</p> <p>Como em geral operam no primeiro ciclo a capacidade deve ser a assimétrica.</p> <p style="text-align: center;">Interrupção Assimétrica \geq $I_{m\acute{a}x}$ assimétrica da falta</p>

2.2 – Elos Fusíveis

É uma peça facilmente substituível, composta de um elemento sensível às correntes de faltas e sobrecargas e demais partes que completam o circuito entre os contatos da chave-fusível.

O elo-fusível pode ser protegido ou protetor. Elo-fusível protegido é aquele instalado do lado da fonte, e elo-fusível protetor é aquele que está instalado do lado da carga.

Com a circulação de uma corrente superior à máxima corrente permitida pelo elo-fusível, devido ao efeito térmico, o elemento fusível se funde, interrompendo o circuito. A alta temperatura do arco provoca a queima e a decomposição parcial do revestimento interno do cartucho, gerando gases que interrompem o arco no instante de corrente nula.

A pressão dentro do cartucho aumenta em função dos aumentos de temperatura e da geração dos gases, esta pressão exercida ajuda a manter a condição de circuito aberto, uma

vez que as partículas ionizadas forçam a abertura das extremidades do cartucho, sendo expelidas em seguida.

Os elos fusíveis, de acordo com a característica (*tempo x corrente*) são classificados da seguinte forma :

Tipo H

São elos ditos de alto surto, de ação lenta e foram projetados para proteção primária de transformadores pequenos. Assim os elos tipo H não queimam para surtos transitórios, quando da energização de transformadores (suportam 80 a 100 A em 0,1 segundo). Para cada valor nominal de corrente a fusão dos elos H ocorre a partir de 300 segundos. Analisando-se as curvas dos elos H, conclue-se que praticamente não existe coordenação entre eles.

Tipo K e T

Os elos tipo K tem características rápidas e os do tipo T características lentas. Os elos K e T da mesma bitola têm pontos idênticos de 300 e/ou 600 segundos nas curvas (*tempo x corrente*), tendo, portanto, as mesmas características de sobrecargas. Porém, as curvas (*tempo x corrente*) divergem abaixo destes pontos. O elo K é mais rápido com corrente elevada do que o elo T da mesma bitola.

A diferença entre os dois tipos de elos resulta da relação de rapidez. Enquanto os elos rápidos K têm relação de rapidez entre 6 e 8,1, os elos lentos T tem relação de rapidez entre 10 e 13.

Os fusíveis tipo K e T admitem como sobrecarga 1,5 vezes os seus valores nominais, sem causar excesso de temperatura na chave-fusível. Esta capacidade de sobrecarga é muito importante em aplicações onde a coordenação limita a escolha da bitola. Por outro lado, a fusão dos elos K e T se dá com 2,5 vezes os seus valores nominais, para 300 segundos.

Duas são as exigências básicas para um elo fusível ser considerado de boa qualidade:

- a) Manter inalteradas em serviço, as características (*tempo x corrente*).

- b) Trabalhar em temperatura baixa.

A manutenção dessas exigências deve-se exigida, porque quando, eles fusíveis são utilizados em conjunto com religadores, o problema de obtenção da coordenação desejada torna-se por certas vezes complicado, pelo fato de que uma parcela do calor armazenado no fusível durante a circulação da falta, será dissipada durante o tempo em que o dispositivo automático está aberto.

O aumento de temperatura do fusível durante o tempo de abertura do religador, dependerá dos seguintes fatores:

- a) Temperatura do elo no instante em que o circuito é aberto.
- b) Temperatura do meio ambiente.
- c) Condutividade térmica do elo e de todos materiais em contato com ele ou ao seu redor.
- d) Espaço de tempo em que o circuito permanece aberto

Outras variáveis que influenciam bastante nas coordenações e que não podem ser desconsideradas são:

- a) Temperatura do elo antes da circulação da corrente de defeito.
- b) Ordem de grandeza da corrente de defeito.
- c) Espaço de tempo em que a corrente de defeito percorre o elo.
- d) Variações das características dos elos fusíveis dependendo do fabricante.
- e) Processo de fixação dos cartuchos nas chaves-fusíveis.
- f) A bitola do cabo usado para conectar o fusível ao circuito.
- g) Variação no tempo de abertura do dispositivo de religamento.

Para os elos fusíveis manterem inalteradas as suas curvas características (*tempo x corrente*), tendo em vista os fatores acima relacionados, é necessário utilizar no elemento fusível, metais ou ligas não sujeitas à oxidação progressiva.

Este critério, afasta desde já a possibilidade do uso de fio de cobre, porque este se oxida reduzindo o diâmetro, o que evidentemente alterará suas características. Além disso, o fio de cobre não é apropriado como elemento fusível porque a sua temperatura de trabalho seria em torno de 300°C, com ponto de fusão de 1.080°C. Estas temperaturas elevadas de trabalho e de fusão causariam a carbonização do tubinho protetor do elo e do revestimento interno do cartucho da chave-fusível. Dessa forma os elos fusíveis utilizam material estanho, ou liga de estanho, cuja temperatura de trabalho é inferior a 100°C e ponto de fusão 230°C. O chumbo, por sua vez, é inadequado, porque não tem a necessária dureza para evitar deformação. Considerando-se tais fatores anteriormente mencionados e o tipo de construção dos fusíveis, torna-se impossível prever o montante do aquecimento do fusível, com suficiente precisão para adotar qualquer valor ou expressão empírica.

2.3 – Religador

Os religadores automáticos são considerados pelas empresas elétricas do mundo inteiro equipamento essencial para o cumprimento de sua finalidade principal, ou seja, o fornecimento de energia elétrica, em condições confiáveis e seguras.

O desenvolvimento de religadores foi se acelerando à medida que os inconvenientes e as limitações dos elos fusíveis aumentavam os índices de interrupção. O religador é um dispositivo ideal na medida em que interrompe faltas transitórias, evitando queimas de elos fusíveis, ou se bem coordenado com elos fusíveis, seccionando apenas o trecho sob defeito, permanecendo os demais energizados. Basicamente, o religador automático é um dispositivo interruptor de defeitos, de características sofisticadas, podendo ser monofásico ou trifásico. Os interruptores propriamente ditos ficam submersos em óleo ou funcionam sob vácuo.

A operação de religador não se limita apenas a sentir e interromper defeitos na linha e efetuar religações. O religador é dotado também de um mecanismo de temporização dupla. Assim que o religador “sente” um defeito na linha, o mesmo dispara rapidamente, dentro de 0,03 a 0,04 segundos. Essa interrupção rápida reduz ao mínimo as possibilidades de danos ao sistema, evitando ao mesmo tempo a queima de fusíveis entre o local de defeito e o religador. A religação dar-se-á dentro de 1 a 2 segundos, representando uma interrupção mínima do serviço. Após uma, duas ou três interrupções rápidas, o religador automaticamente passa para o disparo temporizado. Este, proporciona mais tempo para eliminar defeitos permanentes, e, sua combinação com as interrupções rápidas, permite coordenação efetiva com outros dispositivos de proteção existentes no sistema, tais como elos fusíveis e seccionadores.

As aplicações de religadores com vistas a estabelecer proteção de sobrecorrente coordenada e seccionamento automático de linhas defeituosas são bastante numerosas.

Considerando ainda que 80 a 95% das faltas são transitórias, a alocação de religadores aumenta sensivelmente a relação custo x benefício, melhorando os índices de confiabilidade dos sistemas de distribuição DEC (duração equivalente de interrupção por unidade consumidora) e FEC (frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora). A instalação de religadores representa para as empresas um investimento muito maior com relação às chaves fusíveis, mas instalados em pontos estratégicos do sistema e funcionando em série com os fusíveis, contemplam os eventuais problemas causados pelo uso das chaves fusíveis dentre os quais:

- As chaves fusíveis podem ocasionar interrupções prolongadas, embora desnecessárias, porque é incapaz de diferenciar entre uma falta permanente e uma falta transitória. Isto pode resultar em um elevado custo operacional, para enviar equipes de manutenção, não raro a pontos muito distantes para substituir um simples fusível queimado;
- Perda de faturamento da concessionária e os inconvenientes causados aos consumidores;

- A seletividade entre fusíveis é limitada e não permite aplicações em esquemas automáticos ou manuais para manobras do sistemas tais como, seccionamento remoto ou transferência de carga.

Existem no mercado e instalados nas concessionárias diferentes tipos de modelos de religadores que diferem entre si quanto ao número de fases e o tipo de controle. Com relação ao número de fases, os religadores podem ser dos tipos:

Monofásicos: são utilizados para proteção de linhas monofásicas ou ramais de alimentação trifásicos, onde as cargas são predominantemente monofásicas, pois na eventualidade de ocorrer uma falha permanente para terra, será bloqueada somente a fase com falha, enquanto é mantido o serviço aos consumidores ligados às outras duas fases.

Trifásicos: são utilizados onde é necessário o bloqueio das três fases simultaneamente, para qualquer tipo de falha permanente, a fim de evitar que as cargas trifásicas sejam alimentadas com apenas duas fases. Podem ser:

- **Trifásicos com Operação Monofásica e Bloqueio Trifásico:** são constituídos de três religadores monofásicos, montados num único tanque, com os mecanismos interligados apenas para ser processado o bloqueio trifásico. Cada fase opera independentemente em relação às correntes de defeito. Se qualquer das fases operar o número pré-ajustado para bloqueio, as duas fases são abertas e bloqueadas através do mecanismo que as interligam.
- **Trifásicos com Operação Trifásicas e Bloqueio Trifásico:** são constituídos de um único religador, que opera e bloqueia sempre trifasicamente, independentemente do tipo de falha ocorrida, isto é mesmo que a falha afete apenas uma das fases, todos os contatos realizam a operação de abertura e religamento.

Relativo ao tipo de controle, os religadores podem ser dos tipos:

Controle Hidráulico: nos religadores com este tipo de controle, as correntes são detectadas pelas bobinas de disparo que estão ligadas em série com a linha, quando, através

da bobina, flui uma corrente igual ou superior à corrente mínima de disparo do religador, o núcleo da bobina é atraído para o seu interior, provocando a abertura dos contatos principais do religador.

Controle Eletrônico: este tipo de controle apresenta maior flexibilidade e mais facilidade para ajustes e ensaios, além de ser mais preciso, comparativamente ao de controle hidráulico. O controle eletrônico é abrigado numa caixa separada do religador e permite modificações de ajuste no equipamento, sem que seja necessária sua abertura: característica (*tempo x corrente*); níveis de corrente de disparo; seqüência de operação.

2.4 - Seccionalizador

O seccionalizador ou seccionador é um dispositivo automático projetado para operar em conjunto com o religador, sendo basicamente uma chave a óleo, monofásica ou trifásica e se assemelha pela aparência a um religador.

O seccionalizador, entretanto, não interrompe a corrente de defeito. Fica ligado em série, a certa distância, no lado da carga de um religador. Cada vez que o religador interrompe uma corrente de defeito, o seccionalizador conta a interrupção, e após um pré-determinado número de interrupções (uma, duas ou três), abre seus contatos, quando a corrente que circula por ele cai abaixo de determinado nível e antes da abertura definitiva do religador. Não existe nenhuma conexão elétrica ou mesmo mecânica entre ambos. Desta forma, um trecho sob condições de falta permanente, pode ser isolada, permanecendo o religador e os demais trechos em situações normais energizados.

Embora o seccionalizador não interrompa corrente de defeito, pode interromper sua corrente nominal e ser empregado como chave desligadora para seccionamento manual de sob carga.

Da mesma forma que os religadores, existem no mercado e nas concessionárias diferentes tipos e modelos de religadores que podem ser classificados quanto ao número de

fases e quanto ao tipo de controle. Referentes ao número de fases os seccionalizadores podem ser classificados como:

Monofásicos: são utilizados exclusivamente para seccionamento automático de sistemas monofásico primários de distribuição.

Trifásicos: são utilizados exclusivamente para seccionamento de sistemas trifásicos primários de distribuição.

Com relação ao tipo de controle, embora atualmente se encontre no mercado os seccionalizadores eletrônicos, os seccionalizadores podem ser classificados em:

Controle hidráulico: este mecanismo compõe-se de uma bobina-série e do respectivo êmbolo, um pistão de disparo, uma mola e duas válvulas de retenção. Um seccionizador hidráulico opera, quando sua bobina-série é percorrida por um fluxo de corrente que exceda 160% de sua corrente nominal.

Quando se tem um fluxo de corrente normal de carga através da bobina-série, a pressão da mola mantém o êmbolo na parte superior de seu curso. Quando o fluxo de corrente através da bobina atingir seu nível atuante, o campo magnético resultante puxa o êmbolo para baixo.

Este movimento descendente fecha a válvula de retenção situada na base do mecanismo e, ao mesmo tempo, força uma carga de óleo para cima, que vai se depositar no espaço vazio deixado pelo êmbolo. A pressão do óleo na parte superior do mecanismo faz com que seja aberta a válvula de retenção, permitindo assim o fluxo de óleo. O êmbolo é mantido na posição inferior, até que o fluxo de corrente da bobina caia para um valor menor que 40% de seu nível atuante.

A operação de contagem de um seccionizador típico se faz quando o religador de retaguarda interrompe uma sobrecorrente. Neste instante, ter-se-á uma desenergização da bobina e, com isso, a perda do campo magnético. Como o êmbolo é mantido na posição inferior do mecanismo pela força do campo atuante, uma vez cessada esta força, o êmbolo retornará à sua posição superior, impelido pela força restauradora da mola. O movimento ascendente do êmbolo ocasionará o fechamento da válvula de retenção superior e, por

consequente, o óleo situado acima do êmbolo será forçado para cima e irá ocupar a parte da câmara ocupada pelo pistão de disparo. Esta elevação do pistão de disparo fará com que o seccionalizador registre uma contagem.

Se o equipamento for ajustado para mais de uma contagem, esta seqüência é repetida, até que a haste do pistão encoste na alavanca de disparo, que então abrirá definitivamente os contatos. Depois de cada contagem, o pistão de disparo retorna à posição original; é isto o que determina o tempo de memória do seccionalizador. Caso o número programado de contagem seja completado dentro do período de memória, o dispositivo abrirá seus contatos e só poderá ser fechado manualmente. Nas empresas concessionárias de energia existem instalados muitos equipamentos com este tipo de controle.

Controle eletrônico: como acontece com os seccionalizadores com controle hidráulico, a unidade controlada eletronicamente preparam-se para contar quando ocorre uma sobrecorrente e completam a contagem quando o circuito for desenergizado. A diferença está no fato de que os seccionalizadores com controle eletrônico têm suas operações supervisionadas por circuitos de estado sólido. As funções deste controle básico são definidas por componentes eletrônicos, localizados em uma placa, tendo o circuito impresso.

A corrente que passa pelo seccionalizador é sentida por transformadores de corrente tipo bucha, com relação 1000:1. Depois de transformada, a corrente passa pelo transformador acoplador, para em seguida ser retificada. Logo após, a corrente passará pelo relé de contagem, que irá carregar os capacitores de transferência. A energia desses capacitores é, por sua vez, transmitida pelos circuitos de contagem e memória. Quando for atingido o número preestabelecido de contagens, um circuito de disparo é então energizado, com a finalidade de atuar sobre a bobina de disparo, por meio de um capacitor.

2.5 – Disjuntor Equipado com Relé

O disjuntor do circuito alimentador localizado na subestação e seu esquema de proteção consiste de relés de fase, neutro e de religamento.

Os relés são dispositivos com característica de tempo definido ou inverso e que atuam quando a corrente em um circuito de corrente alternada excede a um valor prefixado.

Os disjuntores são dispositivos mecânicos de abertura e fechamento comandado pelos relés. Os relés, ao detectarem uma perturbação que venha a comprometer os equipamentos ou o funcionamento normal do sistema, enviam um sinal elétrico que comanda a abertura de um ou mais disjuntores, de modo a isolar o equipamento ou parte do sistema afetado pela falta, impedindo que a perturbação danifique equipamentos, comprometa a operação ou se propague para outros componentes não defeituosos.

Para proteção de sistemas de distribuição, os tipos mais importantes de relés são os de sobrecorrente e os relés de religamento.

Relé de Sobrecorrente: Os relés de sobrecorrente supervisionam a corrente do circuito, comandando abertura de um disjuntor, quando esta corrente ultrapassa um valor prefixado. Os relés de sobrecorrente, de acordo com os tempos de atuação, podem ser classificados nos seguintes tipos:

- **Relé de Sobrecorrente Instantâneo:** A operação se completa em um intervalo de tempo muito curto, após a ocorrência de sobrecorrentes, e, praticamente, independe de suas variações. Não há retardo de tempo propositalmente incluído na seqüência detecção-operação.
- **Relés de Sobrecorrentes de Tempo Definido:** O tempo de atuação, neste caso, independe do valor da corrente.
- **Relés de Sobrecorrente de Tempo Inverso:** O tempo de operação é inversamente proporcional ao valor da corrente.

- **Relés de Sobrecorrente de Tempo Muito Inverso:** São relés que apresentam variações mais acentuadas das características do tempo de atuação com a corrente de atuação.

Relé de Religamento: Os relés de religamento são relés auxiliares, usados para comandar o religamento dos disjuntores correspondentes, depois de terem sido abertos por acionamento dos relés de sobrecorrente. Há possibilidade de diversas combinações de ordens instantâneas e temporizadas.

3 - Alocação Ótima dos Dispositivos de Proteção em S.D.E.E.

Neste capítulo será abordado o problema da alocação ótima dos dispositivos de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica, com o objetivo de melhorar os índices de confiabilidade das concessionárias e o aumento do faturamento. O número e os tipos de dispositivos de proteção a serem instalados em um alimentador, em particular dependerão da importância do sistema, magnitude e tipo de carga, da configuração do circuito e da exposição a riscos de diferentes naturezas, que podem levar o sistema a condições de faltas permanentes ou temporárias. Estas diretrizes sendo alcançadas, a decisão da engenharia representa o papel principal para alcançar um baixo custo. A meta fundamental do serviço elétrico sempre foi servir seus clientes com um suprimento de energia segura e de baixo custo com um nível aceitável de confiabilidade para o serviço.

Na literatura a alocação ótima de dispositivos de proteção é formulada como um problema de programação não linear inteiro do tipo binário [1-6]. Neste trabalho utilizando-se alguns conceitos apresentados e definidos na literatura [1-6] e a definição dos índices de confiabilidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica, formula-se a alocação ótima de dispositivos de proteção como um problema de programação não linear binária (0/1), considerando-se uma função objetivo não linear e um conjunto de restrições lineares e para

a solução deste problema propõe-se o uso de algoritmos evolutivos [10-14]. Como resultado da aplicação deste algoritmo obtém-se os tipos e os locais onde deverão ser alocados os dispositivos de proteção em um alimentador de distribuição.

3.1 – Definição dos Índices de Confiabilidade do Sistema

Os serviços de distribuição de energia elétrica no Brasil são regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através da Resolução N° 24, de 27 de Janeiro de 2000. E compete a ANEEL estimular a melhoria do serviço prestado e zelar, direta ou indiretamente, pela sua boa qualidade. A ANEEL estabelece, as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica, nos seus aspectos de duração e frequência, a serem observadas pelas concessionárias. A continuidade da distribuição de energia elétrica deverá ser supervisionada, avaliada e controlada por meio de indicadores que expressem os valores de Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC).

O DEC pode ser definido como, intervalo de tempo que, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica. Para a apuração do DEC deverá ser utilizada a seguinte fórmula:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^K Ca(i)xt(i)}{Cc}$$

O FEC pode ser definido como, número de interrupções ocorrido, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado. Para a apuração do FEC deverá ser utilizada a seguinte fórmula:

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^K Ca(i)}{Cc}$$

Em que:

$Ca(i)$ = Número de unidades consumidoras interrompidas em um evento (i), no período de apuração;

$t(i)$ = Duração de cada evento (i), no período de apuração;

i = Índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras;

K = Número máximo de eventos no período considerado;

Cc = Número total de unidades consumidoras, do conjunto considerado, no final do período de apuração.

Para toda interrupção de longa duração ocorrida em cada unidade consumidora do conjunto deverão ser apresentadas as seguintes informações:

- 1) – Fator gerador;
- 2) – Data, hora e centésimo de minutos do início e restabelecimento da interrupção;
- 3) – Número de unidades consumidoras atingidas em cada interrupção.

3.2 – Modelagem Matemática Proposta para o Problema de Alocação de Dispositivo de Proteção

A modelagem matemática consiste na representação de um problema da vida real através de um modelo matemático, relacionando um conjunto de variáveis de decisão as quais podem assumir formas e tipos variados. Em geral, quanto mais exata é a modelagem matemática, mais complexa é a resolução. Assim, deve existir um compromisso entre a modelagem matemática e a técnica de solução: a modelagem matemática deve representar de maneira adequada o problema da vida real e, além disso, permitir sua resolução por técnicas disponíveis e com esforços computacionais aceitáveis.

Na alocação de dispositivos de proteção, o problema da vida real, existe um sistema elétrico com uma topologia corrente e se deseja identificar, os tipos e a localização dos dispositivos de proteção no alimentador de distribuição, com vistas a melhorar os índices de confiabilidade. A possível localização baseia-se no número de clientes (N_{qi}), na carga que está conectada (L_{qi}), nas taxas de faltas permanentes (I_{qi}) e temporárias (g_{qi}) e na extensão do alimentador.

Na técnica proposta divide-se o alimentador de distribuição em seção principal e ramais laterais. Os ramais laterais são divididos em três categorias com rótulo de 1,2 ou 3:

Categoria 1 não é possível a instalação de nenhum dispositivo de proteção (trechos pequenos) isto devido ao custo.

Categoria 2 é possível apenas à instalação de fusíveis (trecho do ramal com carga leve).

Categoria 3 é possível a instalação de vários tipos de dispositivos de proteção (trecho do ramal com carga pesada).

As seguintes hipóteses devem ser consideradas no equacionamento do problema:

- Dispositivos trifásicos (Disjuntores, Religadores, Seccionalizadores, etc) minimizam o número de clientes afetados por faltas permanentes e restauram automaticamente a energia para faltas temporárias.

- Dispositivos monofásicos (Fusíveis) não têm capacidade de religamento e assim, faltas temporárias são tratadas como sendo faltas permanentes.

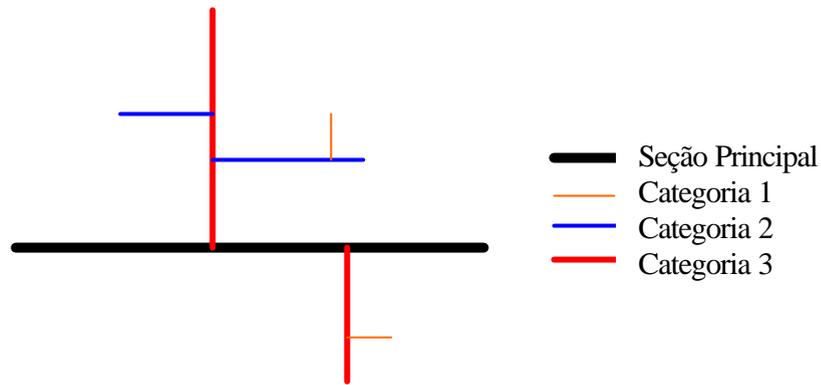


Figura 3.1 Classificação das Seções do Alimentador

Em geral, o impacto sobre os clientes da alocação dos dispositivos no sistema, está relacionado à frequência e duração da interrupção. Sendo assim procura-se elaborar uma modelagem voltada a melhorar os índices de confiabilidade DEC e FEC, estabelecidos pela agência reguladora. Desta forma as concessionárias poderiam atender seus consumidores com uma energia confiável e atender as normas exigidas pela ANEEL.

3.2.1 – Formulação da Função Objetivo

A modelagem matemática do Índice de Confiabilidade da Rede (ICR), proposta neste trabalho é baseado no índice FEC definido anteriormente e para um alimentador de distribuição é escrito como:

$$ICR = \frac{\sum j_i * N_i}{N_T} \quad (1)$$

Em que:

- J_i - Taxas de faltas na seção i ;
- N_i - É o número de cliente na seção i ;
- N_T - É o número total de clientes no alimentador.

A equação (1) pode ser particionada nas contribuições da seção principal e dos ramais como:

$$\sum J_i * N_i = \sum_{q=1}^{a+b+1} A_q$$
$$A = \sum_{q=1}^{a+b+1} A_q \quad (2)$$

Em que:

- q - Número da seção (1 para seção principal, 2 até n para ramais)
- a - Número de ramais pertencentes à categoria 3;
- b - Número de ramais pertencentes à categoria 2;
- A - Representa o número de clientes ou potência desligada do circuito de distribuição, considerando-se a contribuição da seção principal e dos ramais.

O primeiro termo, $q = 1$, é a contribuição para a seção principal.

A formulação da função objetivo proposta neste trabalho para o problema de alocação ótima de dispositivos de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica é obtida a partir do lado direito da equação (2), que representa o número de consumidores ou o montante de cargas desligadas devido a incidência de faltas temporárias (g_{ji}) e permanentes (I_{qi}) no alimentador sob estudo, no período de um ano, por exemplo.

Deve-se trabalhar com o intuito de maximizar as vantagens da instalação dos dispositivos de proteção e minimizar as desvantagens da instalação dos mesmos. As vantagens estão relacionadas com a redução do tempo de desligamento da rede ou setores de consumidores devido à incidência de faltas temporárias, e minimizar o número de consumidores afetados por estas faltas.

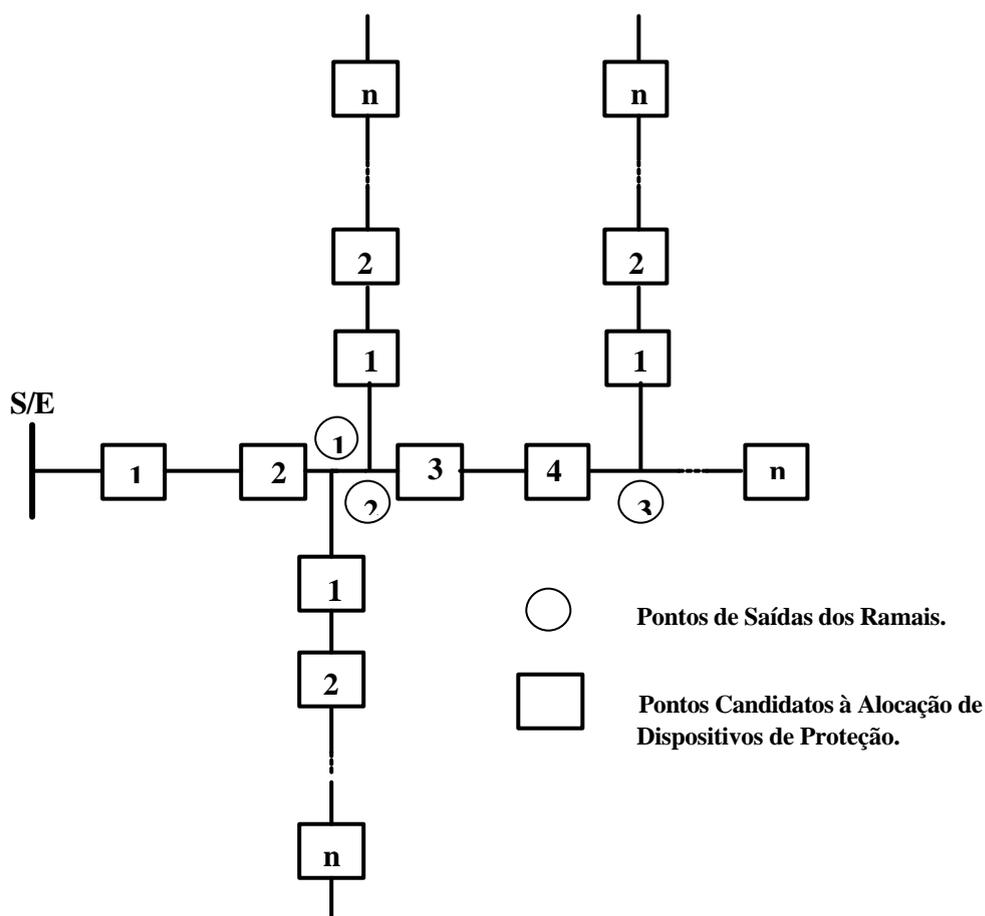


Figura 3.2 Circuito Radial Simples com Várias Ramificação

Considere o sistema da Figura 3.2 que representa um circuito qualquer de um sistema de distribuição com possibilidade de se alocar dispositivos de proteção em qualquer um dos pontos $(1, 2, \dots, n)$. Para cada uma das seções definidas por esses pontos tem-se disponível os dados referentes ao número de consumidores (N_{qj}) e aos índices de faltas

permanentes e temporárias (I_{qi} , g_{qi}). A função objetivo proposta neste trabalho, baseada nas hipóteses estabelecidas para alocação da proteção, é dada por:

$$\begin{aligned}
 & \begin{array}{c} \boxed{\text{I Parcela}} \\ \text{---} \\ \end{array} \qquad \begin{array}{c} \boxed{\text{II Parcela}} \\ \text{---} \\ \end{array} \\
 A = & \sum_{i=1}^{qn} (I_{qi} + g_{qi}) \sum_{j=1}^{qn} N_{qj} - \sum_{i=1}^{sp} X_{qi1} \left\{ \sum_{k=i}^{sp} g_{qk} \left[N_{qi} + \sum_{j=i+1}^{sp} N_{qj} \prod_{l=i+1}^j (1 - X_{ql1}) \right] \right\} - \\
 & \begin{array}{c} \boxed{\text{III Parcela}} \\ \text{---} \\ \end{array} \\
 - & \sum_{i=1}^{sp} X_{qi1} \left\{ \sum_{v=NR(1)-NR(i)+1}^{NR(1)} \sum_{w=1}^{R(v)} g_{qw} \left[N_{qi} + \sum_{j=i+1}^{sp} N_{qj} \prod_{l=i+1}^j (1 - X_{ql1}) + \sum_{s=1}^{R(v)} N_{qs} \prod_{t=1}^s (1 - X_{qt1}) \prod_{a=i+1}^{LK(v)} (1 - X_{qa1}) \right] \right\} + \\
 & \begin{array}{c} \boxed{\text{IV Parcela}} \\ \text{---} \\ \end{array} \qquad \begin{array}{c} \boxed{\text{V Parcela}} \\ \text{---} \\ \end{array} \\
 + & \sum_{j=1}^{sp} I_{qj} \left\{ \left[\sum_{k=j}^{sp} N_{qk} + \sum_{l=1}^{j-1, j \neq l} N_{ql} \prod_{m=l+1}^j (1 - X_{qml}) \right] + \left[\sum_{s=NR(1)-NR(i)+1}^{NR(1)} \sum_{w=1}^{R(s)} N_{qw} + \sum_{s=1}^{NRA(j)} \sum_{t=1}^{R(s)} N_{qt} \prod_{p=j}^{LKA(s)} (1 - X_{qp1}) \right] \right\} + \\
 & \begin{array}{c} \boxed{\text{VI Parcela}} \\ \text{---} \\ \end{array} \qquad \begin{array}{c} \boxed{\text{VII Parcela}} \\ \text{---} \\ \end{array} \\
 + & \sum_{s=1}^{NR(1)} \sum_{w=1}^{R(s)} I_{qw} \left\{ \left[\sum_{k=w}^{R(s)} N_{qk} + \sum_{l=1}^{w-1, w \neq l} N_{ql} \prod_{m=l+1}^w (1 - X_{qml}) \right] + \left[\sum_{j=LK(s)}^{sp} N_{qj} \prod_{k=w}^j (1 - X_{qk1}) + \sum_{t=1}^{NRA(j)} \sum_{p=1}^{R(t)} N_{qp} \prod_{k=w}^p (1 - X_{qk1}) \right] \right\} + \\
 & \begin{array}{c} \boxed{\text{VIII Parcela}} \\ \text{---} \\ \end{array} \qquad \begin{array}{c} \boxed{\text{IX Parcela}} \\ \text{---} \\ \end{array} \\
 + & \sum_{s=1}^{NR(1)} \sum_{w=1}^{R(s)} I_{qw} \left[\sum_{l=LK(s)-1}^1 N_{ql} \prod_{k=w}^l (1 - X_{qk1}) \prod_{m=LK(s)}^l (1 - X_{qm1}) + \sum_{v=1}^{NRA(l+1)} \sum_{t=1}^{R(v)} N_{qt} \prod_{m=LK(s)}^{LKA(v)} (1 - X_{qm1}) \right] \quad (3)
 \end{aligned}$$

Em que:

- qn - Número de locais para possíveis alocação de dispositivos no alimentador (Seção Principal e Ramais);
- sp - Número de locais para possíveis alocação de dispositivos na seção principal;
- I_{qi} - Taxa de falta permanente para a seção i ;
- g_i - Taxa de falta temporária para seção i ;
- N_{qj} - Número de clientes para a seção j ;
- X_{abc} - Variável que define a seção, o ponto na seção e o tipo de dispositivo que poderá ser instalado;
- a - Define a seção do alimentador (1 para seção principal e 2...n para os ramais);
- b - Define o ponto que está em determinada seção;
- c - Define o tipo de dispositivo (1 para dispositivo trifásico e 2 para dispositivo monofásico).
- $NR(i)$ - Número de ramais a jusante do ponto i ;
- $R(v)$ - Número de pontos para possível alocação de dispositivos no ramal v ;
- $LK(v)$ - Primeiro ponto de possível alocação de dispositivos na seção principal do alimentador, a montante do local inicial da ramificação do ramal v ;
- $NRA(j)$ - Número de ramais a montante do ponto j ;
- $LKA(s)$ - Primeiro ponto de possível alocação de dispositivos na seção principal do alimentador, a jusante do local inicial da ramificação do ramal s ;

A seguir, apresentam-se as interpretações físicas das parcelas que compõem à função objetivo no contexto do problema sob análise.

A parcela I, na equação (3) representa o total de consumidores que serão desligados devido à incidência de faltas permanentes e temporárias no alimentador, caso não haja nenhum dispositivo de proteção instalado.

A parcela II representa o número de consumidores que não serão desligados devido à incidência de faltas temporárias na seção principal do alimentador com a instalação de dispositivos de proteção. Visa contemplar tanto para a seção principal como para os ramais que o maior número de consumidores e/ou de cargas estejam protegidos na incidência destas faltas.

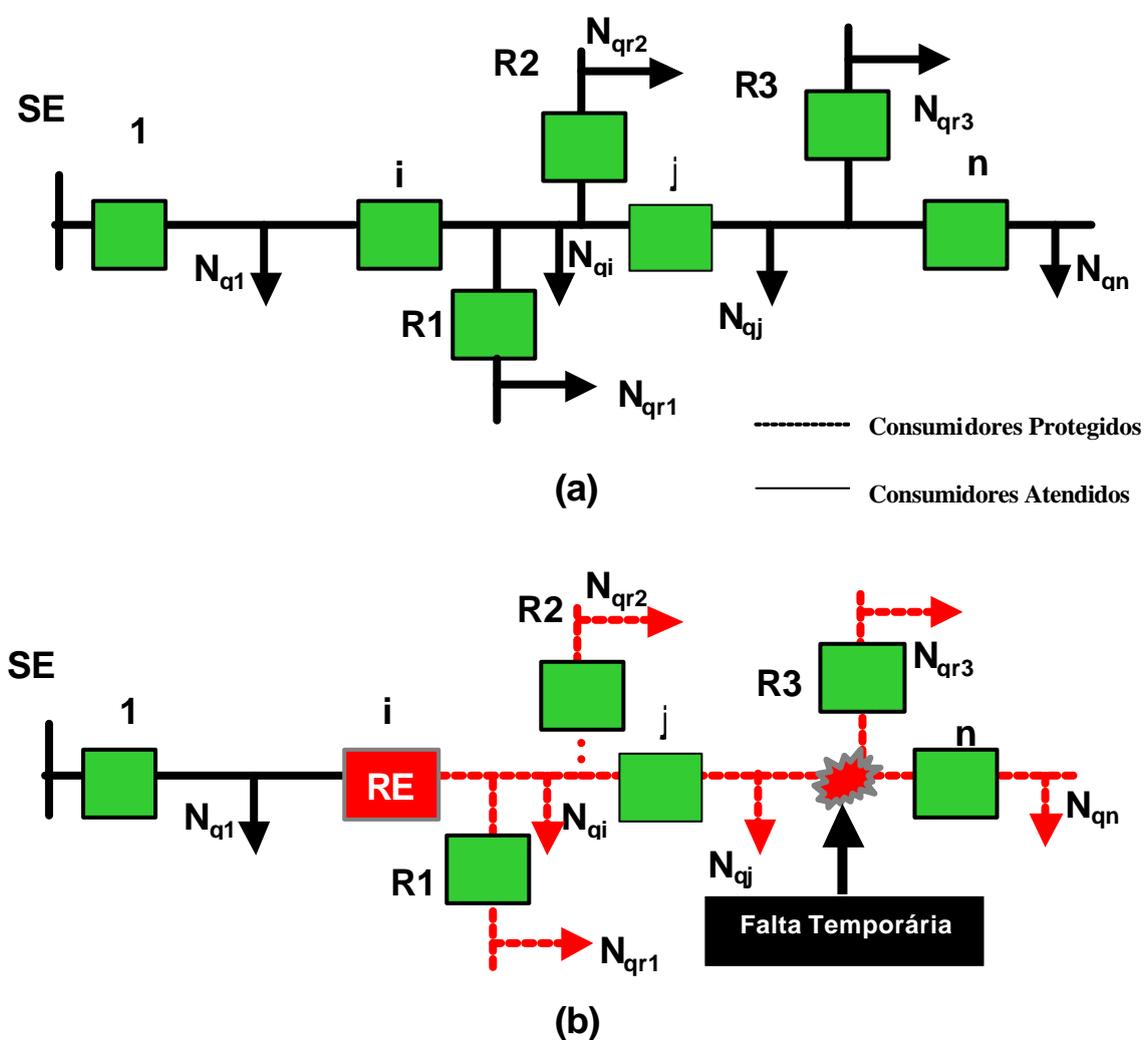


Figura 3.3 – Circuito Ilustrativo para Interpretação da Parcela II da F.O

Para análise da parcela II considere o arranjo da Figura 3.3 (a) elaborado com base no circuito da Figura 3.2; em que $R1$, $R2$ e $R3$ representam possíveis pontos para alocação de religadores nos ramais, N_{qri} o número de consumidores do ramal i ; N_{qj} o número de consumidores do ponto j da seção principal. Na incidência de uma falta temporária entre os pontos j e n da seção principal do alimentador, Figura 3.3 (b), com a alocação de um religador no ponto i todos os consumidores a sua jusante estarão protegidos para esta falta. Existindo mais de um religador no alimentador principal utiliza-se o conceito de dispositivo protetor e protegido, ou seja o religador instalado no ponto i será proteção principal para faltas temporárias até o ponto onde existe um outro religador instalado em série com ele. Devido essa condição de coordenação é que aparecem na parcela II, os termos

$$\left(\sum_{j=i+1}^{sp} N_{qj} \prod_{l=i+1}^j (1 - x_{ql}) \right).$$

A parcela III possui as mesmas características da II, porém representa o número de consumidores que não serão desligados devido à incidência de faltas temporárias nos ramais. Desta forma garante que a instalação de dispositivos de proteção em locais estratégicos diminua o número de consumidores e/ou carga instalada tanto no alimentador como nos ramais que serão atingidos devido à incidência desse tipo de faltas. Conforme ilustrado na Figura 3.4 para uma falta temporária no ramal 2, atuará o religador instalado na seção principal, caso não exista religadores instalados nesse ramal. Com a instalação de religadores em outros pontos da seção principal e dos ramais deve prevalecer a atuação do dispositivo de proteção principal nas respectivas seções.

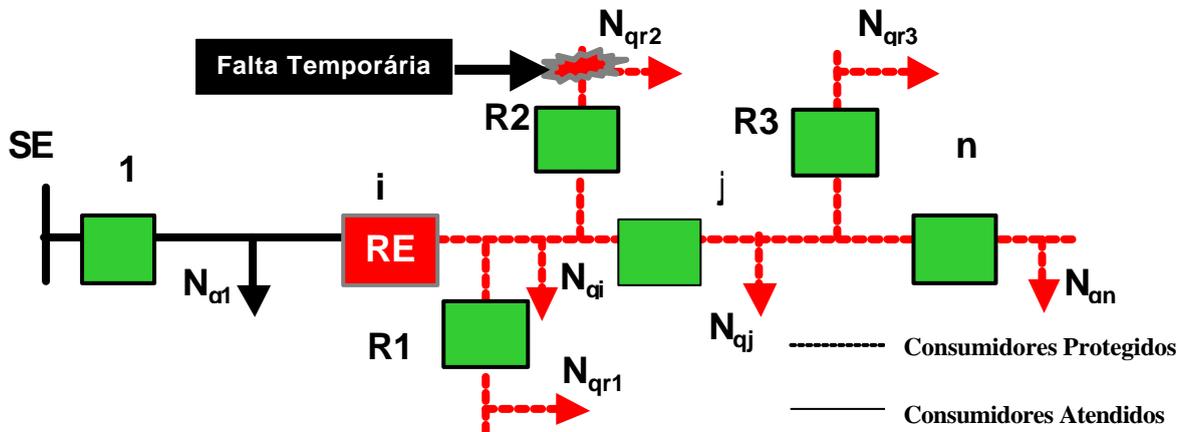


Figura 3.4 – Ilustração dos Efeitos da Alocação de Religadores nos Ramais na F.O devido Incidência de Faltas Temporárias.

As demais parcelas (IV à IX), na equação (3) representam as desvantagens da instalação de dispositivos de proteção que devem ser reduzidas. Estas desvantagens estão relacionadas com os aspectos da coordenação, seletividade e principalmente locais onde estarão instalados os dispositivos de proteção que devem ser determinados pelo processo de otimização com vistas a reduzir o número de consumidores e/ou a carga instalada, que serão desligados devido a incidência de faltas permanentes.

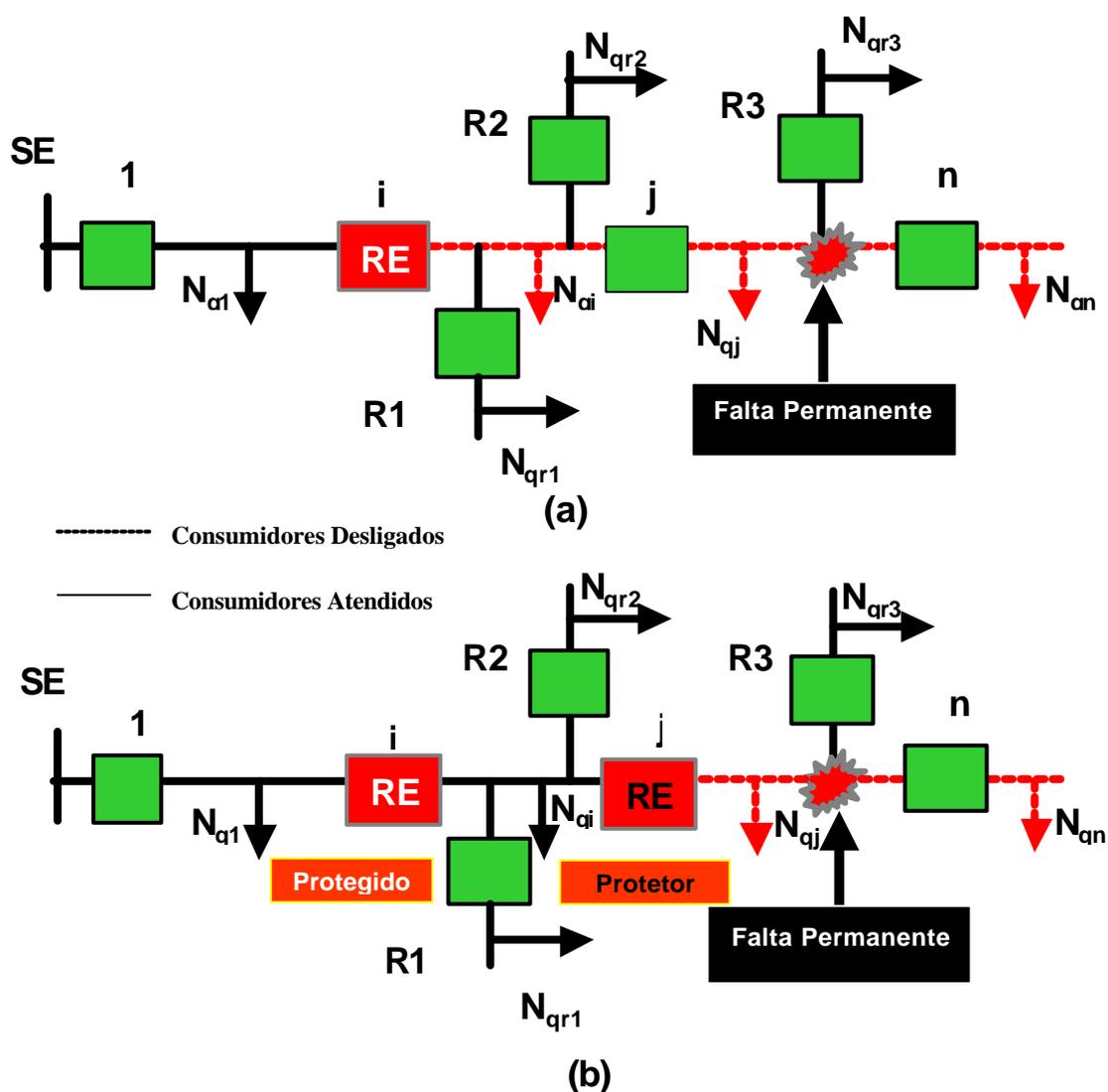


Figura 3.5 – Efeito da Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados na Seção Principal para Faltas Permanentes na Seção Principal sobre os Consumidores da Seção Principal.

Na parcela IV consideram-se os efeitos da alocação de dispositivos de proteção na seção principal, que serão refletidos nos consumidores desta seção devido à incidência de faltas permanentes apenas nesta seção.

A Figura 3.5 (a) ilustra que, com a incidência de uma falta permanente na seção principal e com a alocação de um religador no ponto i , todos os consumidores da seção principal a jusante do ponto i serão desligados devido à incidência desta falta.

Na Figura 3.5 (b), com a incidência de uma falta permanente na seção principal e com a alocação de um religador no ponto i e outro no ponto j , levando em consideração o conceito de dispositivo protegido e protetor, apenas os consumidores da seção principal a jusante do ponto j serão desligados devido à incidência desta falta. Observa-se que houve uma diminuição no número de consumidores afetados, devido à alocação do religador no ponto j .

A parcela V reflete, os efeitos da alocação de dispositivos de proteção na seção principal, nos consumidores e/ou cargas instaladas nos ramais devido a incidência de faltas na seção principal.

Na Figura 3.6 (a), com a incidência de uma falta permanente na seção principal e com a alocação de um religador no ponto i , todos os consumidores dos ramais a jusante do ponto i serão desligados devido à incidência desta falta.

Na Figura 3.6 (b), com a incidência de uma falta permanente na seção principal e com a alocação de um religador no ponto i e no ponto j , levando em consideração o conceito de dispositivo protegido e protetor, apenas os consumidores dos ramais à jusante do ponto j serão desligados devido à incidência desta falta. Observa-se que houve uma diminuição no número de consumidores afetados, isso devido à alocação do religador no ponto j .

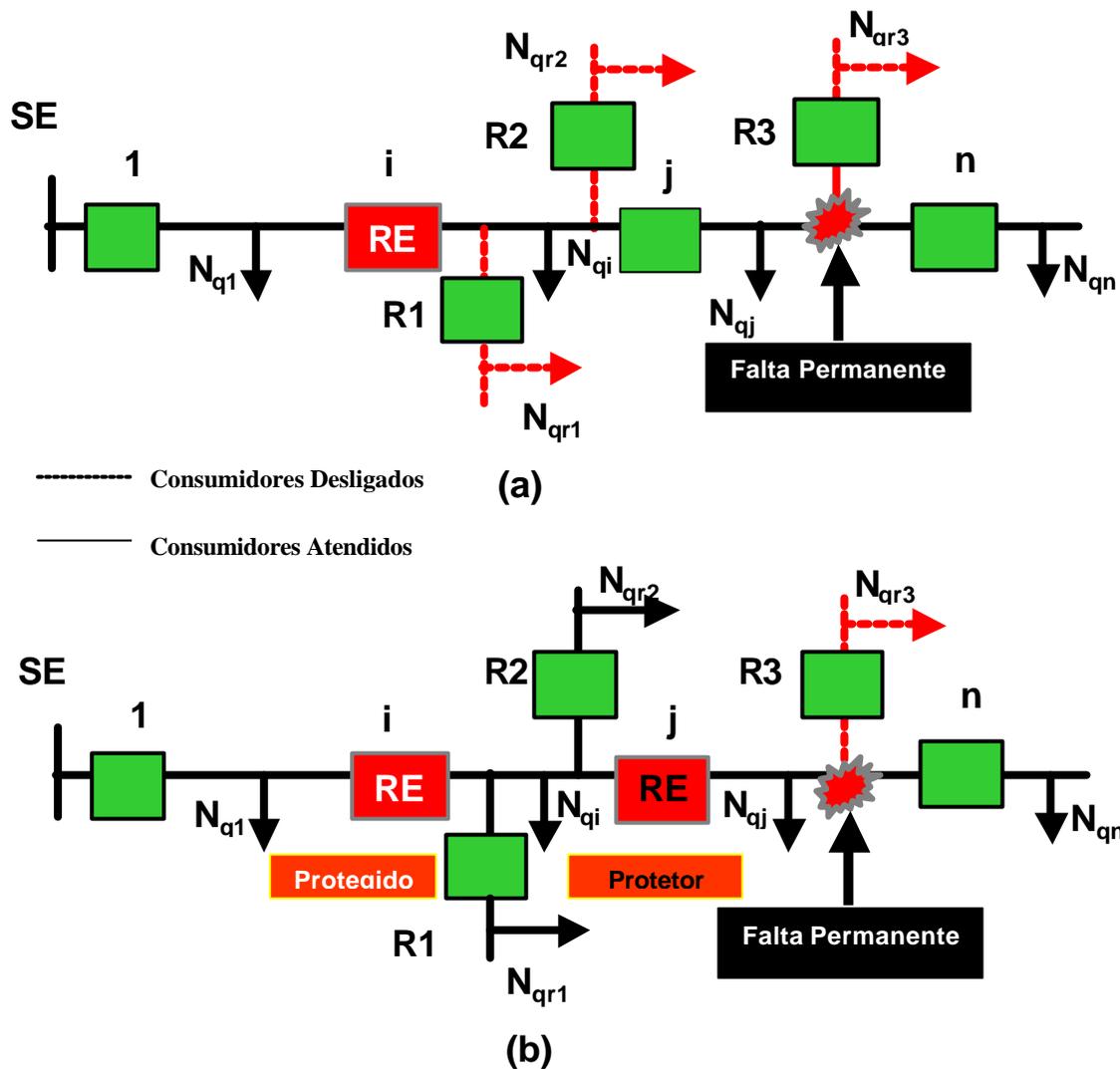


Figura 3.6 – Efeito da Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados na Seção Principal para Falhas Permanentes na Seção Principal sobre os Consumidores dos Ramais.

A parcela VI, representa o efeito da alocação ou não da proteção nos pontos pré-selecionados, no número de clientes e/ou cargas instaladas em cada um dos ramais que serão atingidos devido à incidência de faltas permanentes, nos respectivos ramais.

Na Figura 3.7, com a incidência de uma falha permanente no ramal e com a alocação de um religador no ponto *R2*, todos os consumidores à jusante do ponto *R2* serão desligados devido à incidência desta falha, estando todos os demais consumidores do circuito protegidos para esta falha.

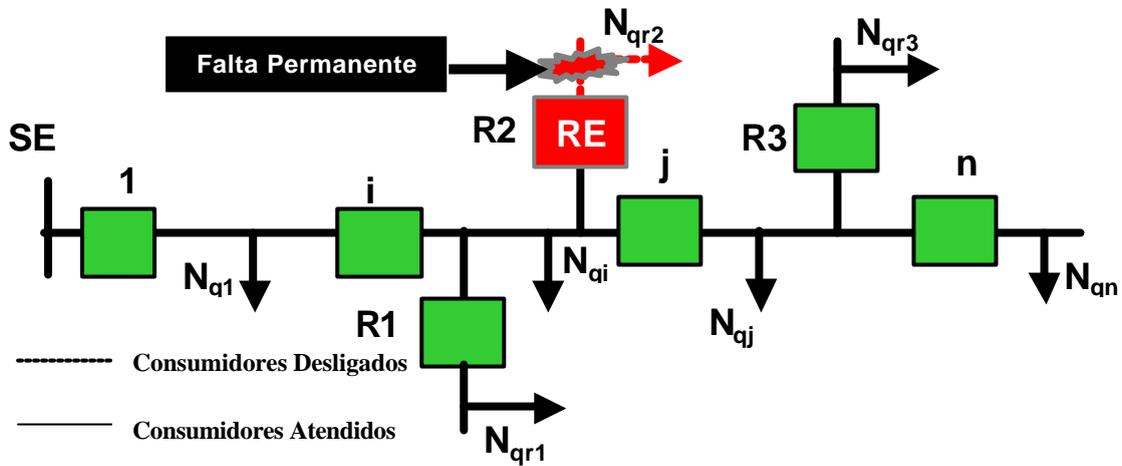


Figura 3.7 – Efeito da Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados nos Ramais para Falta Permanente nos Ramais sobre os Consumidores dos Ramais.

A parcela VII reflete os efeitos de alocar ou não dispositivos de proteção em pontos pré-selecionados nos ramais. Esses efeitos serão refletidos nos consumidores e/ou cargas instaladas nos pontos a jusante do ramal considerado, ou seja na seção principal e respectivos ramais, para incidência de faltas permanentes no ramal sob análise.

Na Figura 3.8 (a), com a incidência de uma falta permanente no ramal e com a alocação de um religador no ponto i , todos os consumidores à jusante do ponto i serão desligados devido à incidência desta falta.

Na Figura 3.8 (b), com a incidência de uma falta permanente no ramal e com a alocação de um religador no ponto i e no ponto $R2$, levando em consideração o conceito de dispositivo protegido e protetor, apenas os consumidores dos ramais à jusante do ponto $R2$ serão desligados devido à incidência desta falta. Observa-se que houve uma diminuição no número de consumidores afetados, isso devido à alocação do religador no ponto $R2$.

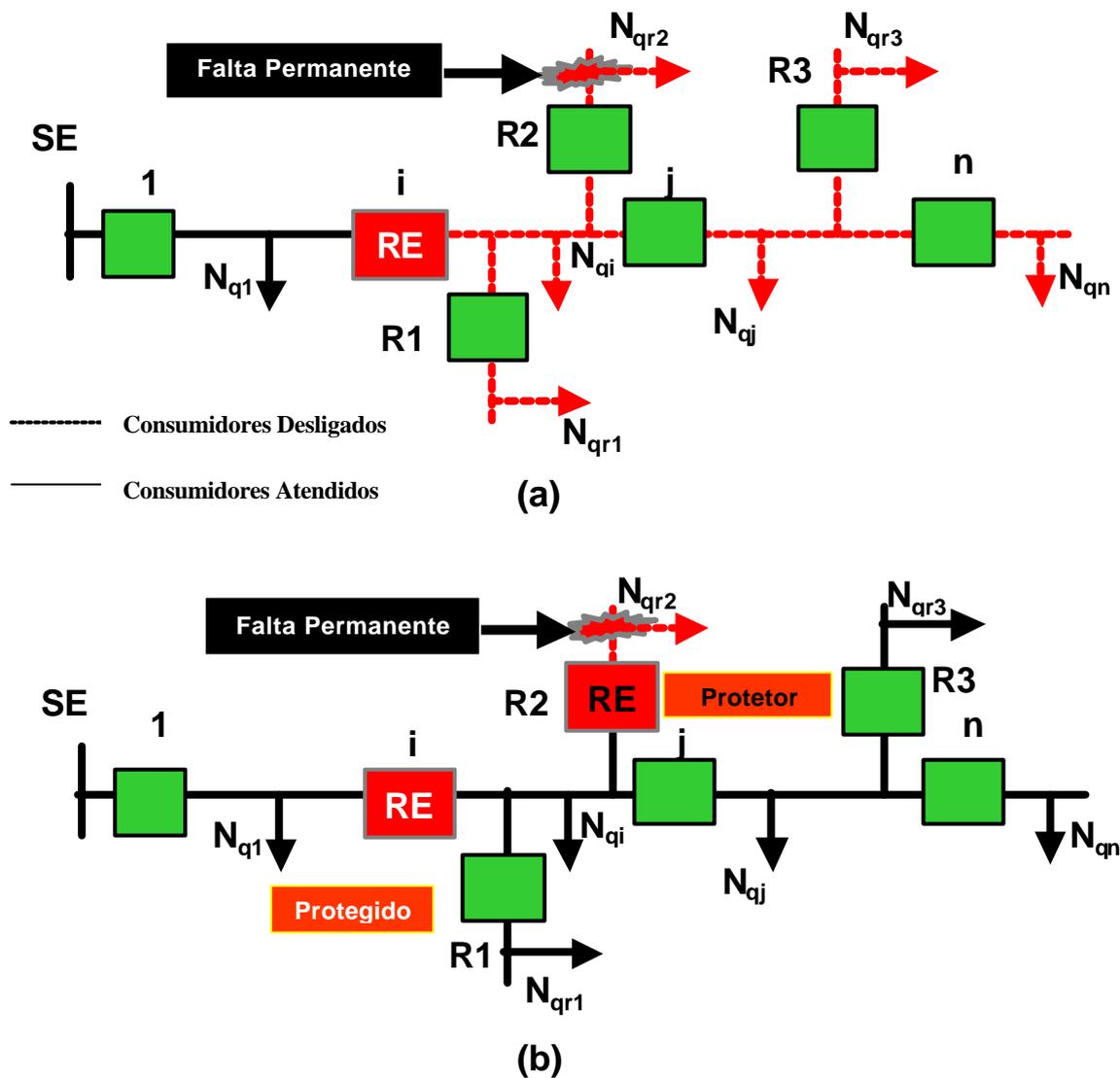


Figura 3.8 – Efeito da Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados nos Ramais ou na Seção Principal para Falta Permanentes nos Ramais sobre os Consumidores a Jusante do Ramal (Ramais e da Seção Principal).

As parcelas VIII e IX consideram o efeito da alocação ou não da proteção nos pontos pré-selecionados nos ramais, e nos pontos a montante do ramal considerado na seção principal. Esses efeitos são refletidos nos consumidores e/ou cargas instaladas nos pontos a montante dos pontos considerados no ramal sob estudo e pontos a montante do alimentador principal considerando os respectivos ramais.

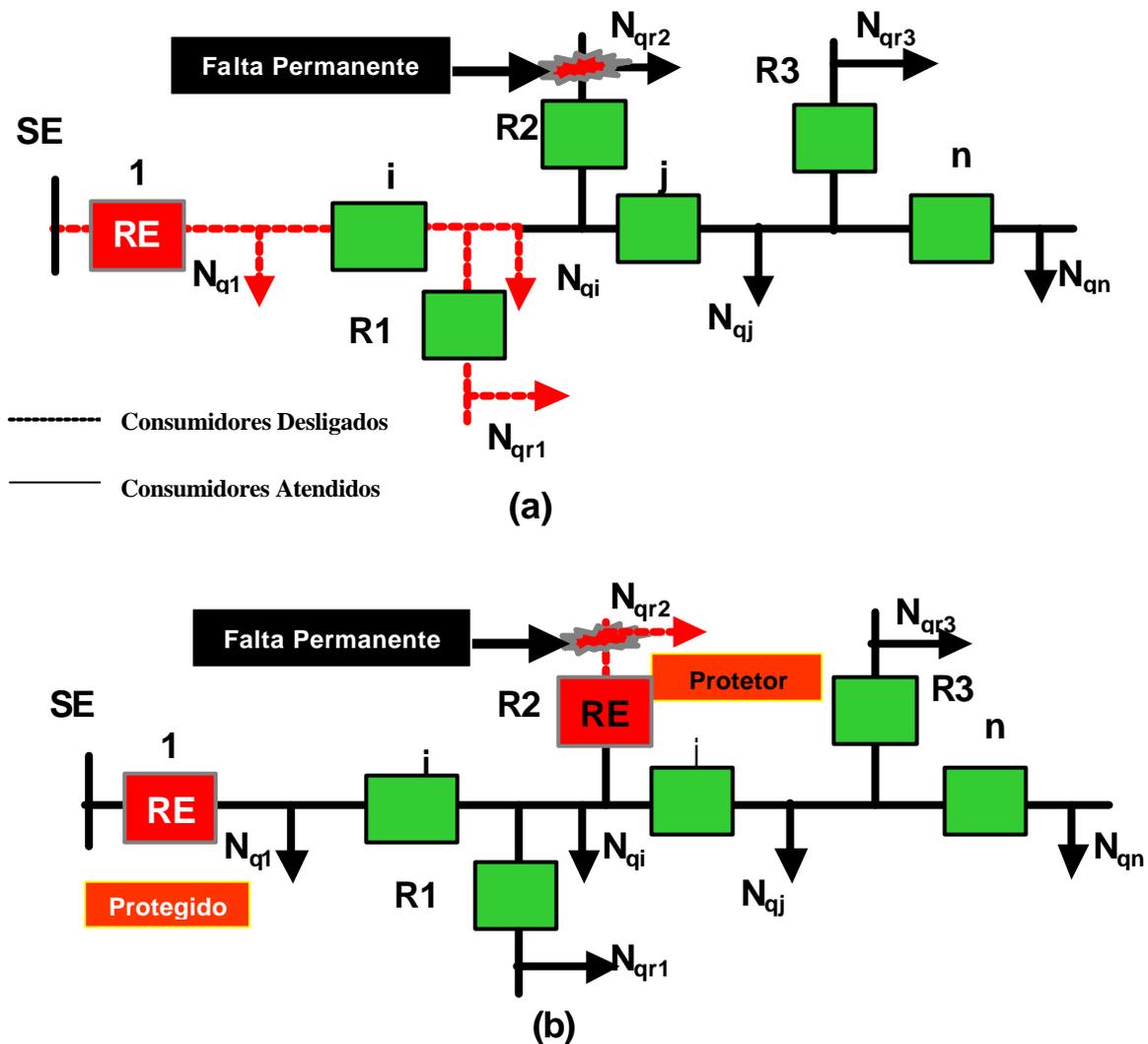


Figura 3.9 – Efeito da Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados nos Ramais ou na Seção Principal para Falhas Permanentes nos Ramais sobre os Consumidores a Montante do Ramal (Ramais).

Na Figura 3.9 (a), com a incidência de uma falha permanente no ramal R2 e com a alocação de um religador no ponto 1, todos os consumidores da seção principal à montante do ramal considerado serão desligados devido à incidência desta falha.

Na Figura 3.9 (b), com a incidência de uma falha permanente no ramal R2 e com a alocação de um religador no ponto 1 e no ponto R2, levando em consideração o conceito de dispositivo protegido e protetor, apenas os consumidores dos ramais à jusante do ponto R2

serão desligados devido à incidência desta falta. Observa-se que houve uma diminuição no número de consumidores afetados, isso devido à alocação do religador no ponto $R2$.

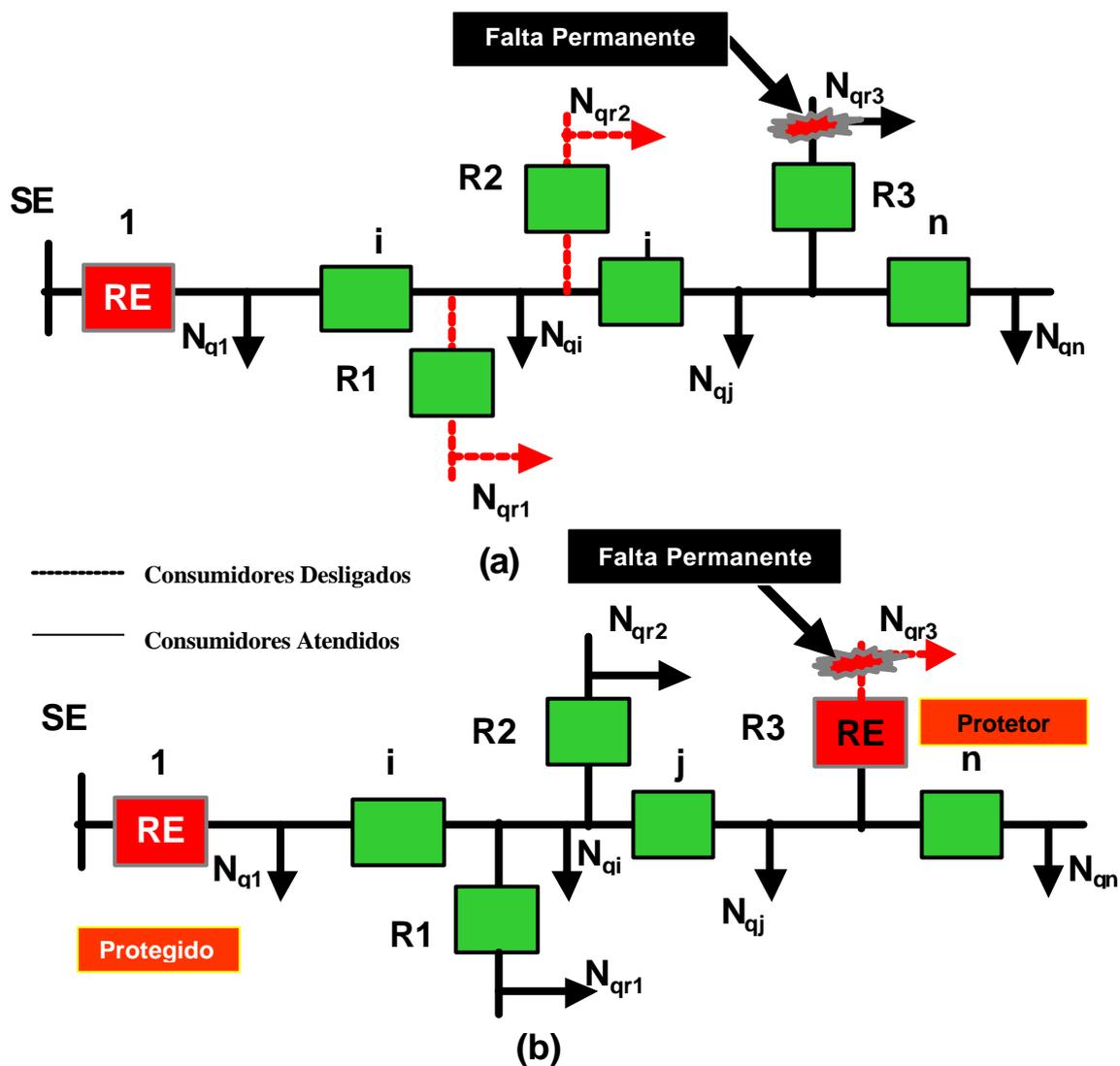


Figura 3.10 – Efeito da Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados nos Ramais ou na Seção Principal para Falta Permanentes nos Ramais sobre os Consumidores a Montante do Ramal (Seção Principal).

Na Figura 3.10 (a), com a incidência de uma falta permanente no ramo $R3$ e com a alocação de um religador no ponto 1, todos os consumidores dos ramais à montante do ramo considerado serão desligados devido à incidência desta falta.

Na Figura 3.10 (b), com a incidência de uma falta permanente no ramal e com a alocação de um religador no ponto I e no ponto $R3$, levando em consideração o conceito de dispositivo protegido e protetor, apenas os consumidores à jusante do ponto $R3$ serão desligados devido à incidência desta falta. Observa-se que houve uma diminuição no número de consumidores afetados, isso devido à alocação do religador no ponto $R3$.

Com as considerações e análises realizadas anteriormente, verifica-se que a equação-3 representa adequadamente sob o aspecto técnico de confiabilidade a função objetivo para cada circuito, com vistas a solucionar o problema de alocação ótima de dispositivos de proteção em Circuitos de Distribuição, levando-se em consideração o número de clientes (Nq_j) e/ou a carga média instalada nos trechos do alimentador (L_{qj}). Para considerar o efeito da carga média instalada na formulação do problema basta trocar nas equações correspondentes os termos (Nq_j) por (L_{qj}).

3.2.2 – Restrições do Problema

As restrições que devem ser incorporadas ao problema de alocação ótima de dispositivos de proteção são de natureza técnica e econômica. As restrições de natureza técnica estão relacionadas com a coordenação dos dispositivos de proteção e a topologia do sistema. As restrições de natureza econômica estão relacionadas com o custo de instalação e operação dos dispositivos, natureza e importância da carga.

Para que o sistema de proteção atue de maneira a se constituir em uma proteção tecnicamente eficaz chega-se à necessidade de se efetuar uma cuidadosa coordenação entre os diversos dispositivos de proteção: elos fusíveis, religadores, seccionizadores e disjuntores. O sistema para ser realmente coordenado deve satisfazer aos princípios básicos em que faltas temporárias são eliminadas o mais rapidamente possível ou pela ação de religadores, ou seccionizadores, ou relés (com religamento) e as faltas permanentes são eliminadas pela ação dos fusíveis, ou seccionizadores, mais próximos ao local da falta. Com base nesta filosofia de coordenação e nas características dos dispositivos de proteção estabeleceu-se as restrições para o problema em estudo.

No alimentador principal considera-se que na saída da subestação existe um disjuntor equipado com relés de sobrecorrente e religamento, e que nesse alimentador é possível alocar somente religadores. O uso de religadores em série deve ser acompanhado de um cuidadoso estudo de coordenação desses dispositivos em série, em que algumas regras devem ser obedecidas utilizando-se adequadamente as capacidades nominais das bobinas e seqüência de operação diferentes. Por seqüência de operação entende-se o número de vezes que o religador irá atuar nas curvas instantânea e temporizada. Com base na prática de engenheiros e técnicos das concessionárias e também através da literatura [8, 9, 23], sabe-se que a seqüência de operações dos religadores que permite explorar com mais eficiência as vantagens dos religadores é quando ele atua duas vezes na curva instantânea e duas vezes na curva temporizada. Quando se utilizam religadores em série tanto para proteção de fase como para proteção de terra, uma das técnicas de coordenação consiste em dimensionar adequadamente a capacidade nominal das bobinas séries e a seqüência de operação. Esse método proporciona melhor possibilidade de coordenação do sistema e é recomendado. Operações simultâneas ou cascatas limitadas podem ser eliminadas, ou pelo menos minimizadas, e uma boa coordenação pode ser mantida com os elos fusíveis dos ramais. Dessa forma as restrições em relação a coordenação referente a instalação de religadores, consiste em obter relações matemáticas que permitam estabelecer o número máximo de dispositivos em série possíveis para que possa ocorrer uma coordenação adequada e se possa explorar ao máximo as potencialidades do equipamento.

A possibilidade de coordenação do religador e outros dispositivos de proteção adjacentes deve ser considerada quando da seleção do religador adequado para uma aplicação específica. Dessa forma uma outra restrição imposta ao problema analisado neste trabalho é que a jusante dos religadores, especialmente na proteção dos ramais estejam alocados seccionalizadores e/ou chaves fusíveis. Os seccionalizadores, conforme descritos nos Capítulo-2 são dispositivos com custos maior que as chaves fusíveis, trazem alguns benefícios para o sistema, e devem ser usados em série e no lado da carga de um religador automático (ou de um disjuntor com religamento automático). Os elos fusíveis são dispositivos de baixo custo e utilizados para proteção de transformadores, ramais e alimentador principal. Neste trabalho estabeleceu-se como restrição do problema que a jusante dos religadores e na proteção dos ramais deve existir uma chave fusível ou um

seccionalizador, para prover uma coordenação adequada do sistema e explorar ao máximo as potencialidades do esquema de proteção e dos investimentos realizados.

Outro aspecto que deve ser considerado como restrição do problema é que a alocação de vários dispositivos de proteção em série, como geralmente requer um esquema de boa confiabilidade, tende a tornar mais lenta a proteção dos alimentadores na subestação, o que pode acarretar em alguns casos danos a materiais e equipamentos em consequência de fadiga mecânica e efeitos térmicos das correntes de curto circuito.

As restrições em relação à topologia do sistema, devem ser analisadas considerando-se os pontos da rede onde ocorrem maior incidência de faltas permanentes e temporárias. Desta forma nos pontos com maior incidência de faltas temporárias deve-se estabelecer equações matemáticas que forcem que nestes locais sejam instalados religadores e seccionalizadores e da mesma forma nos locais onde ocorram maior incidência de faltas permanentes sejam instalados fusíveis, desta maneira contribui-se para a melhoria do ICR. Nos locais de difícil acesso para as equipes de manutenção deve ser evitada a alocação de dispositivos de proteção que exijam inspeção e manutenção periódicas bem como ações corretivas frequentes.

As relações matemática que definem as restrições referentes aos custos de manutenção e instalação dos dispositivos de proteção, neste trabalho são definidas de maneira bastante simplificada através da limitação do número máximo de dispositivos de proteção (religadores, fusíveis, seccionalizadores, etc) disponíveis para a alocação no alimentador. Os religadores e seccionalizadores apesar de pertencerem a uma classe de equipamentos que trazem inúmeros benefícios para o sistema, são de custos relativamente elevados e a possibilidade da alocação desses equipamentos está relacionada com a importância da carga alimentada, necessidade de redução de índices de confiabilidade para evitar pagamento de multas e a instalação de religadores, seccionalizadores deve ser acompanhada de uma análise criteriosa da relação custo/benefício.

3.3 – Exemplo Ilustrando a Metodologia

Nesta seção apresenta-se um exemplo do equacionamento completo do problema de alocação de dispositivos de proteção em redes de distribuição conforme formulado anteriormente. Seja o circuito aéreo radial simples mostrado na Figura 3.11 com sete possíveis pontos para alocação dos dispositivos de proteção [4]. As taxas de faltas permanente e temporária, número de cliente e carga média de cada seção estão mostradas na Tabela 3.1.

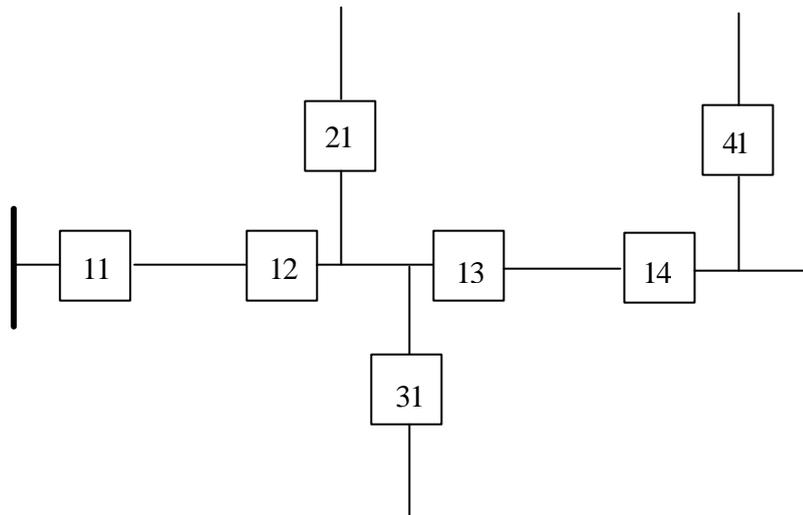


Figura 3.11 Circuito Radial Simples com 7 Pontos

Tabela 3.1 Dados do Circuito da Figura 3.11

Seção	l_{qi}	g_{qi}	N_{qi}	L_{qi} (kVa)
11	1.00	2.00	300	1200
12	0.75	1.75	250	550

13	2.25	5.50	125	200
14	2.00	4.75	200	450
21	0.25	0.75	20	30
31	1.00	2.00	50	100
41	0.50	2.50	10	15

- Função Objetivo

A função objetivo para a seção principal e para os ramais, escrita segundo a equação (3) levando em consideração os efeitos da possibilidade da alocação ou não de dispositivos de proteção nos respectivos ramais considerado-se os seguintes parâmetros dada pela topologia do circuito da Figura 3.11:

$$\begin{array}{llll}
 qn - 7 & sp - 4 & NR(I) - [3,3,1,1] & i - 1, \dots, 4 \\
 R(v) - [1,1,1] & v - 1, \dots, 3 & LK(v) - [2,2,4] & v - 1, \dots, 3 \\
 NRA(i) - [0,0,2,2] & i - 1, \dots, 4 & LKA(s) - [3,3,0] & s - 1, \dots, 3
 \end{array}$$

é dada por:

$$\begin{aligned}
 Z = & 586,25x_{121}x_{131} + 385x_{121}x_{141} + 35x_{121}x_{211} + 87,5x_{121}x_{311} + 17,5x_{121}x_{131}x_{141}x_{411} + \\
 & 1155x_{131}x_{141} + 55x_{131}x_{411} + 47,5x_{141}x_{411} - 1146,255x_{121} - 1842,5x_{131} - 997,5x_{141} - 15x_{211} - \\
 & 100x_{311} - 25x_{411} - 367,5x_{121}x_{131}x_{141} - 17,5x_{121}x_{141}x_{411} - 17,5x_{121}x_{131}x_{411} - 55x_{131}x_{141}x_{411} + \\
 & 100*(1-x_{411}) + 62,5*(1-x_{411})*(1-x_{141}) + 160*(1-x_{411})*(1-x_{141})*(1-x_{131}) + 150*(1- \\
 & x_{411})*(1-x_{141})*(1-x_{131})*(1-x_{121}) + 250*(1-x_{141}) + 640*(1-x_{141})*(1-x_{131}) + 600*(1- \\
 & x_{141})*(1-x_{131})*(1-x_{121}) + 720*(1-x_{131}) + 675*(1-x_{131})*(1-x_{121}) + 270*(1-x_{311}) + 300*(1- \\
 & x_{311})*(1-x_{121}) + 62,5*(1-x_{211}) + 75*(1-x_{211})*(1-x_{121}) + 225*(1-x_{121}) + 2637,5
 \end{aligned}$$

Em que:

X_{121} – Instalação de um religador no ponto 2 da seção 1;

X_{122} – Instalação de um fusível no ponto 2 da seção 1;

X_{131} – Instalação de um religador no ponto 3 da seção 1;

X_{132} – Instalação de um fusível no ponto 3 da seção 1;

X_{141} – Instalação de um religador no ponto 4 da seção 1;

X_{142} – Instalação de um fusível no ponto 4 da seção 1;

X_{211} – Instalação de um religador no ponto 1 da seção 2;

X_{212} – Instalação de um fusível no ponto 1 da seção 2;

X_{311} – Instalação de um religador no ponto 1 da seção 3;

X_{312} – Instalação de um fusível no ponto 1 da seção 3;

X_{411} – Instalação de um religador no ponto 1 da seção 4;

X_{412} – Instalação de um fusível no ponto 1 da seção 4.

- Restrições do Problema

Para a formulação do problema de alocação ótima as seguintes restrições devem ser atendidas:

(1) Há somente dois religadores disponíveis:

$$1. \quad x_{121} + x_{131} + x_{141} + x_{211} + x_{311} + x_{411} \leq 2$$

(2) Não há nenhuma limitação no número de fusíveis que podem ser alocados:

$$2. \quad x_{212} + x_{312} + x_{412} \leq 3$$

(3) Coordenação adequada entre religadores nos locais 13 e 14 não é possível:

$$3. \quad x_{131} + x_{141} = 1$$

(4) Fusíveis não podem ser instalados no alimentador principal:

4. $x_{122}+x_{132}+x_{142}= 0$

(5) Um fusível ou um religador deve ser alocado em todos os ramais:

5. $x_{211}+x_{212}= 1$

6. $x_{311}+x_{312}= 1$

7. $x_{411}+x_{412}= 1$

(6) Haverá um disjuntor no local 11:

8. $x_{111}+x_{112}= 0$

(7) Número máximo de religadores em série é igual a dois (2):

9. $x_{121}+x_{131}+x_{411} \leq 2$

10. $x_{121}+x_{141}+x_{411} \leq 2$

(8) Todos os ramais são de categoria 3.

(Restrições 5,6,7)

O Problema está pronto para ser resolvido. A técnica proposta para a solução do problema de programação não linear binário é um Algoritmos Genético cuja estrutura e fundamentação teórica serão descritas no próximo capítulo.

4 - Técnica de Solução do Problema de Alocação Ótima dos Dispositivos de Proteção em S.D.E.E

Neste capítulo apresentam-se as técnicas de soluções para o problema de alocação de dispositivos de proteção, visando obter soluções de alta qualidade: Algoritmo Genético Básico [10,11,12,13,14], e uma versão adaptada que utiliza os conceitos dos algoritmos genéticos básicos e do Algoritmo Genético Construtivo [10], referenciada neste trabalho como Algoritmo Genético Intermediário. Estes algoritmos serão apresentados, visando estruturá-los de forma adequada para solução do problema de alocação de dispositivo de proteção, formulado e descrito no capítulo anterior. Finalmente apresenta-se a versão do algoritmo genético dedicado à solução ótima do problema de alocação de dispositivos de proteção, implementado neste trabalho.

4.1 – Algoritmo Genético Básico

O mecanismo que o Algoritmo Genético Básico (AGB), utiliza para buscar as melhores soluções são baseados na teoria genética e evolução natural.

No Algoritmo Genético Básico (AGB), o processo de otimização se inicia com a seleção de uma população, isto é, um conjunto de soluções (configurações) candidatas. Cada configuração é qualificada pelo valor da função objetivo que apresenta. Todos os elementos da população são classificados pela qualidade de sua correspondente função objetivo. Assim, cada elemento recebe uma determinada probabilidade para gerar os elementos (configurações) na geração seguinte. Os elementos melhores qualificados neste processo têm, no sentido probabilístico, maior probabilidade de participar na geração dos elementos da nova população. Essa nova geração é obtida com as operações de recombinação e mutação. A recombinação leva a um transferência de material genético entre as melhores configurações. Eventualmente devem aparecer elementos da nova geração com melhor material genético das configurações melhores qualificados, produzindo novas configurações de excelentes qualidade. Na natureza, a mutação produz a regeneração da perda de material genético. No Algoritmo Genético Básico (AGB), a mutação produz uma modificação esporádica e aleatória de algum gene de um elemento (configuração) da população. De forma geral o Algoritmo Genético Básico (AGB), é uma técnica de otimização combinatória que inicia o processo com uma população inicial, faz um ordenamento seletivo dos elementos da população avaliando a qualidade da função objetivo e gera uma nova população num processo de três etapas: na primeira é realizada a seleção (onde à cada configuração é designada um número determinado de descendentes), na segunda etapa é realizada a recombinação entre os elementos melhores qualificados e com direito a gerar descendentes e na etapa final realiza-se um mutação aleatória para obter-se a nova população.

4.1.1 – População Inicial

As configurações da população inicial podem ser geradas aleatoriamente, pois segundo a literatura, a melhor solução encontrada deve ser independente da população inicial. Fazer evoluir uma população gerada inicialmente de maneira aleatória até chegar a

ter configurações perto da solução ótima é um bom teste para se conhecer como está funcionando a implementação do algoritmo, já que teoricamente as características essenciais e críticas da solução final deverão ser conseqüências do processo evolutivo e não das características dos métodos usados para gerar a população inicial, como é o caso de sistemas de pequeno e médio porte.

Entretanto, novas experiências indicam a existência de uma grande diferença em relação ao esforço computacional quando a população inicial é gerada de maneira aleatória e adequadamente, geralmente usando algoritmos heurísticos muito rápidos (eficientes). Dependendo da complexidade do problema o esforço computacional torna-se muito elevado; dessa forma, na maioria dos problemas complexos de engenharia elétrica foram usadas estratégias diferentes para gerar as configurações iniciais. Em sistemas de grande porte, o processo necessita de uma boa estratégia para gerar a população inicial.

4.1.2 – Seleção

Na literatura [10-14] são apresentadas diversas técnicas para se efetuar a seleção dos indivíduos da população: roleta, seleção proporcional, torneio, entre outras.

Neste trabalho as configurações são escolhidas mediante jogos (torneios) e a quantidade de torneios é equivalente ao tamanho da população, tornando essa proposta significativamente diferente da seleção proporcional. A cada jogo são escolhidos aleatoriamente um conjunto de k configurações e a configuração ganhadora é aquela com melhor função objetivo. O valor de k geralmente é pequeno, tipicamente $k \in \{2,3,4,5\}$. Realizam-se n jogos.

Uma vantagem oferecida pelo mecanismo de torneio é o pequeno esforço computacional (a estratégia é a mesma tanto para problemas de minimização como para problemas de maximização), apenas o critério de melhor valor da função objetivo é diferente. Este esquema contorna adequadamente os problemas existentes na seleção proporcional, uma vez, que a seleção de torneio não necessita dos valores das funções

objetivo de cada configuração e além disso, não existe o problema de números de descendentes não inteiros típicos da seleção proporcional. Uma vez terminado o processo de seleção deve-se implementar a recombinação.

4.1.3 – Recombinação

Na formulação original do algoritmo genético a recombinação é a operação fundamental e crucial e à mutação é designada uma função secundária [10-14]. Uma vez definida a seleção, escolhe-se um par de configurações com direito a gerar descendentes e este par é submetido a uma recombinação para gerar dois novos descendentes. Em relação à operação de recombinação, os algoritmos genéticos definem a chamada *taxa de recombinação*. Um algoritmo genético normal não procede à recombinação de todas as configurações escolhidas. A taxa de recombinação determina probabilisticamente a porcentagem de configurações submetidas efetivamente à recombinação. Desta maneira, uma parcela das configurações da população corrente passa integralmente a constituir a lista de novas configurações candidatas para a nova população sem recombinação. Escolhida as duas configurações candidatas, gera-se um número aleatório entre 0 e 1. Se o número aleatório gerado for maior que a *taxa de recombinação* as duas configurações passam diretamente para a lista de configurações candidatas sem recombinação e, caso contrário, procede-se a recombinação.

A escolha das duas configurações para recombinação pode ser feita de forma aleatória ou de forma sistemática ou ordenada, iniciando a recombinação com aquelas configurações com direito a um número maior de descendentes. Existem quatro tipos de recombinação: simples, dois pontos, multipontos e uniforme.

Neste trabalho será usada a recombinação simples, em que escolhe-se aleatoriamente um ponto de recombinação e o material genético além desse ponto é trocado. Pode-se sintetizar o mecanismo de recombinação de um simples ponto da seguinte maneira:

1. Escolher duas configurações candidatas à recombinação;
2. Gerar um número aleatório p no intervalo $[0-1]$;
3. Se $p < taxa\ de\ recombinação$, efetua-se a recombinação. Senão, passa as duas configurações para a fase de mutação.

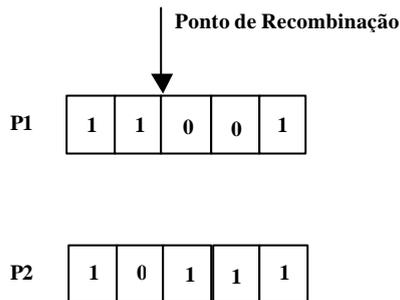


Figura 4.1: Configuração Candidata a Recombinação

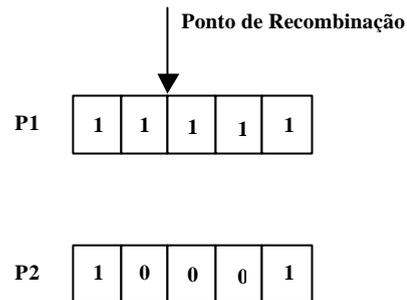


Figura 4.2: Configuração Recombinada

Depois da recombinação, as novas configurações candidatas estão sujeitas à mutação.

4.1.4 – Mutação

A mutação exerce uma influência especial no algoritmo genético, pois ajuda evitar o problema de mínimo local (convergência prematura) [10-14]. A mutação introduz mudança em torno das variáveis, explorando novas zonas no campo da otimização. A operação de mutação termina com o processo de obtenção da nova geração. O processo de mutação implica modificar de 0 para 1 ou vice-versa um elemento (gene) de uma configuração. Esse processo é controlado por um parâmetro denominado *taxa de mutação*. No algoritmo genético básico, a mutação é considerada um operador secundário comparado à recombinação e tem a finalidade de restaurar a perda de material genético. Por exemplo, em uma posição k todas as configurações tem o valor 0 na representação binária, sendo que a

configuração ótima o valor correto nessa posição é 1. sabe-se que a recombinação não pode regenerar o valor 1 nessa posição, entretanto, com a operação de mutação consegue-se resolver essa dificuldade. O exemplo abaixo mostra o operador mutação, o quarto elemento foi escolhido como ponto de mutação:



Figura 4.3: Exemplo de Mutação

Após efetuar mutação, as configurações estão sujeitas a se tornarem inactivíveis. Para tal situação é necessário formular alguma estratégia permitido transformar em factíveis aquelas configurações inactivíveis. Uma outra estratégia a ser empregada é considerar todas essas configurações como sendo “factíveis” e penalizar as inactivibilidades na função objetivo para que sejam eliminadas pelo operador de seleção.

4.1.5 – Parâmetros de Controle do Algoritmo Genético

O ciclo geracional compreende os processos de seleção, recombinação e mutação (correção da inactivibilidade), permitido encontrar as configurações da nova geração a partir da população corrente. O ciclo geracional é realizado com base no programa de controle do algoritmo genético, um conjunto de parâmetros, os quais definem o tamanho da população, a taxa de recombinação e a taxa de mutação. Estes parâmetros variam de problema para problema e, em grande medida, definem a qualidade do algoritmo.

O tamanho da população afeta o desempenho global e a eficiência dos algoritmos. Com uma população pequena o desempenho tende a cair, pois deste modo à população fornece uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Uma população grande

geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais ao invés de globais.

Quanto maior for a taxa de recombinação mais rápidas novas estruturas serão introduzidas na população. Mas se esta for muito alta, estruturas com boa qualidade poderão ser perdidas durante o processo. Com um valor baixo, o algoritmo torna-se muito lento. Uma alta taxa de mutação previne que uma dada posição fique estagnada em um valor, além de abranger outro espaço de busca.

Considerando-se a estrutura básica do algoritmo genético descrita anteriormente, na Figura 4.4 apresenta-se um diagrama de blocos ilustrando todas as suas etapas básicas.

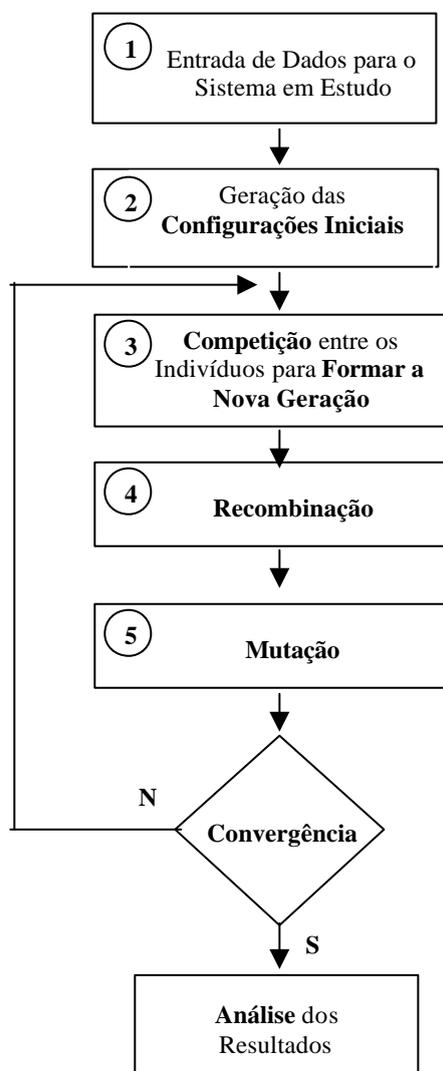


Figura – 4.4: Estrutura Básica de um Algoritmo Evolutivo

4.2 – Algoritmo Genético Intermediário

Uma versão de algoritmo genético referenciado como Algoritmo Genético Intermediário (AGI) foi proposta e implementada neste trabalho. Este algoritmo tem a mesma estrutura de codificação, recombinação e mutação do Algoritmo Genético Construtivo (AGC) [10], que será detalhado a seguir, exceto que utiliza no processo de seleção, a mesma técnica de seleção por torneio utilizada para o Algoritmo Genético Básico (AGB) e detalhada na seção 4.1.2.

O Algoritmo Genético Construtivo (AGC) apresenta algumas características inovadoras em relação aos algoritmos genéticos tradicionais (AGT), tais como, população formada apenas de estruturas e/ou esquemas, processo proporcional de avaliação, recombinação entre esquemas, população dinâmica, mutação em estruturas completas, e a possibilidade de uso de heurísticas na representação dos esquemas e/ou estruturas.

O AGC trabalha com uma população inicial formada apenas por estruturas ou esquemas. Neste trabalho, será denominada de *estrutura* qualquer cadeia contendo ou não o símbolo #, o qual pode representar 0 ou 1, e quando se referir a *esquema*, estará se fazendo referência explícita a uma estrutura que contém o símbolo #. Uma representação de uma estrutura, para um problema contendo 3 mochilas e 10 itens, seria (1,0,0,1,0,0,1,0,0,0). Um esquema seria a representação (#,0,1,0,1,0,##,1,0). Como um esquema não representa uma solução completa do problema, o AGC usa uma medida de adaptação proporcional do esquema à população. A cada nova iteração do processo, a população aumenta com a inclusão de novos indivíduos (estruturas) gerados com a combinação e mutação de estruturas da população atual. Os bons esquemas (ou estruturas) são preservados dentro dos novos esquemas (ou estruturas) gerados, que geralmente se aproximam de representações completas da solução do problema. Também a cada iteração do processo, um parâmetro evolutivo é usado na eliminação de indivíduos que não satisfazem um critério de permanência na população. Uma cópia da melhor solução encontrada até o momento é mantida salva, e o processo termina quando um limite de iterações previamente estipulado é atingido ou eventualmente a população fique vazia.

4.2.1 – Representação

Um esquema pode ser representado por uma cadeia que apresenta três tipos de informações, os quais, denotamos:

- 1: representa um item atribuído;
- 0: representa um item não atribuído;
- #: representa item que poderá futuramente ser um item atribuído.

No início do algoritmo do AGC, são gerados esquemas que compõem a população inicial. Estes esquemas serão do tipo $(\#,0,\dots,1,0,1,\#,..)$, cada esquema tem n posições, que representam os itens. Inicialmente, m itens são atribuídos. É importante mencionar que o tamanho da população inicial deve ser suficientemente grande, de forma a capturar todas as informações do problema.

4.2.2 – População Inicial

Para a resolução do problema usando-se AGC, inicialmente é necessário estabelecer uma população inicial. Esta população inicial foi gerada aleatoriamente com 30% das colunas compondo os esquemas com símbolo 0, 50% das colunas compondo o esquema com valor 1, e o restante sendo cobertos por #.

4.2.3 – Seleção e Recombinação

A população (tanto a inicial como nas demais iterações do AGC) é mantida ordenada de acordo com um critério que privilegia os esquemas mais próximos da solução completa e com melhor qualidade.

O método de seleção para recombinação utiliza dois esquemas; um esquema chamado de base e o outro de guia. O esquema base é selecionado dentro dos 20% melhores esquemas e o esquema guia, dentro dos outros 80%, conforme a ordenação feita previamente. Se o esquema base for completo (é uma estrutura e todos os itens foram atribuídos), então é aplicado a este esquema (além da seleção e recombinação) um critério denominado de mutação. Neste critério, 1 ou mais itens podem ser trocados (alguma atribuição de item pode ser mudada).

Se base não for uma estrutura completa (se tiver algum 3 em alguma posição), a recombinação entre ambos (base e guia) é usada. É feita uma mescla da base com a guia, conforme um critério previamente determinado.

A recombinação entre o esquema base e o esquema guia é descrita a seguir.

Sejam $S_{base}(j)$ e $S_{guia}(j)$ a representação dos esquemas base e guia respectivamente para um item j . Tem-se a seguinte regra para um item j , quando da recombinação (geração do esquema $S_{novo}(j)$):

- 1) – $S_{base}(j) = \#$ e $S_{guia}(j) = \#$ então $S_{novo}(j) = \#$
- 2) – $S_{base}(j) = 1$ e $S_{guia}(j) = 1$ então $S_{novo}(j) = 1$
- 3) – $S_{base}(j) = 0$ e $S_{guia}(j) = 0$ então $S_{novo}(j) = 0$
- 4) – $S_{base}(j) = 1$ e $S_{guia}(j) = \#$ então $S_{novo}(j) = 1$
- 5) – $S_{base}(j) = 0$ e $S_{guia}(j) = \#$ então $S_{novo}(j) = 0$
- 6) – $S_{base}(j) = \#$ e $S_{guia}(j) = 0$ então $S_{novo}(j) = 0$
- 7) – $S_{base}(j) = \#$ e $S_{guia}(j) = 1$ então $S_{novo}(j) = 1$
- 8) – $S_{base}(j) = 0$ e $S_{guia}(j) = 1$ então $S_{novo}(j) = 1$

9) – $S_{base}(j) = 1$ e $S_{guia}(j) = 0$ então $S_{novo}(j) = 0$

Através destas regras um novo esquema é gerado (recombinação).

4.2.4 – Mutação

Através das sucessivas recombinações, obtém-se estruturas completas que representam soluções para o problema de otimização. Estas estruturas, normalmente representam soluções de boa qualidade. No entanto, é possível melhorar esta qualidade realizando uma mutação na estrutura, como uma forma de busca local.

Assim, analisando criteriosamente o problema de otimização, pode-se implementar uma forma de mutação adequada para estruturas completas.

A idéia da mutação é tornar uma estrutura completa (sem item igual a #) e escolher um item igual a 1 e torná-lo igual a zero. Em seguida, tomar um item igual a zero (desde que não seja o item que passou de 1 para zero) e torná-lo igual a 1.

4.3 – Algoritmos Genéticos Aplicados na Solução Ótima do Problema de Alocação Ótima da Proteção

Neste trabalho, os algoritmos genéticos apresentados nas seções anteriores foram adaptados estruturalmente e aplicados na solução do problema de alocação ótima dos dispositivos proteção. A seguir descrevem-se algumas particularidades dos algoritmos genéticos utilizados para solução do problema.

Codificação dos Cromossomos (Variáveis do Problema)

Cada cromossomo que é um indivíduo da população do algoritmo genético, representa uma proposta de alocação para equipamentos de proteção para o alimentador sob

estudo. O sistema de codificação utilizado foi o binário e cada indivíduo foi representado segundo a estrutura básica da Figura 4.5.

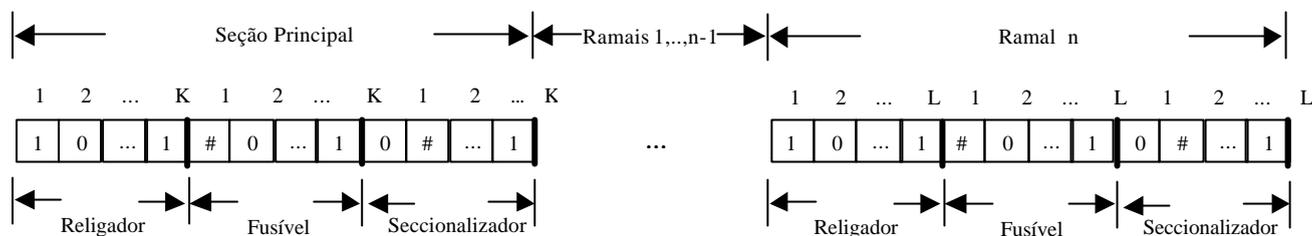


Figura – 4.5: Esquema de Codificação do Cromossomo – Alocação Ótima da Proteção

Cada elemento do cromossomo representado na figura representa:

$X_{ijk}=1$ (Alocar dispositivo de proteção no alimentador ou ramal i , no ponto j e do tipo k).

$X_{ijk}=0$ (idem, não alocar).

Para o algoritmo genético do tipo intermediário, adotou-se que uma parcela das posições de cada indivíduo fique indeterminada, ou seja:

$X_{ijk}=#$ (Não está definida a situação quanto alocar ou não o dispositivo de proteção no alimentador ou ramal i , no ponto j e do tipo k).

Função Adaptação (Fitness)

A função de adaptação utilizada é composta da função objetiva do problema de alocação ótima (seção 3.2.1) e de termos que representam as penalizações da configuração sob análise devido à violação de restrições do problema. Dessa forma a função adaptação utilizada neste trabalho é representada pela seguinte equação:

$$F_{adaptacao} = FO + \sum_{i=1}^M \mu_i |b_i|$$

Em que:

FO : Função objetivo do problema de alocação ótima de dispositivos de proteção (equação-3);

μ_i : Termo de penalidade da restrição i;

$|b_i|$: Especifica o quanto a restrição i está violada;

M : Número total de restrições do problema.

Esquema de Seleção

Na solução do problema de alocação ótima, utilizou-se o esquema de seleção por torneio conforme detalhado na seção (4.1.2), para o algoritmo genético básico e intermediário.

Recombinação e Mutação

A recombinação utilizada foi de um único ponto e o tipo de mutação simples conforme descritos na seção (4.2.5).

Critério de Convergência

O critério de convergência adotado foi o número máximo de iterações permitido.

Diagrama de Blocos

Apresenta-se a seguir na Figura 4.6, um diagrama de blocos ilustrando a estrutura geral do algoritmo implementado para solução do problema de alocação ótima de dispositivos de proteção em alimentadores de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos genéticos.

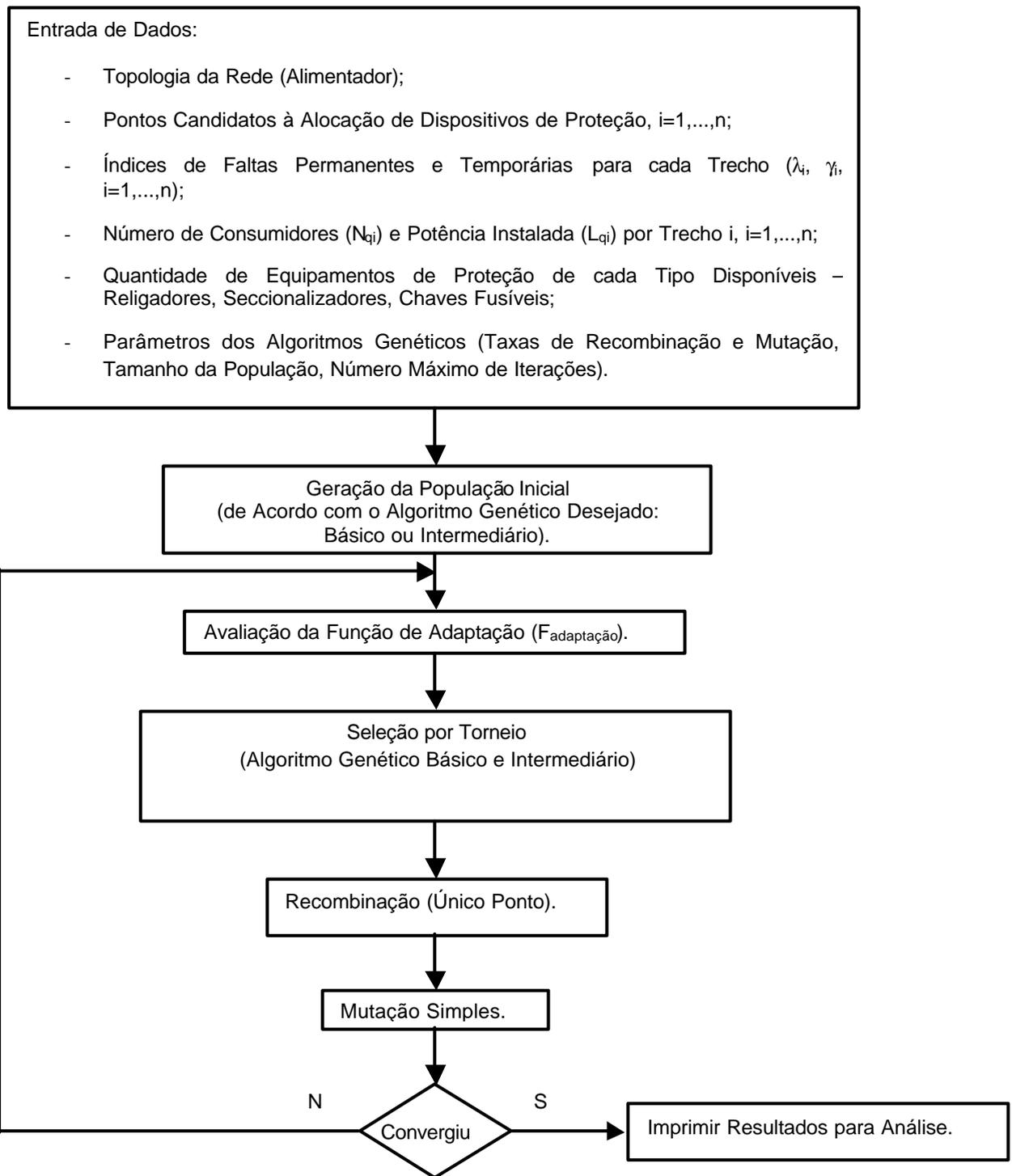


Figura – 4.6: Estrutura Geral do Algoritmo Implementado

5 - Resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos com o programa computacional implementado em linguagem FORTRAN, a partir dos algoritmos detalhados no capítulo anterior. Foram simulados os alimentadores com 7, 9, 18 e 20 pontos possíveis para alocação ótima de equipamentos de proteção.

Na realização dos testes foi utilizado uma taxa de recombinação (TR) igual a 0,75, uma taxa de mutação (TM) igual a 0,05.

Os testes foram realizados atendendo-se duas condições: maximizar o número de clientes atendidos e a outra forma visando maximizar a carga média fornecida. Os testes foram realizados através do uso dos Algoritmos Genético Básico e Intermediário.

Serão apresentados os gráficos das médias das funções objetivo vs número de iterações. Nos gráficos, foram plotados somente os valores das funções objetivos referentes as trinta (30) primeiras iterações.

5.1 – Circuito com 7 pontos possíveis para alocação [4]

Seja o circuito aéreo radial simples mostrado na figura 5.1 com sete possibilidades de alocação de dispositivo de proteção que será referenciado neste trabalho como Circuito-1. As taxas de faltas permanente e temporária, número de cliente e carga média da cada seção estão apresentados na tabela 5.1.

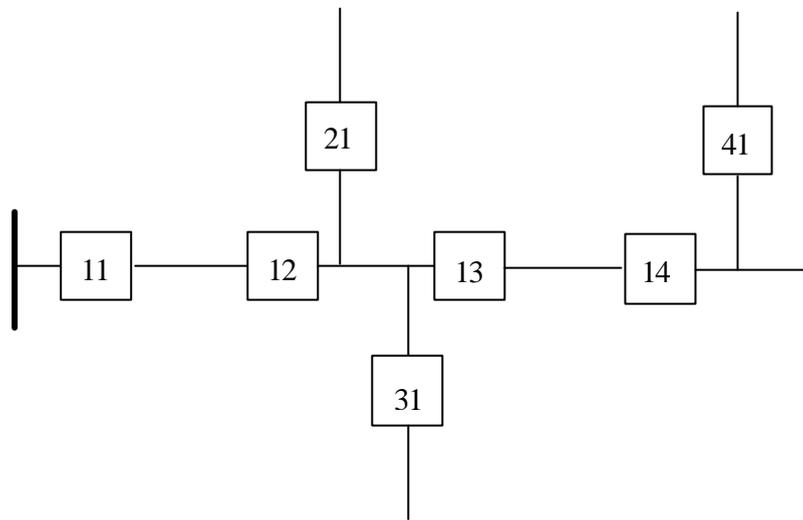


Figura 5.1 Circuito Radial com 7 Pontos

As restrições impostas para este alimentador foram:

- Há somente dois religadores disponíveis;
- Não há nenhuma limitação no número de fusíveis que podem ser alocados;
- Coordenação adequada entre religadores nos locais 13 e 14 não é possível;
- Fusíveis não podem ser instalados no alimentador principal;
- Um fusível ou um religador deve ser alocado em todos os ramais;

- Número máximo de religadores em série é igual a dois (2);
- Haverá um disjuntor no local 11;
- Todos os ramais são de categoria 3.

Tabela 5.1 Dados do Circuito-1

Seção	I_{qi}	g_{qi}	N_{qi}	L_{qi} (kVa)
11	1.00	2.00	300	1200
12	0.75	1.75	250	550
13	2.25	5.50	125	200
14	2.00	4.75	200	450
21	0.25	0.75	20	30
31	1.00	2.00	50	100
41	0.50	2.50	10	15

Os resultados obtidos nestes testes são apresentados a seguir, em tabelas devidamente especificadas. Para fins de análise consideram-se boas soluções aquelas que apresentam menores índices de faltas (menor valor da função objetivo).

Tabela 5.2 Resultados para o Circuito-1 – Função Objetivo que Considera o Número de Clientes (N_{qi})

Resultados	Religadores	Fusíveis	Valor da Função Objetivo	ICR
1	---	21/31/41	11041,25	11,56
2	12/21	31/41	8420,00	8,81

3	12	21/31/41	8395,00	8,79
4*	12/13	21/31/41	5778,75	6,05
5	14	21/31/41	8553,75	8,95
6	12/14	21/31/41	6875,00	7,19
7	12/31	21/41	8432,50	8,83
8	13/31	21/41	6513,75	6,82
9	13	21/31/41	6563,75	6,87
10	14/21	31/41	8543,75	8,94
11	14/31	21/41	8503,75	8,90
12	13/41	21/31	6598,75	6,90
13	13/21	31/41	6553,75	6,86
14	12/41	21/31	8392,50	8,78
15	14/41	21/31	8581,25	8,98

* Solução Ótima em relação a números de clientes, encontrada na iteração 15 do Algoritmo Genético Básico, e as demais soluções alternativas.

Tabela 5.3 Resultados para o Circuito-1 – Função Objetivo que Considera a Carga Média Instalada (Lqi)

Resultados	Religadores	Fusíveis	Valor da Função Objetivo	ICR
1	---	21/31/41	27565,00	10,83
2	12/21	31/41	19248,75	7,56
3	12	21/31/41	19211,25	7,54

4*	12/13	21/31/41	13827,50	5,43
5	14	21/31/41	21196,25	8,32
6	12/14	21/31/41	16056,25	6,30
7	12/31	21/41	19286,25	7,57
8	13/31	21/41	15817,50	6,21
9	13	21/31/41	15917,50	6,25
10	14/21	31/41	21181,25	8,32
11	14/31	21/41	21096,25	8,29
12	13/41	21/31	15970,00	6,27
13	13/21	31/41	15902,50	6,24
14	12/41	21/31	19207,50	7,54
15	14/41	21/31	21237,50	8,34

* Solução Ótima em relação à carga média instalada encontrada na iteração 11 do Algoritmo Genético Básico, e as demais soluções alternativas.

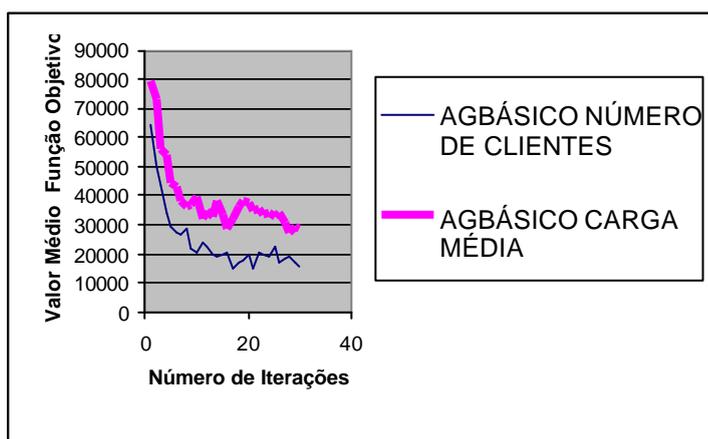


Gráfico 5.1. Média da Função Objetivo vs. Número de Iterações, Circuito-1.Algoritmo Genético Básico.

Os resultados obtidos com o Algoritmo Genético Intermediário foram os mesmos encontrados através do algoritmo Genético Básico, deferindo quanto aos parâmetros de controle necessários para cada um deles. O gráfico 5.2 mostra o comportamento do valor médio da função de adaptação pelo número de iterações para os Algoritmos Genéticos Intermediário (AGI).

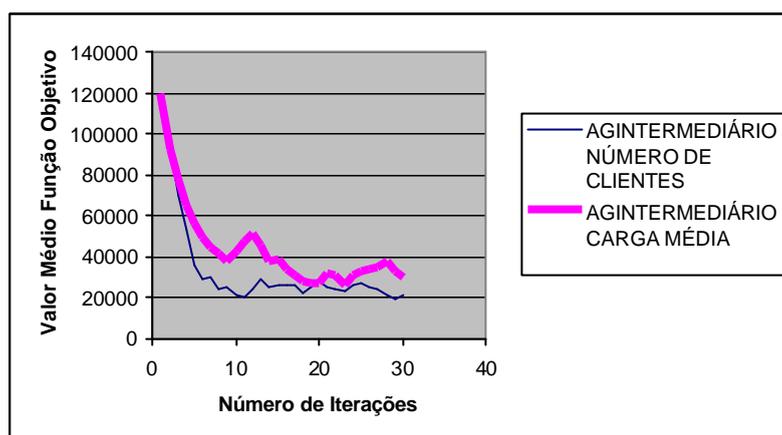


Gráfico 5.2. . Média da Função Objetivo vs. Número de Iterações, Circuito-1.Algoritmo Genético Intermediário.

5.2 – Circuito com 9 pontos possíveis para alocação [1]

Seja o circuito aéreo radial simples mostrado na figura 5.2 com nove possibilidades de alocação de dispositivo de proteção que será referenciado neste trabalho como Circuito-2. As taxas de faltas permanente e temporária, número de cliente e carga média da cada seção estão apresentados na tabela 5.4.

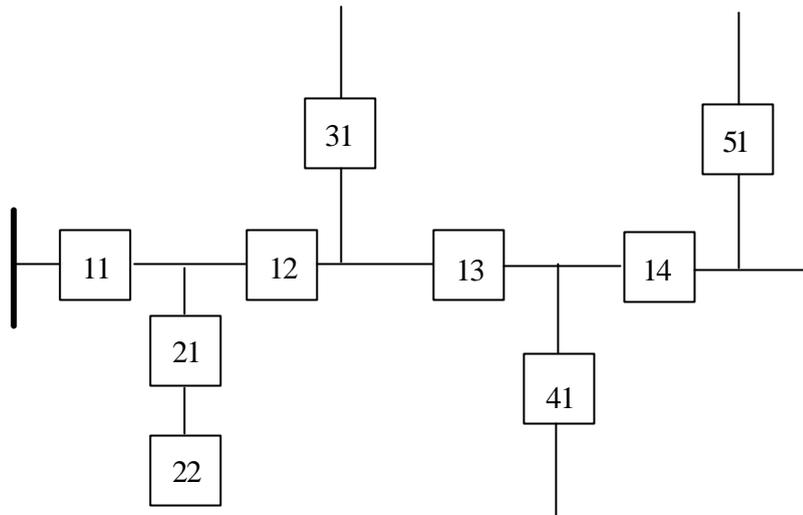


Figura 5.2 Circuito Radial Simples com 9 Pontos

As restrições impostas para este alimentador foram:

- Há somente três religadores disponíveis;
- Não há nenhuma limitação no número de fusíveis que podem ser alocados;
- Coordenação adequada entre religadores nos locais 12 e 13 não é possível;
- Fusíveis não podem ser instalados no alimentador principal;
- Número máximo de religadores em série é igual a dois (2);
- Um fusível ou um religador deve ser alocado em todos os ramais;
- Haverá um disjuntor no local 11;
- Todos os ramais são de categoria 3.

Tabela 5.4 Dados do Circuito-2

Seção	I_{qi}	g_{qi}	N_{qi}	L_{qi} (kVa)
11	0.80	1.20	1600	4100
12	0.80	1.40	1600	1000
13	0.90	1.60	1000	1600
14	0.70	1.00	800	800
21	0.90	2.00	500	2250
31	0.80	2.80	400	300
41	1.00	3.20	200	1000
51	0.50	0.70	200	450
22	0.70	1.70	300	350

Os resultados obtidos nestes testes são apresentados a seguir, em tabelas devidamente especificadas. Para fins de análise consideram-se boas soluções aquelas que apresentam menores índices de faltas (menor valor da função objetivo).

Tabela 5.5 Resultados para o Circuito-2 – Função Objetivo que Considera o Número de Clientes (N_{qi})

Resultados	Religadores	Fusíveis	Valor da Função Objetivo	ICR
1	---	21/22/31/41/51	35540,00	5,38
2	12/14/41	21/22/31/51	19500,00	2,95
3	12/14/31	21/22/41/51	19420,00	2,94
4	12/41	21/22/31/51	21340,00	3,23

5	12/21/41	22/31/51	20460,00	3,10
6	13/41	21/22/31/51	22460,00	3,40
7	12/51	21/22/31/41	21740,00	3,29
8*	12/14/21	22/31/41/51	18780,00	2,84
9	13/31/41	21/22/51	21660,00	3,28
10	14/21	22/31/41/51	29740,00	4,50
11	14/21/41	22/31/51	26900,00	4,07
12	13	21/22/31/41/51	22580,00	3,42
13	13/21/41	22/31/51	21580,00	3,27
14	13/14/41	21/22/31/51	22220,00	3,36
15	12	21/22/31/41/51	21500,00	3,25

* Solução Ótima em relação a números de clientes, encontrada na iteração 29 do Algoritmo Genético Básico, e as demais soluções alternativas.

Tabela 5.6 Resultados para o Circuito-2 – Função Objetivo que Considera a Carga Média Instalada (L_{qi})

Resultados	Religadores	Fusíveis	Valor da Função Objetivo	ICR
1	---	21/22/31/41/51	56520,00	4,77
2	12/14/41	21/22/31/51	23500,00	1,98
3	12/14/31	21/22/41/51	24120,00	2,03
4	12/41	21/22/31/51	25730,00	2,17
5	12/21/41	22/31/51	22870,00	1,93

6	13/41	21/22/31/51	30260,00	2,55
7	12/51	21/22/31/41	27070,00	2,28
8*	12/14/21	22/31/41/51	21440,00	1,80
9	13/31/41	21/22/51	29660,00	2,50
10	14/21	22/31/41/51	44990,00	3,79
11	14/21/41	22/31/51	36090,00	3,04
12	13	21/22/31/41/51	30860,00	2,60
13	13/21/41	22/31/51	27400,00	2,31
14	13/14/41	21/22/31/51	29190,00	2,46
15	12	21/22/31/41/51	26530,00	2,23

* Solução Ótima em relação à carga média instalada encontrada na iteração 21 do Algoritmo Genético Básico, e as demais soluções alternativas.

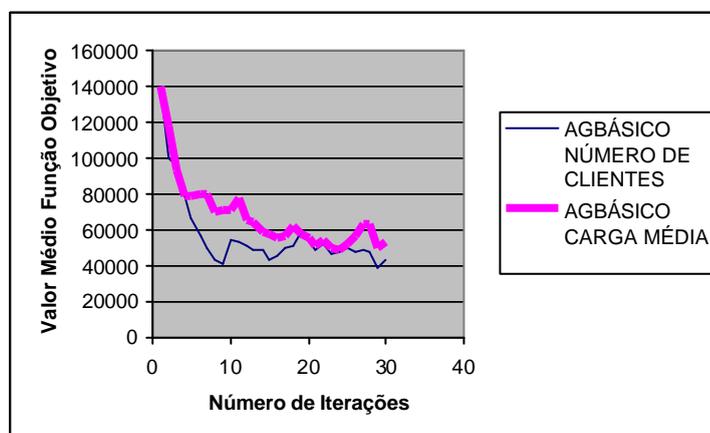


Gráfico 5.3. Média da Função Objetivo vs. Número de Iterações, Circuito-2.Algoritmo Genético Básico.

Os resultados obtidos com o Algoritmo Genético Intermediário foram os mesmos encontrados através do algoritmo Genético Básico, deferindo quanto aos parâmetros de controle necessários para cada um deles. O gráfico 5.4 mostra o comportamento do valor médio da função de adaptação pelo número de iterações para o Algoritmo Genético Intermediário (AGI).

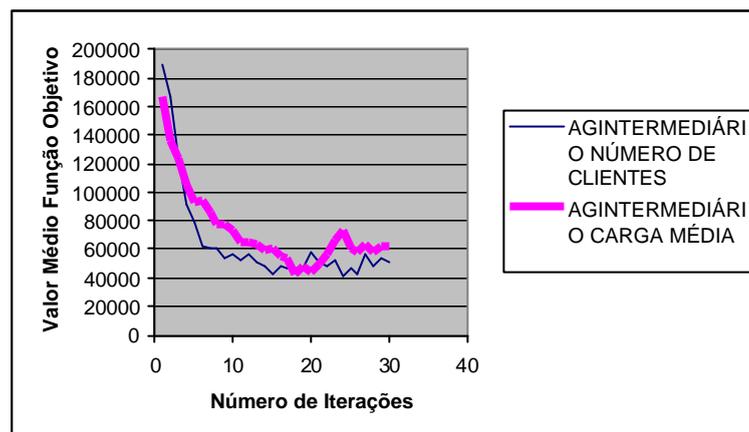


Gráfico 5.4. Média da Função Objetivo vs. Número de Iterações, Circuito-2.Algoritmo Genético Intermediário.

5.3 – Circuito com 18 pontos possíveis para alocação [3]

Seja o circuito aéreo radial simples mostrado na figura 5.3 com dezoito possibilidades de alocação de dispositivo de proteção que será referenciado neste trabalho como Circuito-3. As taxas de faltas permanente e temporária, número de cliente e carga média da cada seção estão apresentados na tabela 5.7.

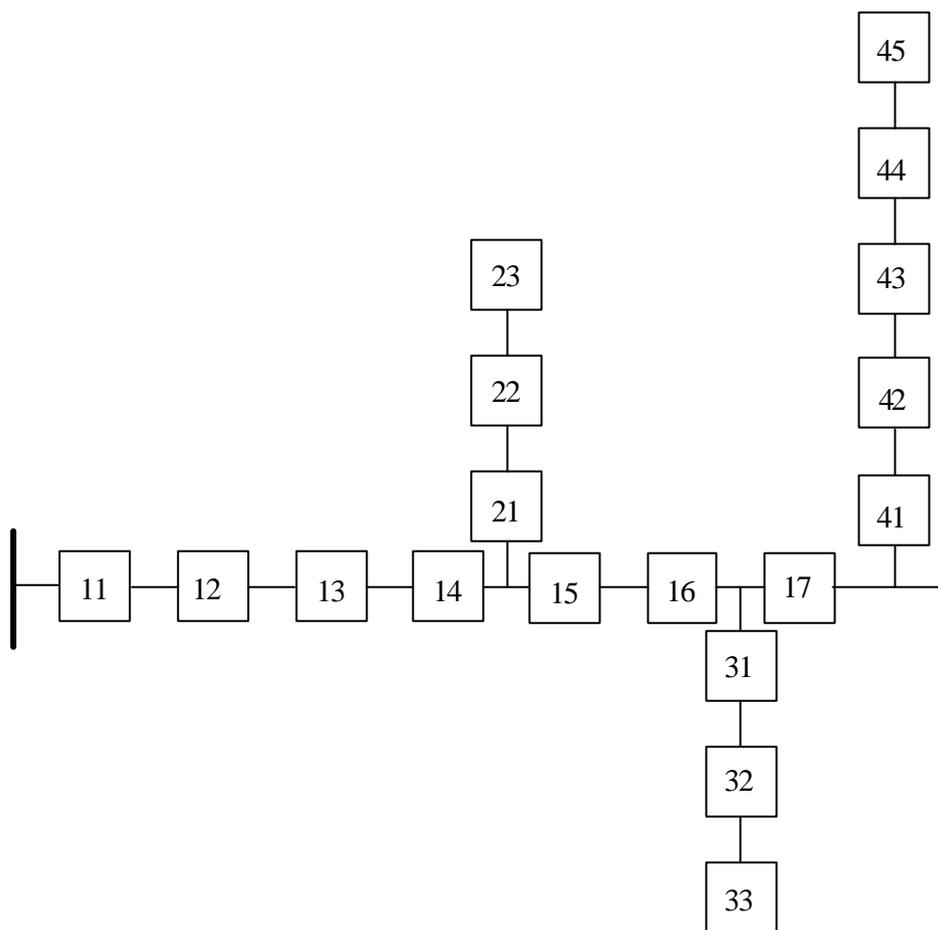


Figura 5.3 Circuito Radial Simples com 18 Pontos

As restrições impostas para este alimentador foram:

- Há somente quatro religadores disponíveis;
- Não há nenhuma limitação no número de fusíveis que podem ser alocados;
- Número máximo de religadores em série é igual a dois (2);
- Coordenação adequada entre religadores nos locais 12 e 13 não é possível;
- Coordenação adequada entre religadores nos locais 13 e 14 não é possível;
- Coordenação adequada entre religadores nos locais 15 e 16 não é possível;
- Fusíveis não podem ser instalados no alimentador principal;
- Fusíveis não podem ser instalados a jusante dos religadores;
- Haverá um disjuntor no local 11;
- Os ramais cujos os nós iniciais são 21 ,31 e 41 são de categoria 3.

Tabela 5.7 Dados do Circuito-3

Seção	I_{qi}	g_{qi}	N_{qi}	L_{qi} (kVa)
11	0.365	1.460	544	1743
12	0.440	1.758	506	1129
13	0.083	0.330	25	650
14	0.037	0.149	157	5883
15	0.275	1.101	138	114
16	0.123	0.491	527	1683
17	0.256	1.024	662	800
21	0.195	0.780	0	0
22	0.183	0.732	0	0

23	0.003	0.013	2	5782
31	0.151	0.607	101	60
32	0.113	0.454	130	105
33	0.084	0.337	146	113
41	0.236	0.943	26	174
42	0.190	0.761	34	54
43	0.215	0.858	26	98
44	0.236	0.944	7	2
45	0.153	0.612	87	306

Os resultados obtidos nestes testes são apresentados a seguir, em tabelas devidamente especificadas. Para fins de análise consideram-se boas soluções aquelas que apresentam menores índices de faltas (menor valor da função objetivo).

Tabela 5.8 Resultados para o Circuito-3 – Função Objetivo que Considera o Número de Clientes (N_{qi})

Resultados	Religadores	Fusíveis	Valor da Função Objetivo	ICR
1	13/21/31/41	23/33	14403,61	4,61
2	17/31	21/23/41	15591,97	5,00
3*	12/21/31/41	23/45	11511,49	3,69
4	31/41	21/45	16185,23	5,19
5	16/31/41	21/33/43	15081,45	4,83
6	31/33/41	21/44	16205,25	5,20

7	31/41	21/44	16159,19	5,18
8	31/32/41	21/44	16207,56	5,198
9	31/41/42	21/44	16192,62	5,193
10	17/31/41	21/33	14924,69	4,78
11	12/31/41	21/23/33	11771,67	3,77
12	13/31/41	21/45	14473,85	4,64
13	14/31/41	21/42/45	14811,42	4,75
14	15/31/41	21/33	13917,17	4,46
15	15/21/31/41	32/44/45	13446,22	4,31

* Solução Ótima em relação a números de clientes, encontrada na iteração 205 do Algoritmo Genético Básico, e as demais soluções alternativas.

Tabela 5.9 Resultados para o Circuito-3 – Função Objetivo que Considera a Carga Média Instalada (Lqi)

Resultados	Religadores	Fusíveis	Valor da Função Objetivo	ICR
1	21/31/32/41	33	76131,38	4,072
2	21/31/41/45	22	76160,95	4,073
3	21/31/33/41	44	76126,50	4,071
4	12/31/41	21/23/33	53222,95	2,846
5*	12/15/21	22/23/31/33/41	52221,48	2,793
6	12/21/31/41	22/23/32/42	55958,53	2,993
7	21/31/41/42	22	76055,41	4,068

8	21/31/41/44	23/32	75982,73	4,064
9	14/21/31/41	23/33	72412,63	3,873
10	16/17/21	22/31/41/45	69553,78	3,720
11	15/21/31/41	23/33	63318,26	3,386
12	16/21/31/41	22/33/43/45	69091,62	3,685
13	15/31/41	21/23/32/44	71411,52	3,819
14	17/21/31/41	22/42	70871,58	3,790
15	13/21/31/41	22/23/32/45	70874,02	3,791

* Solução Ótima em relação à carga média instalada encontrada na iteração 314 do Algoritmo Genético Básico, e as demais soluções alternativas.

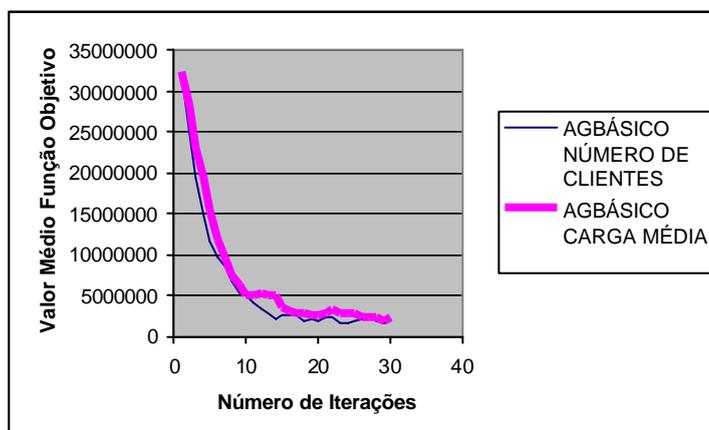


Gráfico 5.5. Média da Função Objetivo vs. Número de Iterações, Circuito-3.Algoritmo Genético Básico.

Os resultados obtidos com o Algoritmo Genético Intermediário foram os mesmos encontrados através do algoritmo Genético Básico, deferindo quanto aos parâmetros de controle necessários para cada um deles. O gráfico 5.6 mostra o comportamento do valor

médio da função de adaptação pelo número de iterações para o Algoritmo Genético Intermediário (AGI).

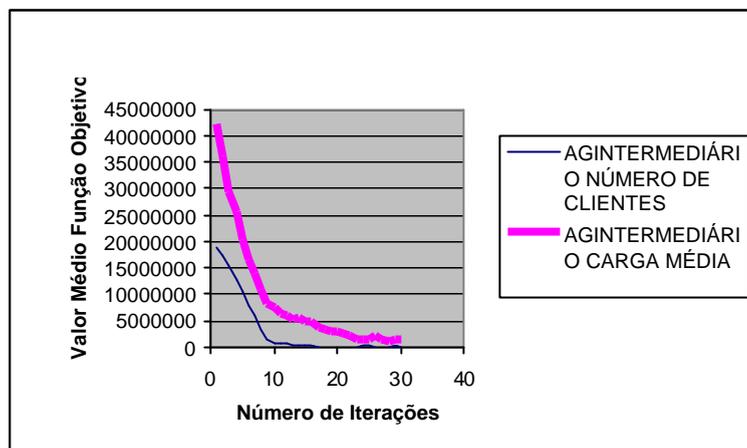


Gráfico 5.6. Média da Função Objetivo vs. Número de Iterações, Circuito-3.Algoritmo Genético Intermediário.

5.4 – Circuito Real com 20 pontos possíveis para alocação

Seja o circuito aéreo radial simples mostrado na figura 5.4 com vinte possibilidades de alocação de dispositivo de proteção que será referenciado neste trabalho como Circuito-4. As taxas de faltas permanente e temporária, número de cliente e carga média da cada seção estão apresentados na tabela 5.10. Os dados utilizados para simulação deste circuito são todos reais, exceto os índices de faltas permanentes e temporárias em cada possível ponto de alocação, foram estimados.

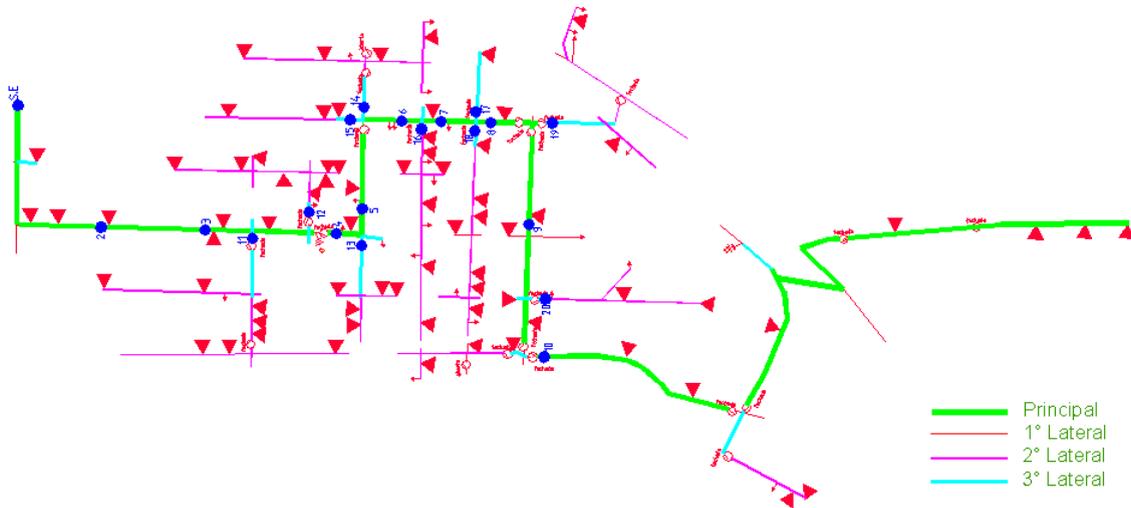


Figura 5.4 Circuito Radial Simples com 20 Pontos

As restrições impostas para este alimentador foram:

- Há somente quatro religadores disponíveis;
- Não há nenhuma limitação no número de fusíveis que podem ser alocados;
- Número máximo de religadores em série é igual a dois (2);
- Fusíveis não podem ser instalados no alimentador principal;
- Haverá um disjuntor no local 1;
- Todos os ramais são de categoria 3.

Tabela 5.10 Dados do Circuito-4

Seção	I_{qi}	g_{qi}	N_{qi}	L_{qi} (kVa)
1	0,315	1,55	185	195
7	0,520	1,20	136	112,5

9	0,072	0,96	54	232,5
37	0,063	1,10	36	132,5
47	0,410	1,80	36	127,5
62	0,050	0,89	31	132,5
77	0,220	0,77	1	20
89	0,410	0,33	122	232,5
92	0,640	0,64	160	532,5
103	0,095	0,55	156	727,5
10	0,164	0,65	335	750
23	0,09	0,73	295	810
40	0,215	0,44	100	382,5
48	0,320	0,69	160	370
49	0,510	0,75	164	300
63	0,080	0,95	155	760
78	0,815	0,86	17	75
79	0,900	0,81	159	845
90	0,055	0,63	39	637,5
97	0,955	0,98	52	282,5

Os resultados obtidos nestes testes são apresentados a seguir, em tabelas devidamente especificadas. Para fins de análise consideram-se boas soluções aquelas que apresentam menores índices de faltas (menor valor da função objetivo).

Tabela 5.11 Resultados para o Circuito-4 – Função Objetivo que Considera o Número de Clientes (N_{qi})

Resultados	Religadores	Fusíveis	Valor da Função Objetivo	ICR
1	7/15/16	11/12/13/14/17/18/19/20	8852,70	3,699
2	2/7/15/16	11/12/13/14/17/18/19/20	7080,81	2,958
3	2/7/16	11/12/13/14/15/17/18/19/20	7510,94	3,138
4	3/7	11/12/13/14/15/16/17/18/19/20	7886,32	3,295
5	4/7/15	11/12/13/14/16/17/18/19/20	7396,62	3,091
6	4/7/11	12/13/14/15/16/17/18/19/20	7152,21	2,988
7	4/7/16	11/12/13/14/15/17/18/19/20	7418,39	3,100
8	5/9/13/17	11/12/14/15/16/18/19/20	7158,82	2,991
9	5/9	11/12/13/14/15/16/17/18/19/20	8061,53	3,368
10	5/9/16	11/12/13/14/15/17/18/19/20	8163,52	3,411
11	3/7/11/15	12/13/14/16/17/18/19/20	7587,80	3,170
12*	5/7/11/12	13/14/15/16/17/18/19/20	6770,86	2,829
13	2/7/14/15	11/12/13/16/17/18/19/20	6900,35	2,883
14	5/6/11/15	12/13/14/16/17/18/19/20	7967,04	3,329
15	2/7/11	12/13/14/15/16/17/18/19/20	7727,20	3,229

* Solução Ótima em relação a números de clientes, encontrada na iteração 118 do Algoritmo Genético Básico, e as demais soluções alternativas.

Tabela 5.12 Resultados para o Circuito-4 – Função Objetivo que Considera a Carga Média Instalada (L_{qi})

Resultados	Religadores	Fusíveis	Valor da Função Objetivo	ICR
1	5/11/14/15	12/13/16/17/18/19/20	27751,65	3,624
2	5/12/13/15	11/14/16/17/18/19/20	26744,90	3,492
3	5/9/11/17	12/13/14/15/16/18/19/20	20790,16	2,715
4	6/13/15	11/12/14/16/17/18/19/20	30211,25	3,945
5*	5/9/12/17	11/13/14/15/16/18/19/20	20741,49	2,708
6	6/11/13/15	12/14/16/17/18/19/20	29625,51	3,868
7	6/8/15/18	11/12/13/14/16/17/19/20	28118,30	3,672
8	5/12/17/20	11/13/14/15/16/17/18/19	21599,77	2,820
9	5/8/13/15	11/12/14/16/17/18/19/20	25015,16	3,266
10	5/8/11/15	12/13/14/16/17/18/19/20	24995,04	3,264
11	5/7/11/15	12/13/14/16/17/18/19/20	23443,61	3,061
12	5/7/13/15	11/12/14/16/17/18/19/20	23463,73	3,064
13	5/11/13/15	12/14/16/17/18/19/20	26793,58	3,499
14	6/8/11/15	12/13/14/16/17/18/19/20	27592,76	3,603
15	5/13/15	11/12/14/16/17/18/19/20	27379,32	3,575

* Solução Ótima em relação à carga média instalada encontrada na iteração 256 do Algoritmo Genético Básico, e as demais soluções alternativas.

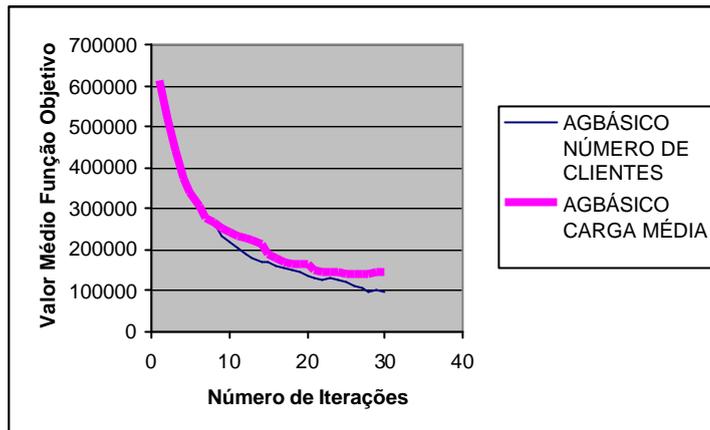


Gráfico 5.7. Média da Função Objetivo vs. Número de Iterações, Circuito-4. Algoritmo Genético Básico.

Os resultados obtidos com os Algoritmo Genéticos Intermediário foram os mesmos encontrados através do algoritmo Genético Básico, deferindo quanto aos parâmetros de controle necessários para cada um deles. O gráfico 5.8 mostra o comportamento do valor médio da função de adaptação pelo número de iterações para o Algoritmo Genético Intermediário (AGI).

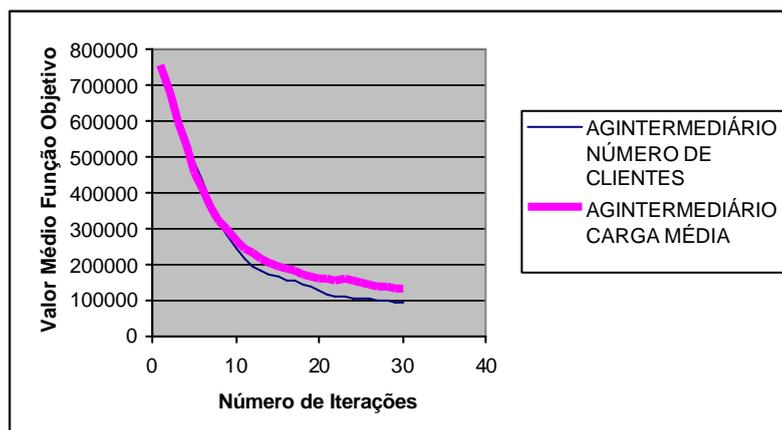


Gráfico 5.8. Média da Função Objetivo vs. Número de Iterações, Circuito-4. Algoritmo Genético Intermediário.

5.5 – Análise Comparativa dos Resultados

Nesta seção, será feita a comparação entre os algoritmos genético básico e intermediário, analisando o comportamento dos mesmo e qual deles teve melhor desempenho para os vários circuitos testados.

Tabela 5.13 Comparação dos Parâmetros de Controle para os Testes Realizados com os Diferentes Tipos de Algoritmos Genéticos Utilizados

	Algoritmos	TP	N° Máximo de Iterações	Iteração que Forneceu o Melhor Valor da FO	
				Número de Clientes	Carga Média Instalada
Circuito-1	AGB	40	30	15	11
	AGI	40	30	28	17
Circuito-2	AGB	40	40	29	21
	AGI	40	40	21	31
Circuito-3	AGB	200	500	205	314
	AGI	200	200	48	171
Circuito-4	AGB	400	500	118	256
	AGI	400	300	89	85

Para o circuito – 1, o AGB, com a mesma população e com o mesmo número de iteração, em relação ao AGI encontra a melhor solução tanto para o número de clientes como para a carga média, com um menor número de iterações em relação ao AGI. Sendo assim observa-se que o AGB foi o que teve o melhor desempenho entre os dois algoritmos testados para o circuito – 1.

Para o circuito – 2 o AGI e AGB tiveram um bom desempenho pois a população inicial para ambos foi de 40 e o número de iterações igual a 40, observou-se que para o número de clientes o AGI teve um desempenho um pouco melhor em relação ao AGB, porém, para a carga média o AGB já apresentou um melhor desempenho em relação ao AGI.

Para o circuito – 3 que tem um grande número de variáveis de decisão e um elevado grau de não-linearidade os AGI e AGB encontraram soluções de boa qualidade. Observa-se que para este circuito o AGI teve um ótimo desempenho em relação ao AGB pois, a população inicial foi igual, mas o número de iterações já pode ser menor, sendo assim conclui-se que para este circuito o melhor desempenho foi para o AGI.

Para o circuito – 4 que tem um grande número de variáveis de decisão e um elevado grau de não-linearidade os AGI e AGB encontraram soluções de boa qualidade. Observa-se que para este circuito novamente o AGI teve um ótimo desempenho em relação ao AGB.

Através destas análises pode-se observar que o AGB, apresenta um bom desempenho, pois encontra a melhor solução com menor números de iterações, mas possui algumas limitações, pois com o aumento do circuito deve-se aumentar sua população, pois ele diminui muito rápido a média da função objetivo o que pode ocasionar na saturação do algoritmo.

Finalmente, pode-se concluir que o AGI foi o que apresentou para solução do problema de alocação ótima o melhor desempenho em relação ao AGB, pois trabalha com uma média da função objetivo alta o que retarda a sua saturação, e converge para o ótimo de uma forma rápida o que diminui o número de iterações necessárias.

Em todos os testes realizados, verifica-se a eficiência da metodologia proposta para encontrar boas soluções para a alocação de dispositivos de proteção.

6 - Conclusão

Neste trabalho foi proposta uma formulação que considera a influência dos dispositivos de proteção nos indicadores dos índices de confiabilidade dos alimentadores de distribuição. Esta alocação de dispositivo de proteção, é feita com o intuito de melhorar os índices de confiabilidade do sistema. Estes dispositivos são alocados em locais estratégicos com o objetivo de diminuir o tempo de interrupção e diminuir também o número de clientes afetados pela incidência de faltas.

As técnicas de solução proposta para resolver este problema de alocação ótima de dispositivo de proteção, que é um problema de programação não-linear inteiro do tipo binário (0/1), foram através de algoritmos evolutivos do tipo genético. A metodologia proposta é flexível sendo aplicada para análise e estudos de alimentadores reais, e fornece como resultado um conjunto de soluções alternativas juntamente com a melhor solução para o problema.

A metodologia possibilita que seja feita uma análise da melhoria dos índices de confiabilidade em função dos desligamento que podem ocorrer na rede devido a incidência de faltas permanentes ou temporárias, considerando o número de clientes ou a carga média instalada nos trechos do alimentador.

Os resultados obtidos através das simulações dos circuitos encontrados na literatura e de um circuito real, comprovam a eficiência da metodologia desenvolvida e implementada.

Como sugestões para trabalhos futuros destacam-se:

- Sofisticar a formulação do problema, considerando a possibilidade de alocação de chaves, com o objetivo de se efetuar a reconfiguração da rede e desta forma reduzir o número de clientes atingidos pelas faltas;
- Considerar os custos dos equipamentos na função objetivo, desta forma fazendo uma análise de custo/benefício da alocação de dispositivos de proteção;
- A partir do conjunto de melhores soluções fornecidas por esta metodologia e com base na experiência dos engenheiros das concessionárias, desenvolver um programa utilizando técnicas de inteligência artificial para fazer a coordenação dos dispositivos de proteção alocados

Bibliografia

- [1] Soudi F.; Tomsovic K., “Optimal Trade-Offs in Distribution Protection Design”, **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2001, pp 292-296
- [2] Wang H.; Thorp J. S., “Optimal Locations for Protection System Enhancement: A Simulation of Cascading Outages”, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 16, No. 4 October 2001, pp 528-533.
- [3] Soudi F.; Tomsovic K., “Optimal Distribution Protection Design: Quality of Solution and Computational Analysis”, **International Journal on Electric Power and Energy Systems**, Vol. 21, 1999, pp.327-335.
- [4] Soudi F.; Tomsovic K., “Optimized Distribution Protection Using Binary Programming”, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 13, No. 1, January 1998, pp 218-224.
- [5] Kagan et alii, “Otimização da Qualidade de Fornecimento pela Localização de Dispositivos de Proteção e Seccionamento em Redes de Distribuição”, **Anais do II Seminário Brasileiro Sobre Qualidade de Energia Elétrica** (Digital -CD), 16 a 19 de Novembro de 1997, São Lourenço – MG.

- [6] Kagan N.; Oliveira C.C.B., “Goal Planning and Risk Analysis for Distribution Reliability Indices”, **IEE Conference Publication**, No. 482, June 2001.
- [7] Eletrobrás Comitê de Distribuição, “**Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição**” Centrais Elétricas Brasileiras – Eletrobrás – Rio de Janeiro, Campus Eletrobrás, 1982.
- [8] Gieger S., “**Proteção de Sistemas de Distribuição**” , Porto Alegre, SAGRA, 1988, 344 p.
- [9]-McGraw-Edison Company. Power Systems Division. System faults. “**In:___ Distribution – System Protection Manual**”. Canonsburg: McGraw-Edison Company, s.d. p. 3 – 46. (Bulletin, 71022).
- [10] Silva, M. A. M., “Análise Experimental de Algoritmos Genéticos no Planejamento a Longo Prazo de Sistemas de Transmissão”, **Tese de Mestrado**, apresentada à Universidade Estadual Paulista, 2000.
- [11] Furtado, J. C., “Algoritmo Genético Construtivo na Otimização de Problemas Combinatoriais de Agrupamento”, **Tese de Doutorado**, apresentada à Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.
- [12] Srinivas, M.; Patnaik, L. M., “Genetic Algorithms: a Survey”, **Computer**, Vol. 26, No. 6, 1994, pp. 28-43.
- [13] Goldberg, D.E., “**Genetic Algorithm in Search Optimization and Machine Learning**”, Addison Wesley, Reading-MA, 1989.
- [14] Michalewicz, Z., “**Genetic Algorithm + Data Structures = Evolution Programs**”, 2nd ed., New York: Springer-Verlag, 1994
- [15] T. BÄCK, T., “Evolutionary Computation: Comments on the History and Current State”, **IEEE Transactions on Evolucionary Computation**, Vol. 1, No. 1, April 1997.
- [16] Broadwater R. P.; Thompson J. C.; Rahman S., “An Expert System for Integrated Protection Design with Configurable Distribution Circuits: Part I, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 9, No. 2, April 1994, pp 1115 -1121

- [17] Broadwater R. P.; Thompson J. C.; Rahman S., An Expert System for Integrated Protection Design with Configurable Distribution: Part II, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 9, No. 2, April 1994, PP 1122 -1128.
- [18] Negnevitsky M., “A Knowledge Based Tutoring for Teaching Fault Analysis”, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 13, No. 1, February 1998.
- [19] Goel L., Billinton R., “Evaluation of Interrupted Energy Assessment Rates in Distribution Systems”, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 6, No. 4, October 1991.
- [20] Goel L., Billinton R., “Determination of Reliability Worth for Distribution System Planning”, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 9, No. 3, July 1994.
- [21] Horton W.F., Goldberg S., Hartwell R.A., “A Cost/Benefit Analysis in Feeder Reliability Studies”, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 4, No. 1, January 1989.
- [22] Burns S., Gross G., “Value of Service Reliability”, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 5, No. 3, August 1990.
- [23] Course Text 80 EHO 157-8-PWR, “Application and Coordination of Reclosers, Sectionalizers and Fuses”, **IEEE Tutorial Course**, 1980.