

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS DE CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA - ELETROTÉCNICA

JÉSSICA PÊGO GOMES DAMASCENO
RENATA DE CÁSSIA SANCHES DO AMARAL

**DETERMINAÇÃO DOS PONTOS ÓTIMOS PARA ALOCAÇÃO DE
INDICADORES DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2015

JÉSSICA PÊGO GOMES DAMASCENO
RENATA DE CÁSSIA SANCHES DO AMARAL

DETERMINAÇÃO DOS PONTOS ÓTIMOS PARA ALOCAÇÃO DE INDICADORES DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Trabalho de conclusão de curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen
Co-orientador: Prof. Me. Rafael Fontes Souto

CURITIBA
2015

Jéssica Pêgo Gomes Damasceno
Renata de Cassia Sanches do Amaral

DETERMINAÇÃO DOS PONTOS ÓTIMOS PARA ALOCAÇÃO DE INDICADORES DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheira Eletricista, do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 02 de julho de 2015.

Prof. Emerson Rigoni, Dr
Coordenador de Curso
Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Paulo Cícero Fritzen, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Rafael Fontes Souto, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Co-Orientador

BANCA EXAMINADORA

Annemarle Gehrke Castagna, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Joaquim Eloir Rocha, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paulo Cícero Fritzen, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rafael Fontes Souto, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica

Aos nossos familiares, pelo apoio incondicional e paciência durante esta longa jornada até o momento da nossa formatura. Sem vocês não chegaríamos até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao nosso orientador Paulo Cícero Fritzen pela oportunidade, apoio e incentivo para elaboração deste trabalho. Ao nosso co-orientador Me. Rafael Fontes Souto pela dedicação e contribuições essenciais para a realização deste trabalho.

Agradecemos também aos professores da banca, Dr. Joaquim Rocha e Msc. Annemarlen Castagna, pela atenção e críticas com intuito de enriquecer este trabalho.

Eu, Jéssica, agradeço em primeiro lugar a Deus por me proporcionar a vida, sempre iluminando minhas escolhas e dando-me o discernimento necessário para concluir esta graduação. Agradeço aos meus pais por serem sempre meu alicerce, apoiando-me nos momentos difíceis, ensinando-me que dificuldades e desafios existem e que estou aqui para vencê-los. Um agradecimento especial ao meu marido Rafael por todo apoio, paciência, tolerância, impedindo-me de desistir diante das dificuldades, principalmente, nos finais de semestres. A todos meus familiares e amigos, pela compreensão nos momentos em que estive ausente, pelas palavras de força e apoio durante esta caminhada que foi longa porém chega ao fim, obrigada.

Eu, Renata, gostaria de agradecer primeiramente a Deus por me dar a oportunidade de concluir esta importante etapa na minha vida, apesar de todas as dificuldades enfrentadas nesta jornada. Um agradecimento especial aos meus pais por serem pacientes, me apoiarem e me incentivarem muito e, mesmo morando distantes, estiveram muito presentes. Ao meu noivo pela paciência e companheirismo, além de incentivo durante toda a universidade. A minha irmã pela paciência e companheirismo. A todos meus colegas de trabalho pela compreensão em todos os momentos que precisei e a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, muito obrigada.

"Descobri como é bom chegar quando se tem paciência. E para se chegar, onde quer que seja, aprendi que não é preciso dominar a força, mas a razão. É preciso, antes de mais nada, querer. "

(Amyr Klink)

RESUMO

DAMASCENO, Jéssica P. G.; AMARAL, Renata C. S. do .**Determinação dos pontos ótimos para alocação de indicadores de faltas em redes de distribuição**. 2015. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

As faltas em sistema de distribuição ocorrem devido a contato de árvores nos alimentadores, falhas de equipamentos, condições climáticas e outros motivos, ocasionando desligamentos temporários ou permanentes, comprometendo a qualidade e confiabilidade do fornecimento de energia. Indicadores de Faltas (IFs) são dispositivos que contribuem para a melhoria do processo de localização de faltas em linhas de distribuição. Atualmente, na maioria dos casos em sistema de distribuição, a identificação de faltas é realizada por meio de inspeção visual, ou seja, a equipe de manutenção percorre o trecho para identificar onde há danos. Este trabalho propõe uma abordagem computacional através da metodologia de Algoritmo Genético para a alocação ótima dos IFs em linhas de distribuição. Esta metodologia é capaz de propor uma solução eficaz de alocação dos dispositivos a fim de minimizar o tempo médio de deslocamento da equipe de manutenção até a seção da falta e, conseqüentemente, restabelecer o fornecimento de energia elétrica mais rapidamente. A técnica de otimização é aplicada à uma função objetivo, que representa o modelo matemático de alocação dos IFs, atendendo às restrições e simplificações impostas ao problema. Os resultados obtidos pelo modelo computacional são satisfatórios, comprovando a eficácia do método.

Palavras-chave: Algoritmos Genéticos. Indicadores de Falta. Otimização.

ABSTRACT

DAMASCENO, Jéssica P. G.; AMARAL, Renata C. S. do. **Efficient Placement of Fault Indicators in Distribution Networks**. 2015. 75 p. Final dissertation (Bachelor Degree) – Engenharia Industrial Elétrica - Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

The faults in distribution system occur due to contact of trees at the feeders, equipment failure, weather conditions and other reasons causing temporary or permanent shutdowns, compromising the quality and reliability of the power supply. Fault indicators (FIs) are devices that contribute to the improvement of the searching process of the fault location in distribution lines. Currently, in most cases of distribution system, the identification of faults is made by visual inspection, it means that the maintenance staff runs to identify the section where is the damage. This paper proposes a computational approach by Genetic Algorithm methodology for the optimal allocation of FIs in distribution lines. This methodology is able to give an effective solution for allocation of devices in order to minimize the average time of maintenance team travel to the damaged section, and consequently to restore the electricity supply faster. The optimization technique is applied to an objective function, which is the mathematical model of allocation of FIs, in accordance with the imposed restrictions on the problem and simplifications. The results of the computational model are satisfactory showing the effectiveness of the method.

Palavras-chave: Genetic Algorithms; Fault Indicator; Optimization

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Sensor do IF	25
Figura 02 - Foto da bateria interna de um IF de poste	27
Figura 03 - Comunicação do IF	27
Figura 04 - Detalhe do banco de chaves para programação do IF	29
Figura 05 - Indicadores de Faltas instalados nos cabos	30
Figura 06 - Indicador de Falta modelo Linetroll 110E μ instalado	30
Figura 07 - Indicador de Falta instalado no poste	31
Figura 08 - IF instalado no poste.....	32
Figura 09 - Instalação de IFs no sistema de distribuição	33
Figura 10 - Ferramenta <i>hot-stick</i> para instalação do IF no cabo	33
Figura 11 - Técnico utilizando a ferramenta <i>hot-stick</i>	34
Figura 12 - Fluxograma de funcionamento do algoritmo genético.....	40
Figura 13 – Sistema de estudo utilizado (Adaptado)	42
Figura 14 – Fluxograma de execução do AG implementado (Adaptado).....	43
Figura 15 – Exemplo de indivíduo para o algoritmo	44
Figura 16 - Ocorrência das faltas no sistema	45
Figura 17 – Gráfico das aptidões utilizando o método da roleta.....	48
Figura 18 – Exemplo de cruzamento em um ponto.....	49
Figura 19 – Exemplo de mutação com representação binária	50
Figura 20 – Distância média via MATLAB para o caso 1	55
Figura 21 – Distância da melhor solução via MATLAB para o caso 1.....	56
Figura 22 – Distância média via MATLAB para alteração da taxa de mutação....	58
Figura 23 – Distância da melhor solução via MATLAB para o caso 2.....	59
Figura 24 – Distância média via MATLAB para aumento da taxa de mutação	60
Figura 25 – Distância da melhor solução via MATLAB para aumento da taxa de mutação	61
Figura 26 – Distância média via MATLAB para taxa de mutação nula.....	62
Figura 27 – Distância da melhor solução via MATLAB para taxa de mutação nula	63
Figura 28 – Distância média via MATLAB para baixa taxa de não cruzamento ...	64

Figura 29 – Distância da melhor solução via MATLAB para baixa taxa de não cruzamento.....	65
Figura 30 – Distância média via MATLAB para aumento da taxa de não cruzamento.....	66
Figura 31 – Distância da melhor solução via MATLAB para elevada taxa de não cruzamento.....	66
Figura 32 – Distância média via MATLAB para o caso 4	68
Figura 33 – Distância da melhor solução via MATLAB para o caso 4.....	69
Figura 34 – Indivíduo correspondente a solução.....	70

LISTA DE SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
COD	Centro de Operação da Distribuição
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IF	Indicador de Falta
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade de energia elétrica
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SiC	Carbeto de Silício
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
ZnO	Óxido de Zinco

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Definição de parâmetros	54
Tabela 02 - Caso 1: Sem operadores genéticos	54
Tabela 03 - Caso 2: Sem <i>crossover</i> e baixa taxa de mutação	57
Tabela 04 - Caso 2: Sem <i>crossover</i> e elevada taxa de mutação	59
Tabela 05 - Caso 3: Taxa de mutação e não cruzamento nulas	61
Tabela 06 - Caso 3: Baixa taxa de não cruzamento.....	63
Tabela 07 - Caso 4: Com cruzamento e mutação	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 TEMA.....	17
1.1.1 Delimitação do Tem.....	18
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	18
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 Objetivo Geral	19
1.3.2 Objetivos Específicos	19
1.4 JUSTIFICATIVAS	20
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	21
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2 ESTUDO SOBRE A REDE DE DISTRIBUIÇÃO E DISPOSITIVOS INDICADORES DE FALTAS	23
2.1 REDE DE DISTRIBUIÇÃO	23
2.2 INDICADOR DE FALTA	24
2.2.1 Histórico	24
2.2.2 Funcionamento.....	25
2.2.3 Alimentação.....	26
2.2.4 Comunicação	27
2.2.5 Programação.....	28
2.2.6 Manutenção.....	29
2.2.7 Tipos de IFs.....	29
2.2.8 Instalação de IFs	32
3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA A ALOCAÇÃO DE DISPOSITIVOS INDICADORES DE FALTA	34
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35

3.2 ALGORITMOS GENÉTICOS	36
3.3 FUNCIONAMENTO DE UM AG	38
3.4 PRINCIPAIS VANTAGENS DO AG	40
3.5 PRINCIPAIS DESVANTAGENS DO AG	41
3.6 RELAÇÃO ENTRE OS ALGORITMOS GENÉTICOS E LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	41
4 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	41
4.1 ESTRUTURA DO ALGORITMO.....	42
4.1.1 Geração da População Inicial.....	44
4.1.2 Definição dos Indivíduos	44
4.1.3 Função Objetivo	45
4.1.4 Seleção	47
4.1.5 Operadores Genéticos	49
4.1.5.1 Cruzamento.....	49
4.1.5.2 Mutação.....	50
4.1.6 Parâmetros Genéticos.....	51
4.1.6.1 Tamanho da População	51
4.1.6.2 Taxa de não cruzamento.....	51
4.1.6.3 Taxa de Mutação.....	52
4.1.6.4 Critério de parada.....	52
4.1.7 Solução (Melhor Indivíduo).....	53
5 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	54
5.1 CASO 1 - SEM OPERADORES GENÉTICOS	53
5.2 CASO 2 - SEM <i>CROSSOVER</i> E COM MUTAÇÃO.....	56
5.2.1 Baixa Taxa de Mutação.....	57
5.2.2 Elevada Taxa de Mutação.....	59

5.3 CASO 3 - TAXA DE MUTAÇÃO NULA	61
5.3.1 Taxa de não cruzamento nula	61
5.3.2 Baixa Taxa de não cruzamento	63
5.3.3 Elevada Taxa de não cruzamento	65
5.4 CASO 4 - COM CRUZAMENTO E MUTAÇÃO	67
6 CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda de energia elétrica, um alto investimento tem sido necessário nas concessionárias de distribuição. Com o objetivo de se manterem competitivas no mercado, parâmetros de disponibilidade e confiabilidade do sistema são evidentemente importantes para atingirem melhores índices de qualidade no fornecimento de energia elétrica (USIDA, 2011).

As distribuidoras de energia são avaliadas no quesito de fornecimento de energia pelos órgãos reguladores do setor elétrico de acordo com os indicadores de desempenho, qualidade de serviço de distribuição, eficiência e confiabilidade do sistema previstos pelo Módulo 8 do PRODIST, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (ANEEL,2014).

A qualidade de energia elétrica (QEE) fornecida é referente à qualidade do produto e qualidade do serviço. A primeira refere-se à conformidade da onda de tensão fornecida, enquanto a qualidade dos serviços relaciona-se à continuidade do sistema e o tempo de manutenção para reparo no caso de interrupções (ANEEL, 2014).

A qualidade dos serviços é impactada pelas falhas no sistema de energia elétrica que afetam o fornecimento contínuo de energia elétrica aos consumidores. As interrupções no fornecimento ocorrem devido a perturbações, curtos-circuitos, falhas de equipamentos, intempéries, contatos com árvores, desligamentos para manutenção entre outros eventos.

Quando ocorrem interrupções, um grande problema existente é localizar qual foi o ponto da falta. Estes eventos exigem uma mitigação minuciosa pela equipe da manutenção e uma investigação rápida a fim de restabelecer o sistema e não causar grandes prejuízos aos consumidores e aos índices de qualidade da distribuidora.

As concessionárias têm enfrentado um aumento da quantidade de reclamações relacionadas à qualidade de energia devido a curtas interrupções no fornecimento de energia. A principal razão é que há consumidores com mais cargas sensíveis em todos os setores (residencial, comercial e industrial). As distribuidoras

estão investindo mais em dispositivos automatizados a fim de atingir a máxima produtividade e se manterem competitivas (DUGAN et al.,1996).

Obter a informação correta do ponto defeituoso é um grande problema enfrentado pela manutenção. Sendo assim, há diversas linhas de estudos para melhorar a confiabilidade do sistema com técnicas de otimização para estimar o local da falta, de automação para proteção e obtenção de informações relevantes sobre defeitos, objetivando reduzir o tempo de indisponibilidade do fornecimento de energia elétrica.

1.1 TEMA

No contexto da dificuldade de se obter a informação do local defeituoso da rede, destaca-se a aplicação dos dispositivos indicadores de falta em sistemas de distribuição.

Indicadores de Falta (IF) são equipamentos instalados ao longo do sistema de distribuição que possuem a capacidade de indicar se o sistema teve algum tipo de falta em sua instalação.

A instalação dos IFs em redes de distribuição tem por finalidade sinalizar a ocorrência de faltas e disponibilizar a informação à central de operação para que sejam identificadas e tomadas as decisões de restabelecimento ou deslocamento da equipe de manutenção para reparo.

A utilização de indicador de falta em circuitos de distribuição pode proporcionar segurança e informação instantânea a ser utilizada pela equipe de operação, permitindo que sejam tomadas decisões inteligentes de chaveamento no sistema resultando em redução do tempo de interrupção e aumento da qualidade de energia fornecida. (ANGERER, 2001).

Com a rede definida, a alocação do IF impacta no tempo da interrupção (incluindo tempo de localização e de reparo). Este tempo é relacionado a energia não-distribuída (e também custo de energia não-distribuída ou custo de interrupção) (CONG et al., 2005).

1.1.1 Delimitação do Tema

A determinação da melhor alocação de IFs para se obter um menor tempo de interrupção do fornecimento de energia é o objetivo da otimização deste trabalho. Considerando que uma pequena quantidade de dispositivos são alocados nas redes, devido ao seu custo, é preciso garantir a segurança e confiabilidade da rede (reduzir o custo de energia não-distribuída, o tempo de interrupção, o custo de interrupção) (CONG et al., 2005).

Segundo Usida (2011), para as redes de distribuição é necessária a análise do conjunto de IFs a serem empregados, pois se há alguma modificação na quantidade destes dispositivos na rede (adicionado ou retirado), deve ser feita a realocação de todos os demais.

Apesar dos equipamentos IFs serem usados em redes de distribuição aérea e subterrânea, este trabalho somente abordará sua aplicação em redes aéreas.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

O problema de definir os pontos ótimos de instalação dos IFs será solucionado neste trabalho através da técnica de Algoritmos Genéticos (AGs) com o objetivo de se obter o menor tempo possível da interrupção.

Na modelagem do problema, vamos supor a ocorrência de faltas na rede e obter o tempo de interrupção de energia para determinados posicionamentos dos IFs. O programa deve solucionar o problema da alocação dos IFs ao encontrar a melhor configuração destes para as faltas propostas.

Como premissas, destacamos as seguintes proposições:

- Quantidade de IFs a serem instalados é uma condição inicial do problema;
- As faltas ocorrem uma por vez na rede abordada e são do tipo permanente;
- Não serão consideradas faltas no mesmo trecho de instalação do IF;
- Serão considerados IFs de cabo;

- Não serão considerados outros equipamentos de proteção na modelagem do problema;
- Não serão consideradas as cargas e quantidades de unidades consumidoras na modelagem do problema.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

- Desenvolver uma rotina computacional utilizando o *software* MATLAB[®] para definir os pontos ótimos para alocação de indicadores de falta em linhas de distribuição a partir de técnicas de inteligência artificial, mais especificamente a técnica de Algoritmos Genéticos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar trabalhos que tratam sobre o tema de modo a realizar uma revisão bibliográfica sobre o tema proposto;
- Propor critérios para a definição da posição dos indicadores de falta das linhas de distribuição;
- Implementar o algoritmo de definição dos pontos ótimos para alocação de indicadores de falta utilizando o *software* MATLAB[®];
- Aplicar a técnica de Algoritmos Genéticos para a resolução do problema de alocação de indicadores de falta;
- Desenvolver a modelagem matemática da função objetivo a ser utilizada pelo AG.
- Aplicar a metodologia em uma rede de distribuição existente adaptada do livro Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição Eletrobrás (ELETROBRAS, 1982).

1.4 JUSTIFICATIVAS

Devido a vários eventos aleatórios, como contato de árvores, falhas de equipamentos, condições climáticas, entre outros, ocorrem desligamentos temporários ou permanentes no sistema de distribuição. Isso compromete a qualidade e confiabilidade do fornecimento de energia, sendo os consumidores os mais prejudicados, uma vez que acontecem desligamentos não programados.

Localizar os pontos defeituosos do sistema, na maioria das vezes é um problema enfrentado pelas equipes de manutenção da concessionária, visto que o tempo que os centros de operação da distribuição levam para definir os pontos exatos pode ser elevado. A rápida e eficaz localização de uma falta torna-se fundamental para a operação do sistema com segurança. Atualmente, na maioria dos casos em sistema de distribuição, a identificação de faltas é realizada por meio de inspeção visual, ou seja, a equipe de manutenção percorre o trecho para identificar onde há danos.

Este trabalho tem suas justificativas fundamentadas na proposta de que a partir do funcionamento dos indicadores de faltas e sua aplicação no sistema de distribuição de energia elétrica, o consumidor será beneficiado, uma vez que o tempo de interrupção tende a diminuir. Ao instalar um dispositivo indicador de falta, o processo de detecção do ponto defeituoso torna-se mais eficiente, pois os IFs sinalizam quando houver a passagem de uma corrente de curto-circuito. A partir dessa sinalização, o trabalho da equipe de manutenção é facilitado, pois o trabalho de isolamento da seção em falta e a restauração do fornecimento de energia ocorrem mais rapidamente (MUENCH et al.,1982; ZHANG et al.,2004). Desta forma e considerando a Teoria de Inteligência Artificial, será utilizada a técnica de Algoritmos Genéticos para alocação desses dispositivos na rede.

A eficiência operacional da estrutura de distribuição deve apresentar confiabilidade, pois para se ter ótimos padrões é necessário um sistema com melhor desempenho e eficiência. O desenvolvimento de métodos sistemáticos, flexíveis, práticos e abrangentes em relação às necessidades atuais de concessionárias e consumidores motivam a realização dessa pesquisa.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a elaboração desse trabalho foram realizadas pesquisas bibliográficas na literatura sobre redes de distribuição, indicadores de falta, bem como as metodologias para sua alocação, considerando artigos técnicos, dissertações de mestrado, teses de doutorado e livros com a abordagem adequada e dedicadas a este tema.

Com a fundamentação teórica e o levantamento das informações relevantes da rede de distribuição, é proposta a modelagem matemática e solução do problema, com a utilização de recursos computacionais através do MATLAB[®]. Esta etapa consiste no desenvolvimento da função objetivo do problema e modelagem do problema abordado, utilizando a técnica de Algoritmo Genético para a alocação otimizada dos dispositivos indicadores de falta.

A partir dos resultados simulados, avalia-se a instalação dos dispositivos sugeridos pelo algoritmo em suas melhores configurações de localização, apresentando os benefícios da instalação destes para o sistema de distribuição.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho de conclusão de curso (TCC) apresenta a seguinte estrutura de capítulos, sendo dividido conforme as três disciplinas referentes ao TCC da Engenharia Elétrica da seguinte forma:

- Metodologia Aplicada ao TCC: Capítulo 1;
- Trabalho de Conclusão de Curso 1: Capítulos 2 e 3;
- Trabalho de Conclusão de Curso 2: Capítulos 4 a 6.

Capítulo 1 - Introdução: Contém a apresentação do trabalho, tema, delimitação do tema, problemas, premissas, objetivos, justificativas e procedimentos metodológicos para a realização do mesmo.

Capítulo 2 - Estudo sobre a rede de distribuição e dispositivos indicadores de faltas: Neste capítulo é abordada uma breve revisão referente a redes de

distribuição, funcionamento dos IFs e estudo da literatura envolvendo a otimização da alocação desses dispositivos.

Capítulo 3 - Metodologia desenvolvida para a alocação de dispositivos indicadores de falta: Neste capítulo é apresentada a metodologia de Algoritmos Genéticos e sua relação com linhas de distribuição, focando na modelagem para a resolução do problema de alocação de IFs.

Capítulo 4 - Modelagem matemática: Foi desenvolvido um algoritmo para otimização da alocação dos IFs aplicado em uma rede distribuição real para apresentação da técnica, podendo ser aplicada em demais redes de acordo com suas particularidades.

Capítulo 5: Análise e discussão dos resultados: Serão realizadas as simulações e discutidos os resultados obtidos.

Capítulo 6: Conclusões: Neste capítulo são comparados os objetivos, problemas, premissas e informações do capítulo 1 com o desenvolvimento dos capítulos seguintes, apresentando as conclusões do trabalho desenvolvido e sugestões para pesquisas futuras.

2 ESTUDO SOBRE A REDE DE DISTRIBUIÇÃO E DISPOSITIVOS INDICADORES DE FALTAS

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão referente a redes de distribuição e seus principais componentes. Será dado destaque ao equipamento IF, apresentando seu histórico e funcionamento.

2.1 REDE DE DISTRIBUIÇÃO

O segmento de distribuição caracteriza-se como o segmento do setor elétrico dedicado à entrega de energia elétrica para um usuário final. Como regra geral, o sistema de distribuição pode ser considerado como o conjunto de instalações e equipamentos elétricos que operam, geralmente, em tensões inferiores a 230 kV, incluindo os sistemas de baixa tensão (ANEEL, 2014).

A rede de distribuição possui componentes básicos para que a entrega da energia ao consumidor seja realizada. Conforme mencionado por Silva (2013), uma rede é composta tipicamente por uma subestação de distribuição alimentada pela rede de transmissão do sistema elétrico.

A maioria dos sistemas de distribuição possui alimentadores do tipo radiais, ou seja, uma configuração de rede que não possibilita a interconexão dos conectores entre si (*loops*) e entre os alimentadores adjacentes. Isso significa que o fluxo de potência é transferido por um caminho da subestação de distribuição até o consumidor (SILVA, 2013).

Conforme consta na Resolução Normativa nº 414 de 2010 da ANEEL, a qual estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica, a subestação, o componente principal, compreende os dispositivos de manobra, controle, proteção, transformação e demais equipamentos, condutores e acessórios.

Algumas terminologias da área de rede de distribuição de energia serão definidas a seguir para o entendimento ao longo deste trabalho, segundo a CPFL (2006):

“a) Falta: termo que se aplica a todo fenômeno acidental que impede o funcionamento de um sistema ou equipamento elétrico. Por exemplo: isolador perfurado numa linha elétrica em funcionamento poderá ser falta no sistema em consequência da falha de isolação.

b) Curto-circuito: ligação intencional ou acidental entre dois ou mais pontos de um circuito, através de impedância desprezível.

c) Corrente de curto-circuito: sobrecorrente que resulta de um curto-circuito.

d) Sobrecorrente: intensidade de corrente superior à máxima permitida para um sistema, equipamento ou para um componente elétrico.

e) Seletividade: capacidade do equipamento de proteção mais próximo da falta de antecipar, sempre, a atuação do equipamento de retaguarda, independente da natureza da falta ser transitória ou permanente.

f) Faltas transitórias: são aquelas em que havendo a operação de um equipamento de proteção desaparece a causa do defeito e o circuito funciona normalmente após religado. As causas mais comuns de defeitos transitórios são: descargas atmosféricas; contatos momentâneos entre condutores; abertura de arco elétrico; materiais sem isolação adequada

g) Faltas permanentes: são aquelas em que é necessária a intervenção do homem para que se corrija o defeito causador da interrupção antes de se religar o equipamento operado. Eventualmente, uma falta do tipo transitória pode se transformar em uma falta do tipo permanente caso não haja uma operação adequada dos equipamentos de proteção.”

2.2 INDICADOR DE FALTA

2.2.1 Histórico

Os primeiros IFs, capazes de sinalizar a passagem de uma corrente de curto circuito, foram projetados pela companhia Horstmann em 1946. Estes possuíam atuação mecânica devido à rotação de um disco quando havia passagem de uma corrente elevada. Tais dispositivos necessitavam da intervenção do operador quando uma falta era sinalizada. Os IFs evoluíram e o rearme tornou-se automático, pelo restabelecimento da corrente de carga ou tensão na rede (USIDA, 2011).

A partir de 1976, a vida útil e confiabilidade dos equipamentos IFs melhoraram ao conter uma fonte externa de energia. Os equipamentos eram ativados e utilizados imediatamente à sua instalação. Os fabricantes começaram a investir em tecnologias para aperfeiçoamento dos dispositivos IFs.

Em 1987, a companhia Horstmann obteve investimento para desenvolvimento dos dispositivos IFs para linhas de distribuição aéreas com comunicação via radiofrequência para a troca de informações com o centro de controle através do SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) (ANGERER, 2001).

Na última década, destacam-se os IFs no contexto *Smart Grid* para gerenciamento automático da falta visando à melhoria da confiabilidade dos sistemas de distribuição (BJERKAN, 2009).

2.2.2 Funcionamento

Na ocorrência de uma falta, o dispositivo sinaliza a passagem de corrente de curto-circuito. Esta detecção se dá por conta de sensores monitorando a passagem de corrente pela rede primária de distribuição, os quais diferenciam as situações de faltas daquelas condições normais do sistema, devido à sensibilidade pelo campo magnético produzido pela corrente do circuito (SCHWEITZER, 2004).

Ao ocorrer uma falta, o IF identifica a corrente de curto-circuito devido a um sensor, o qual é sensibilizado pelo campo magnético gerado pela corrente passante pelo condutor, ou seja, ele monitora a variação da corrente no tempo $\frac{di}{dt}$ conforme Figura 01 (USIDA, 2011).

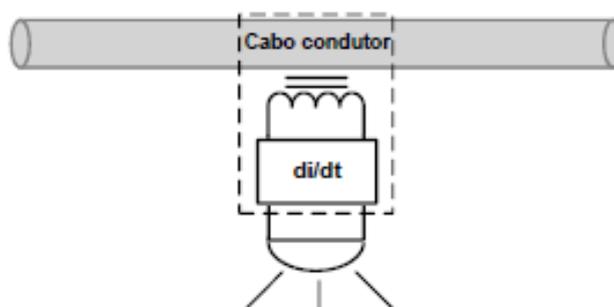


Figura 01- Sensor do IF.
Fonte: USIDA (2011).

A sinalização é feita a partir de uma variedade de *displays* encontrados nos indicadores de falta e este disparo pode ser indicado por: uma bandeirola colorida, LED piscante (*flash*), ou, uma combinação dos dois tipos (SOUZA, 2009).

Por exemplo, segundo o manual do modelo *LineTroll100Eµr* da fabricante Nortroll, a sinalização feita por LED pode ser vermelha intensa para faltas permanentes ou uma luz regular verde para faltas transitórias.

Após localizado o defeito, o reparo efetuado e o fornecimento restabelecido, o IF necessita ser rearmado. Esse rearme pode ser automático ou manual, dependendo do tipo de programação, modelo e fabricante. O rearme automático pode ser feito por tensão, por tempo, por corrente ou outro de acordo com o fabricante, aplicação e duração da falta (USIDA, 2011).

Diferente das chaves religadoras automáticas e dos seccionadores automáticos, os IFs não permitem função de manobra, porém são fáceis de serem instalados em redes de distribuição aéreas. Além disso, os IFs têm um custo de aquisição mais barato e podem ser instalados com o sistema energizado (USIDA, 2011).

Os IFs não permitem apontar o local da falha, porém sinaliza a seção em que ocorreu a falha. Assim, é um dispositivo que agiliza o direcionamento das equipes de manutenção para o restabelecimento de energia rápido e com maior eficiência (SOUZA, 2009).

2.2.3 Alimentação

A alimentação do IF é feita com uma bateria interna conforme Figura 02, garantindo a autonomia do seu funcionamento, independente do circuito monitorado.

Alguns dispositivos possuem a indicação do nível da carga de bateria para ser realizada sua substituição. Segundo os fabricantes, o funcionamento correto do IF é dependente do nível de carga da bateria. Os detalhes de vida útil são fornecidos pelo fabricante de acordo com o modelo (USIDA, 2011).

Devido à sensibilização da corrente de curto circuito ocasionada pela falta, os IFs atuam sinalizando o trecho em falta, sendo identificados pelos dispositivos em amarelo da Figura 03. A informação do comportamento desses indicadores é fornecida remotamente ao sistema de supervisão da rede.

Há também a possibilidade de comunicação com emissão de um sinal de radiofrequência ou via GSM (*Global System for Mobile Communication*). Com este sinal, a equipe de manutenção pode ser deslocada ao local da ocorrência da falta (USIDA, 2011).

Quando o modelo de IF possui a possibilidade de supervisão remota, existem algumas vantagens, destacadas abaixo segundo Usida (2011):

- Redundância na localização do ponto defeituoso;
- Redução do tempo de atendimento;
- Otimização na alocação de equipes de plantão e inspeção;
- Possibilidade de isolamento da secção defeituosa de forma automática e remota caso as chaves de manobra sejam telecomandadas.

2.2.5 Programação

O IF sinaliza quando a corrente excede o nível de detecção ou o nível pré-estabelecido. As programações variam conforme fabricantes, porém, geralmente possuem ajustes dos sensores e de rearme. O dispositivo é bloqueado por um período de tempo para a energização do sistema para que ele não sinalize durante a corrente de energização (*inrush*) (USIDA, 2011).

A programação pode ser realizada através de *software* ou por um banco de chaves (*switches*) existentes no IF de acordo com a Figura 04 (USIDA, 2011).



Figura 04: Detalhe do banco de chaves para programação do IF.
Fonte: USIDA(2011)

2.2.6 Manutenção

A manutenção dos IFs é periódica e com um intervalo de um ano como recomendação dos fabricantes. A manutenção consiste na substituição da bateria interna de alimentação, uma vez identificado o funcionamento inapropriado do dispositivo. A avaliação do funcionamento é realizada por meio de um teste em que se aproxima um ímã ou uma chave e espera-se o acionamento do IF devido a sensibilização magnética (USIDA, 2011).

2.2.7 Tipos de IFs

Como este trabalho aborda rede de distribuição aérea, serão apresentados os tipos de IFs para essa aplicação. Estes dispositivos apresentam maior utilização para redes aéreas em comparação ao uso em rede de distribuição subterrânea, uma vez que a aérea é mais susceptível a defeitos (USIDA, 2011).

Segundo Usida (2011), podemos encontrar dois tipos de IFs. O primeiro trata-se de IF de cabo, os quais são instalados no cabo energizado com segurança e facilidade. Também podem ser chamados de IF de linha ou sinalizadores de faltas.

Usualmente é utilizado um IF para cada fase mostrados na Figura 05. A Figura 06 mostra o dispositivo com maior detalhe.

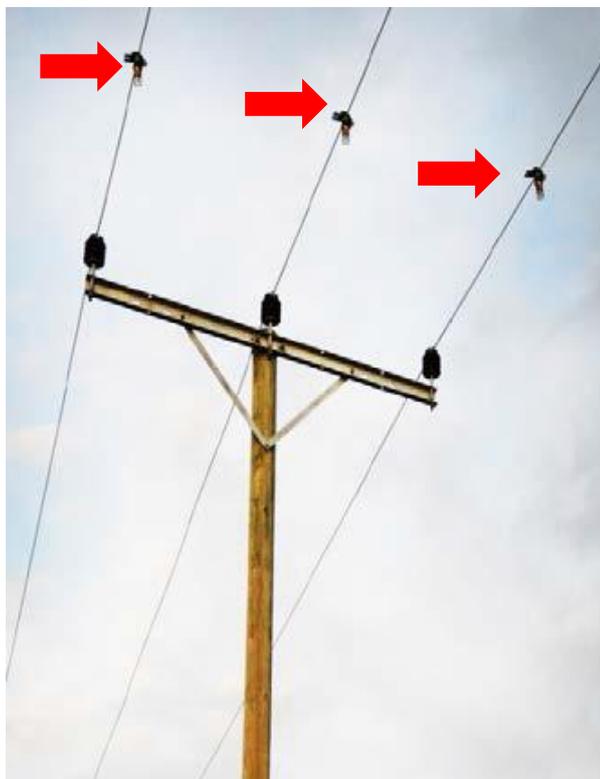


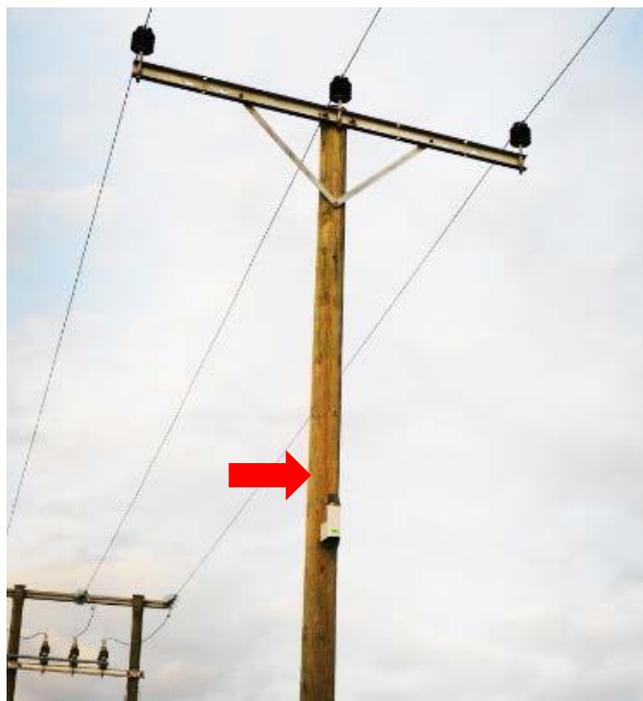
Figura 05: Indicadores de Falta instalados nos cabos.
Fonte: Product Catalog Nortroll(2011)



Figura 06: Indicador de Falta modelo LineTroll 110Eμ instalado.
Fonte: Product Catalog Nortroll(2011)

Outro tipo de IF é o de poste, o qual monitora as três fases simultaneamente e é instalado diretamente no poste. Porém, este tipo de instalação está sujeita a interferências, como a presença da rede secundária no mesmo poste, o que torna a instalação do IF de cabo a maneira mais adequada nesta situação. Além disto, o preço de um IF de poste é similar a três IFs de cabo (monofásicos) (USIDA, 2011).

A Figura 07 apresenta um indicador de poste instalado e a Figura 08 mostra o dispositivo com maior detalhe.



**Figura 07: Indicador de Falta instalado no poste.
Fonte: Product Catalog Nortroll(2011)**



**Figura 08: IF instalado no poste.
Fonte: SOUZA(2009)**

2.2.8 Instalação de IFs

Pontos estratégicos são definidos para instalar os IFs, como derivações de alimentadores do sistema de distribuição, conforme Figura 09, ao longo de grandes trechos de alimentadores rurais (SOUZA, 2009). Neste trabalho busca-se encontrar os pontos ótimos para alocação dos IFs a fim de reduzir o tempo para o restabelecimento de energia.

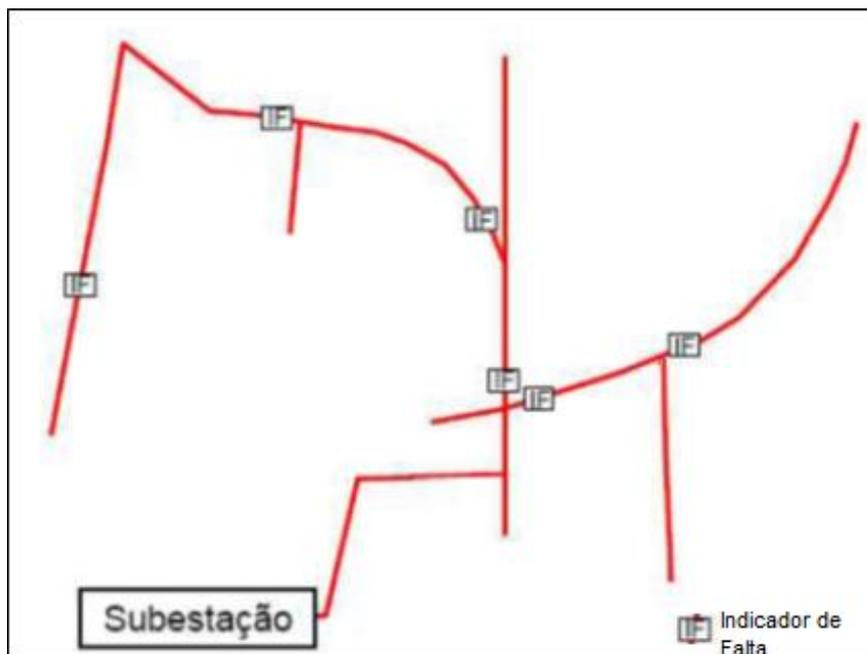
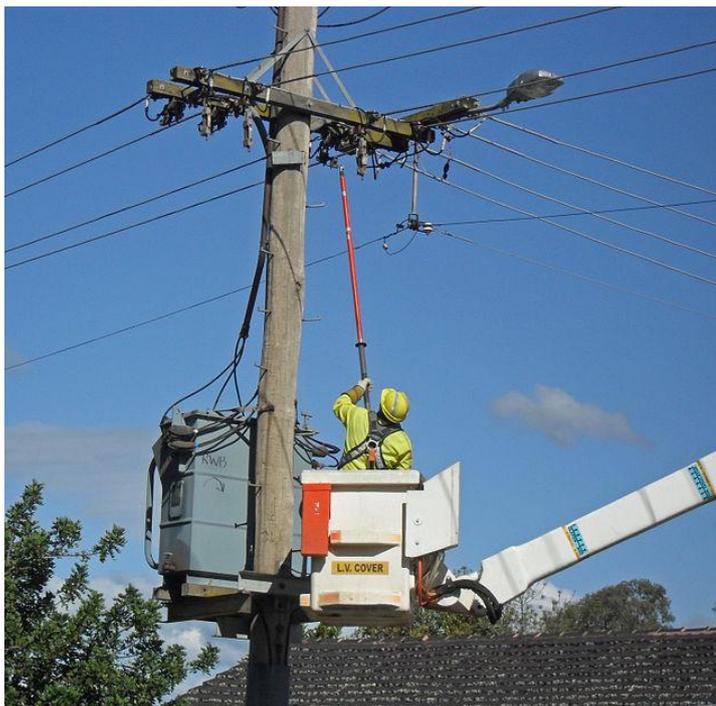


Figura 09: Instalação de IFs no sistema de distribuição.
Fonte: SOUZA (2009)

Para a instalação dos IFs de cabo, uma ferramenta que se assemelha a uma vara possuindo uma pinça com isolamento é utilizada pelo técnico para inserir o equipamento na rede energizada. Esta ferramenta é chamada de *hot-stick* e pode ser visualizada na Figura 10. Na Figura 11 é mostrada a sua utilização pelo técnico de campo realizando a instalação do IF.



Figura 10: Ferramenta *hot-stick* para instalação do IF no cabo.
Fonte: Nortroll (2015)



**Figura 11: Técnico utilizando a ferramenta *hot-stick*.
Fonte: Wikipedia (2015)**

Com o conhecimento adquirido neste capítulo, a metodologia aplicada para a definição da melhor alocação do IFs é abordada a seguir.

3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA A ALOCAÇÃO DE DISPOSITIVOS INDICADORES DE FALTA

Serão abordadas, neste capítulo, a revisão bibliográfica realizada e a metodologia dos Algoritmos Genéticos (AG), de forma conceitual, vantagens e desvantagens, e sua relação com as linhas de distribuição.

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma revisão na literatura foi realizada visando aprofundar o conhecimento do assunto abordado neste trabalho.

O AG é utilizado no estudo feito por Cong et al. (2005) em que os autores consideram o custo de energia não distribuída, tempo de interrupção de cada cliente, custo de interrupção e custo global de instalação de IF para o estudo de caso de uma parte de uma rede rural da França. É possível analisar o impacto de cada uma das funções na alocação dos IFs de acordo com as quantidades de dispositivos a serem utilizados. Apesar dos resultados parecerem interessantes, não há a possibilidade de reprodução do trabalho para serem confirmados os resultados, pois os dados contidos no *data file* não são disponibilizados.

No estudo realizado por Angerer (2008) é apresentada a evolução dos IFs e sua aplicação na melhoria da confiabilidade do sistema, assim como a redução dos custos operativos com a utilização destes dispositivos. Angerer destaca os tipos de rearme: automático por presença de tensão, automático por passagem de corrente e automático após um período de tempo pré-ajustado. É apresentada uma comparação dos custos estimados sem fornecimento de energia com e sem a utilização dos IFs para um sistema de distribuição.

Em Bjerkan (2009), é abordado o uso e vantagens dos dispositivos IFs que possuem comunicação remota. O autor descreve a importância da supervisão remota, a qual permite a análise do local da falta remotamente e eficiência no

deslocamento da equipe de manutenção para o reparo e restabelecimento do sistema.

Chin-Ying Ho et al. (2011) utilizam o método de Algoritmo Imunológico para minimizar o custo total de interrupção de serviço ao cliente e o custo de investimento do IF.

A tese de Wesley Usida (2011) aplica a metodologia de AG para a solução do problema de alocação de IFs no tronco principal de uma rede de distribuição levando-se em consideração a proximidade dos IFs entre estes dispositivos e também em relação a outros equipamentos com função de indicação de falta.

Rahman et al. (2011) apresentam a solução de alocação de IFs utilizando o método de Algoritmos Genéticos a partir de uma combinação de quatro funções objetivas: custo de energia não distribuída, custo de operação e restauração, custo de insatisfação do cliente e custo do equipamento IF. Foram utilizados dois casos para a otimização, sendo um deles o sistema de 13 barras do IEEE e uma rede real de Bandargah no Irã.

3.2 ALGORITMOS GENÉTICOS

Algoritmo Genético (AG) é um procedimento computacional de otimização e busca. É baseado no Darwinismo, que considera a seleção natural e a genética. Foi inicialmente proposto na década de 60 por John H. Holland e sua equipe da Universidade de Michigan. A observação da natureza dos organismos vivos permitiu concluir que estes são “consumados solucionadores de problemas” (HOLLAND, 1992).

Segundo Fernandes (2005), o AG utiliza um processo iterativo de busca da melhor solução para o seu problema, no entanto, não há garantia de que a solução ótima seja encontrada.

Pode-se considerar que esses algoritmos são muito eficientes para a busca de soluções ótimas, pois não forçam às limitações encontradas como os métodos de busca tradicionais. Geralmente eles são capazes de explorar fatores ambientais e

convergir para soluções ótimas em níveis globais, contornando a ocorrência de ótimos locais (GOLDENBERG, 1997) e (HOLLAND, 1992).

A técnica do AG diferencia-se dos outros métodos de otimização principalmente em três fatores:

- Trabalha com um conjunto de pontos para um dado problema ao invés de um ponto isolado;
- Utiliza regras de transição probabilísticas e não determinísticas;
- Normalmente opera em um espaço de soluções codificadas, não ficando assim, diretamente no espaço de busca.

O AG por ser baseado no Darwinismo possui muitos termos da biologia, criando uma população de possíveis respostas para o problema a ser solucionado, para então, passar ao processo de evolução.

Alguns dos termos mais utilizados na literatura de AG são apresentados abaixo:

- Cromossomo: segmento do filamento cromático que se destaca devido a divisão celular indireta, constituindo unidades definidas na formação do novo ser. No AG, os cromossomos representam a estrutura de dados que codifica uma solução para um problema, ou seja, um indivíduo no espaço de busca.
- Gene: partícula do cromossomo em que se encerram os caracteres hereditários. Nos algoritmos genéticos, é um parâmetro codificado no cromossomo, ou seja, um elemento do vetor que representa o indivíduo (cromossomo).
- Genótipo: continuação hereditária de um ser, ou seja, os genes que ele possui. Nos algoritmos genéticos, representa a informação contida no indivíduo.
- Fenótipo: designa as características apresentadas por um indivíduo, sejam elas morfológicas, fisiológicas e comportamentais. É a expressão do genótipo, ou seja, as proteínas que o genótipo codifica, determina as características fenotípicas. Nos algoritmos genéticos, representa o objeto, estrutura ou organismo construído a partir da decodificação do indivíduo.
- Grau de adaptação: representa o quanto a resposta representada por um indivíduo soluciona o problema proposto. É calculado a partir da função objetivo.

- Grau de aptidão: está relacionada ao nível de adaptação de um indivíduo de acordo com a população à qual pertence.

Utilizamos a representação de vetores binários, a qual foi utilizada nos trabalhos de John Holland. Ao aplicar operadores genéticos, espera-se a produção de novos indivíduos a partir dos indivíduos existentes. Este princípio é o de que a partir de sucessivas gerações, a população estenda a busca até chegar a um resultado satisfatório.

3.3 FUNCIONAMENTO DE UM AG

O funcionamento de um algoritmo genético consiste em uma população formada por uma série de *bits*, representando os cromossomos, que, por sua vez é transformada por três operadores: seleção, cruzamento e mutação. Cada cromossomo representa uma possível solução para o problema a ser resolvido, e cada *bit* representa o valor associado a um gene. As soluções são classificadas por uma função de aptidão que desempenha o papel do ambiente. A combinação entre a função aptidão e o cromossomo representa o indivíduo (ZAUKE, 2011).

A partir de uma população inicial aleatória, o AG cria uma nova população por meio dos operadores genéticos. Os indivíduos com melhor desempenho são selecionados e partes destes são combinadas, gerando cópias mais fortes, a partir do uso de cruzamento e seleção. Este processo de busca exige uma ferramenta computacional que possa viabilizar sua utilização (ZAUKE, 2011).

Algumas etapas do processo de funcionamento de um algoritmo genético são apresentadas abaixo:

- Avaliação: é realizada a avaliação dos indivíduos da população analisando a aptidão para a resolução do problema proposto.
- Seleção: os indivíduos são selecionados para a reprodução, em que a probabilidade de ser escolhido está diretamente ligado a sua aptidão, ou seja, são escolhidos elementos da população que irão participar do processo de reprodução. A escolha deve ser realizada de maneira que os

membros da população mais adaptados ao meio ambiente tenham maior chance de reprodução (FERNANDES, 2005).

- Cruzamento: são gerados novos indivíduos a partir de características das soluções escolhidas que foram recombinadas. A função do operador de cruzamento é combinar os cromossomos dos pais para gerar os cromossomos dos filhos, permitindo que as próximas gerações herdem suas características. É normalmente aplicado com alta probabilidade, e é responsável pela maior parte da busca realizada pelo algoritmo genético.
- Mutação: é acrescentada uma variedade à população, uma vez que são alteradas as características dos indivíduos resultantes do processo de reprodução. A mutação opera sobre indivíduos resultantes do processo de cruzamento e com uma probabilidade pré-determinada efetua algum tipo de alteração em sua estrutura. Este operador se faz necessário para a manutenção da diversidade genética da população, alterando arbitrariamente um ou mais elementos de uma estrutura escolhida, fornecendo meios para introdução de novos elementos na população. É considerado um operador muito importante uma vez que bem escolhido, seu modo de atuar garante que diversas alternativas sejam exploradas, mantendo assim um nível mínimo de abrangência na busca. Assegura também que a probabilidade de chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca será zero, além de contornar o problema de mínimos locais, pois este mecanismo altera levemente a direção de busca.
- Atualização: são inseridos na população os indivíduos criados nesta geração.
- Finalização: Não envolve o uso de nenhum operador genético. Nesta etapa é verificado se foram atingidas as condições de encerramento da evolução. Caso a avaliação seja negativa retorna-se para a etapa de avaliação, caso a avaliação seja positiva, encerra-se a execução.

O fluxograma apresentado na Figura 12, mostra de maneira geral o processo de funcionamento de um AG.

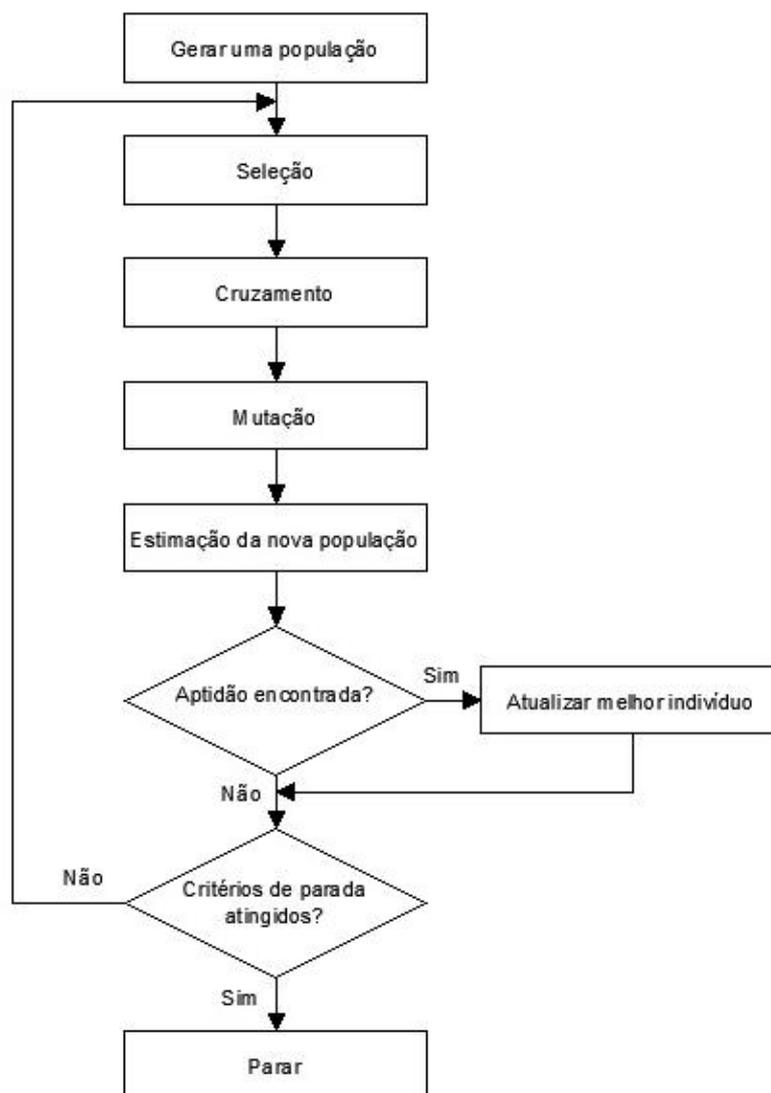


Figura 12 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo genético.
Fonte: Autoria Própria

3.4 PRINCIPAIS VANTAGENS DO AG

O AG é um método robusto, que apresenta bons resultados em buscas complexas. Sua aplicação não se delimita a problemas em que são impostas condições referentes a função objetivo ou quanto ao espaço de busca.

Segundo Neis (2006), para construir uma aplicação com AG, não é necessário um profundo conhecimento matemático a respeito do problema. É necessário apenas conhecimento para classificar as soluções candidatas em relação a uma função objetivo, ou uma solução candidata em relação à outra.

3.5 PRINCIPAIS DESVANTAGENS DO AG

Considerando a natureza probabilística do AG, há uma tendência de se encontrar soluções ótimas para um determinado problema. Porém, considerando esta mesma natureza, não há garantia de que a obtenção da solução seja a melhor. Apenas pelo nível de adequabilidade é diferenciada a população que representa um conjunto de possíveis resultados, uma vez que não existe o conceito de solução ótima, e é fundamentado em número de iterações, tempo decorrido ou estagnação da evolução.

A literatura referente ao AG possui pouco embasamento teórico, embora seja de grande amplitude. Os resultados estabelecidos são em grande parte obtidos empiricamente e, as teorias que tentam explicar matematicamente seu funcionamento são insatisfatórias (NEIS, 2006).

3.6 RELAÇÃO ENTRE OS ALGORITMOS GENÉTICOS E LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

O desenvolvimento de uma rotina utilizando algoritmos genéticos é o objetivo deste trabalho para que, por meio da alocação de IFs nas redes de distribuição, sejam reduzidos o tempo de reparo do sistema e o custo da interrupção do fornecimento de energia.

Podemos caracterizar o problema de alocação de IF como de natureza combinatória, pois o algoritmo desenvolvido é capaz de encontrar uma configuração eficiente para a instalação dos indicadores de falta, uma vez que esta metodologia proposta apresenta eficiência para a solução deste tipo de problema.

Nesse sentido, o próximo capítulo trata da aplicação do AG para a alocação de IFs em uma rede simples de distribuição.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo será descrito resumidamente a modelagem do problema para a otimização da alocação dos IFs, de maneira a minimizar a distância percorrida pela equipe de manutenção para localizar a falta.

A rede adotada em nosso estudo é uma adaptação do sistema de distribuição da Bahia disponibilizado no livro Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição/Centrais Elétricas Brasileiras - Eletrobrás.

A Figura 13 representa a rede utilizada para o desenvolvimento da solução de alocação de IFs proposto, segmentada em seções. Uma seção é definida como o trecho entre dois nós, sendo o nó o ponto de ligação entre dois ou mais elementos do circuito.

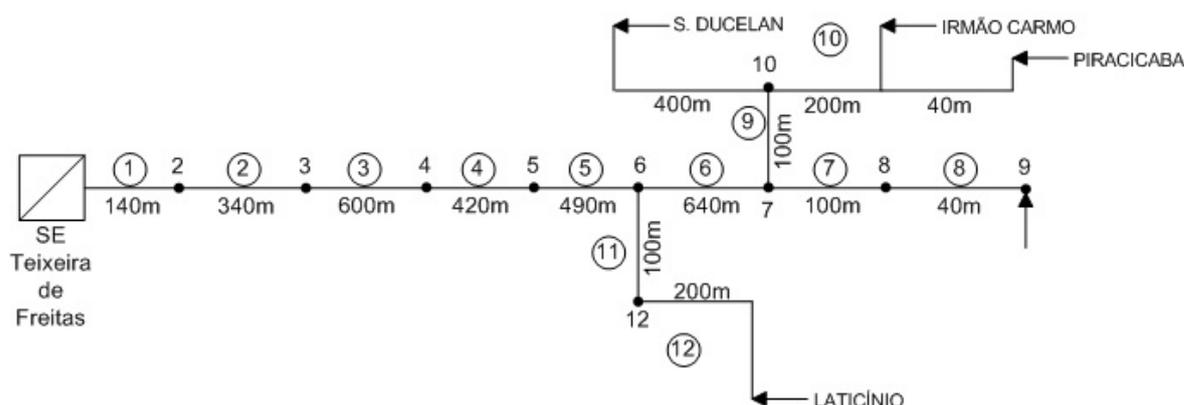


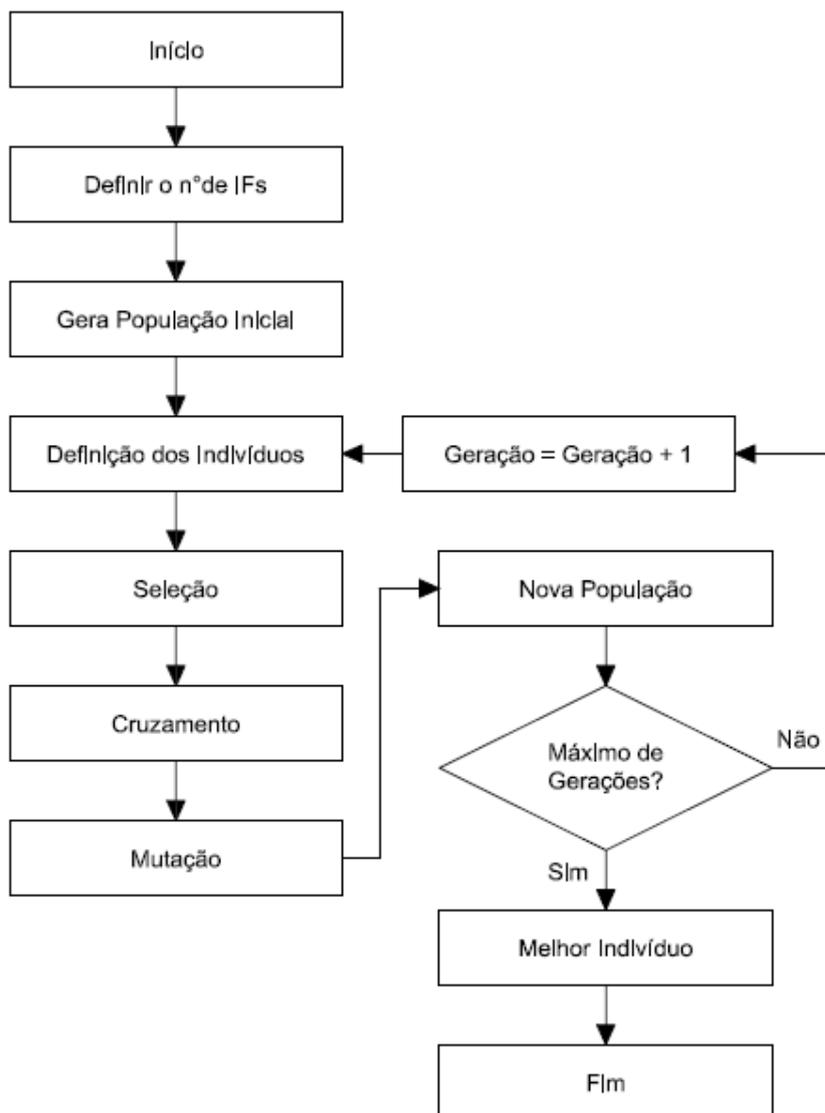
Figura 13 – Sistema de estudo utilizado (Adaptado).
 Fonte: ELETROBRÁS, 1982.

A partir deste ponto, foi iniciada a elaboração do algoritmo utilizando o *software* MATLAB®, através da técnica de otimização do Algoritmo Genético.

4.1 ESTRUTURA DO ALGORITMO

A partir do sistema subdividido em seções conforme mencionado, iniciou-se a interpretação do problema e aplicação do algoritmo genético para o caso em

estudo. Para facilitar o entendimento do problema, o fluxograma da Figura 14 foi elaborado e cada etapa será explicada detalhadamente ao longo deste capítulo.



**Figura 14 – Fluxograma de execução do AG implementado (Adaptado).
Fonte: USIDA, 2011.**

Sabendo-se a quantidade de IFs a ser instalada, uma população inicial é gerada com uma quantidade fixa de indivíduos. Estes passam por uma validação para garantir que satisfaçam as restrições do problema relacionadas a quantidade de IFs e posições das faltas.

A aptidão de cada indivíduo é avaliada por meio de uma função objetivo definida. A seguir, há uma etapa de seleção, utilizando o método da roleta, no qual os indivíduos são escolhidos para o processo de cruzamento e, posteriormente, sofrem mutação.

Estes novos indivíduos, mutados, constituem uma nova população correspondente a próxima geração. Assim, o processo é reiniciado desde a etapa da definição dos indivíduos. Atingido o critério de parada, o indivíduo com maior aptidão representa a solução referente à melhor configuração de instalação de IFs.

4.1.1 Geração da População Inicial

O algoritmo é iniciado a partir de uma população gerada randomicamente em que cada indivíduo possui 12 genes binários (bit 0 ou bit 1), um para cada seção da rede. Gene 1 representa a instalação do IF na seção correspondente e 0 a não instalação do dispositivo.

Como a rede de distribuição foi dividida em 12 seções, temos 12 posições possíveis para alocar os dispositivos IFs. Assim, a população inicial é submetida à técnica de otimização com o desenvolvimento do algoritmo. A Figura 15 apresenta um exemplo de indivíduo.

	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Seção	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nós	1	2	3	4	5	6	7	8	7	10	6	12
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Figura 15 – Exemplo de indivíduo para o algoritmo.
Fonte: Autoria Própria.

Como tem-se o bit 1 nas seções 2 e 7 do indivíduo, isso significa que teremos o IF instalado entre os nós 2 e 3 (seção 2) e entre os nós 7 e 8 (seção 7), conforme a definição no sistema demonstrado na Figura 13.

4.1.2 Definição dos Indivíduos

A partir da população inicial gerada é realizada a definição dos indivíduos para garantir que cada um tenha apenas dois genes 1, o que significa dizer dois equipamentos a serem instalados.

Outra restrição considerada é o posicionamento da instalação do IF, sendo que este não deve ocorrer na mesma seção da falta que o sistema está submetido. Essa limitação foi imposta, pois, ao incluir o IF na seção em falta, o algoritmo não seria capaz de distinguir se o IF está antes ou depois da falta, ou seja, não teria o conhecimento se o equipamento iria acionar ou não.

A cada geração, as duas definições são realizadas: posicionamento dos IFs não coincidentes com a falta e a permanência de dois IFs para instalação. Caso haja algum indivíduo com essas características indesejadas, o algoritmo o descarta, diminuindo o tamanho da população. Recupera-se o tamanho original duplicando os indivíduos que não violaram as restrições, ditos como factíveis.

Caso em uma geração não haja nenhum indivíduo factível, toda a geração é descartada e o programa deve ser reiniciado.

4.1.3 Função Objetivo

Determinar a função objetivo é uma etapa importante para a elaboração do algoritmo. Esta função atribui, para cada indivíduo da população, um valor de distância a ser percorrida pela equipe de manutenção. Isto torna possível a comparação entre as soluções correspondentes a cada indivíduo.

Como estratégia para quantificar a distância a ser percorrida pela equipe de manutenção, define-se a ocorrência de quatro faltas diferentes nas posições mostradas na Figura 16, as quais ocorrem uma por vez.

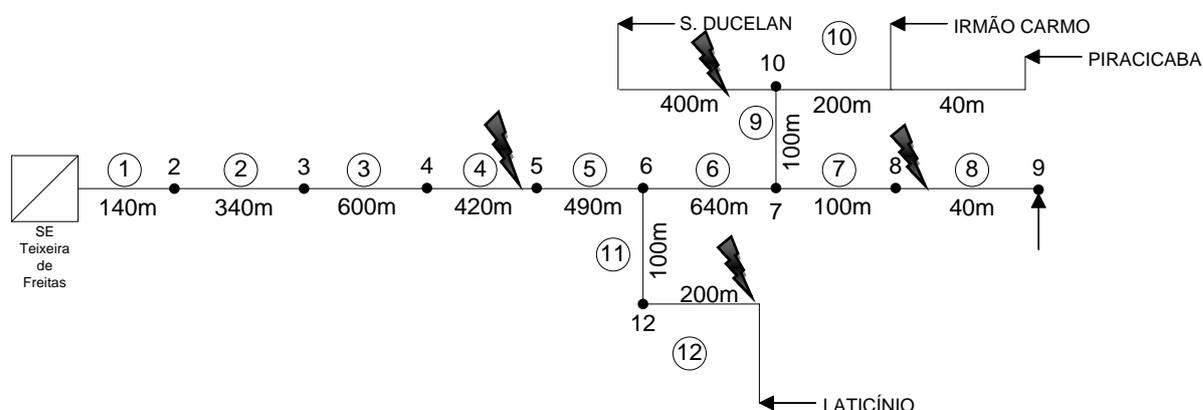


Figura 16 – Ocorrência das faltas no sistema.
Fonte: Autoria Própria.

Para ser determinada a distância a ser percorrida, são considerados três casos:

- Nenhum IF é acionado;
- Apenas um IF é acionado;
- Os dois IFs são acionados.

Para cada um dos quatro casos de faltas supostas no sistema, foram analisados os comportamentos dos IFs analisando as posições possíveis de instalação destes dispositivos. Tais análises estão descritas a seguir.

Para o caso de nenhum IF ser acionado, apenas a seção entre a subestação e o primeiro IF deve ser analisada.

Quando apenas um indicador acende, a distância a ser analisada limita-se entre o IF acionado e o IF não acionado, diminuindo o tempo gasto de reparo, sabendo que a falta ocorreu entre a instalação dos dois IFs.

Quando os dois IFs são acionados, a equipe de manutenção precisa percorrer apenas o trecho a partir do segundo IF acionado até o fim da rede.

Para o caso em que não há a instalação de indicadores de falta, toda a rede deve ser analisada, ou seja, o tempo de reparo da rede é máximo, pois tem-se máxima distância a ser percorrida pela equipe de manutenção.

Os trechos a serem percorridos são obtidos a partir de uma matriz de distâncias, quadrada e de ordem 13, em que cada elemento a_{ij} da matriz refere-se a distância entre o nó i e nó j da rede de distribuição.

O cálculo do deslocamento da equipe de manutenção foi obtido a partir do somatório das possíveis distâncias para cada falta ocorrida. A partir do valor total do deslocamento da equipe foi calculada a média aritmética da seguinte maneira:

$$MD = \frac{\sum DTn}{n} \quad (1)$$

em que MD indica a distância média a ser analisada, DTn a distância total percorrida em cada situação de falta analisada e n o número de faltas.

Como o valor médio da distância é apresentado em metros, este valor foi convertido para quilômetros dividindo por 1000 e através de uma regra de três simples, considerando o deslocamento a 60km/h, o tempo médio de deslocamento foi obtido em minutos.

4.1.4 Seleção

Existem três métodos de seleção para oferecer as soluções candidatas mais adaptadas: Método da Roleta, Método do Torneio e Método da Amostragem Universal Estocástica.

- Método do Torneio: esse método consiste em selecionar uma série de indivíduos da população e fazer com que eles entrem em competição direta. O indivíduo com maior aptidão dentre estes n indivíduos é selecionado para a população intermediária. O processo se repete até que a população intermediária seja preenchida e o algoritmo seja finalizado (LINDEN, 2008).
- Método da Amostragem Universal Estocástica: esse método é uma variação do método da roleta. Consiste em de uma única vez, espaçar n agulhas utilizadas igualmente. O n depende do número de indivíduos a serem selecionados para a próxima geração, uma vez que ao invés de girar n vezes a roleta, gira-se apenas uma vez exibindo menos variância que as repetidas chamadas do método da roleta (USIDA, 2009).

Em nosso trabalho utilizamos o método da Roleta por ser o mais simples e mais utilizado método de seleção em trabalhos envolvendo o AG.

A aptidão mede quão boa pode ser aquela solução candidata para o problema. Quanto maior o valor da aptidão, mais apto é o indivíduo e maior sua chance de sobrevivência, de forma que boas soluções tendem a permanecer a cada geração.

O cálculo da aptidão se dá da seguinte forma: a cada indivíduo atribui-se um valor calculado pela função objetivo. Quanto menor este valor, maior é a aptidão do atribuída ao indivíduo.

Para a utilização do Método da Roleta, o valor de aptidão deve ser positivo e menor que 1 e a soma de todos estes valores igual a 1. Assim, para cada indivíduo é calculada a aptidão relativa, que é obtida dividindo o valor de sua aptidão pela soma dos valores de aptidão de todos os indivíduos da população. Deste modo, os indivíduos de uma população são selecionados para o cruzamento utilizando uma

roleta, semelhante à utilizada em jogo de cassino. Essa etapa consiste em atribuir a cada indivíduo da população uma porção da roleta, proporcional ao seu índice de aptidão.

Para a seleção dos indivíduos, a roleta é girada um determinado número de vezes, definido pelo tamanho da população. A cada giro da roleta, um indivíduo é selecionado para participar da próxima etapa do algoritmo.

Assim, os indivíduos com maiores aptidões ocupam fatias maiores da roleta e os indivíduos com menor aptidão recebem fatias menores.

O gráfico representado na Figura 17 exemplifica uma roleta a partir de valores de aptidão dos indivíduos de uma população.

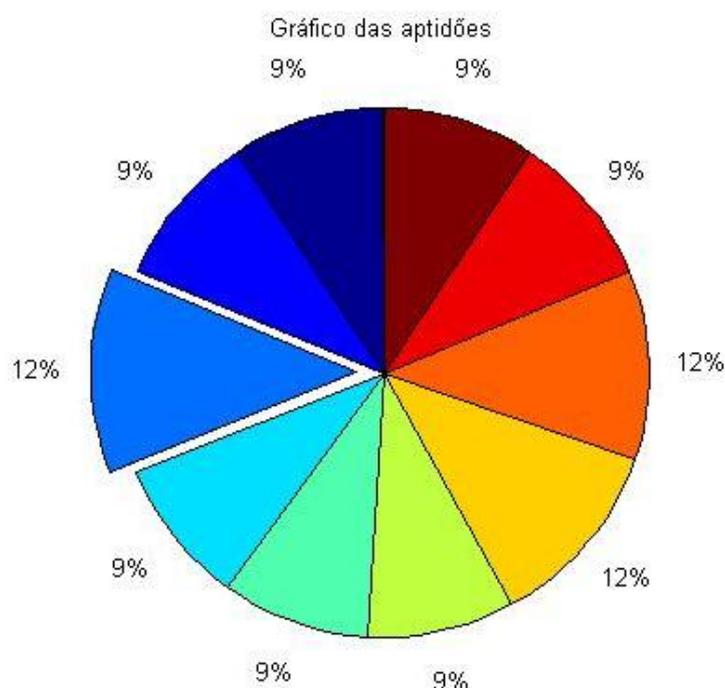


Figura 17 – Gráfico das aptidões utilizando o método da roleta.
Fonte: Autoria Própria.

Para gerar este gráfico, foi utilizada uma população de 10 indivíduos. Ele apresenta a porcentagem relacionada a aptidão de cada indivíduo, em que o de maior aptidão recebe uma fatia maior da roleta. É possível perceber que alguns indivíduos tiveram o mesmo valor de porcentagem devido ao arredondamento.

4.1.5 Operadores Genéticos

Um conjunto de operadores é necessário para que, dada uma população, seja possível gerar populações com melhor aptidão. Estes operadores são: cruzamento (*crossover*) e mutação. Eles são utilizados para gerar novos indivíduos, mas que possuam características dos indivíduos anteriores.

4.1.5.1 Cruzamento

Na etapa do cruzamento, dois indivíduos são recombinados. Neste trabalho, foi aplicado o cruzamento de um ponto que consiste em dividir os indivíduos em duas partes. A partir desta divisão, a primeira parte do cromossomo 1 é combinada com a segunda parte do cromossomo 2, enquanto a segunda parte do cromossomo 1 é combinada com a primeira parte do cromossomo 2, gerando dois novos indivíduos. Estes compõem a nova geração, descartando os cromossomos originais.

Na Figura 18 é apresentado um exemplo de cruzamento de dois cromossomos divididos ao meio (marcação em vermelho).

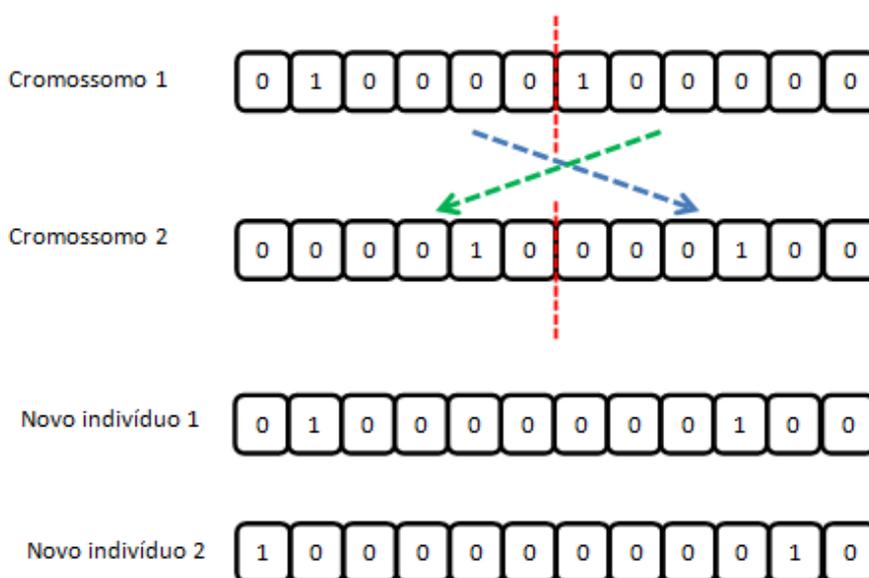


Figura 18 – Exemplo de cruzamento em um ponto.
Fonte: Autoria Própria.

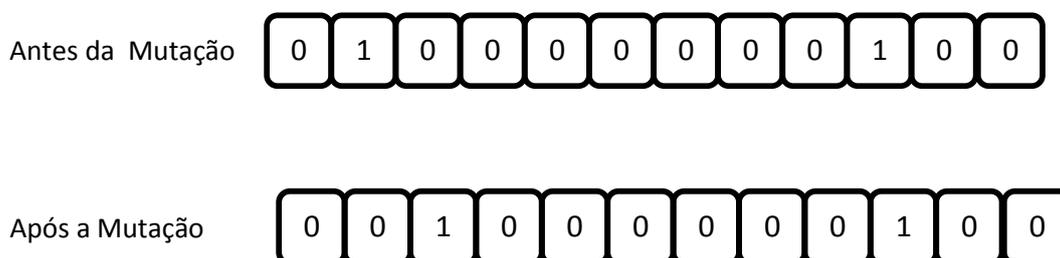
O algoritmo desenvolvido permite a escolha da quantidade de indivíduos da população a sofrer cruzamento. Isto possibilita que a nova geração seja composta com indivíduos da antiga geração e os gerados no cruzamento.

4.1.5.2 Mutação

O operador da mutação garante que a probabilidade de chegar a qualquer ponto do espaço de busca não seja zero, pois este mecanismo altera levemente a direção da busca. Os indivíduos sofrem mutação de acordo com uma taxa de mutação previamente definida, cujo valor é bem pequeno.

Essa taxa de mutação corresponde a uma taxa percentual que indica a chance de cada bit de um indivíduo ser alterado.

A seguir, na Figura 19, é apresentado um exemplo de mutação para representação binária dos indivíduos. Neste exemplo, dois bits são alterados, criando-se um novo indivíduo.



**Figura 19 – Exemplo de mutação com representação binária.
Fonte: Autoria Própria.**

O indivíduo gerado após a mutação é analisado para continuar atendendo as restrições do problema, ou seja, a quantidade de dois bits 1 e não coincidir com a seção em falta.

Caso este cromossomo não atenda as restrições, este poderia ter seus bits alterados para satisfazer a condição, porém, desta maneira, a solução estaria sendo influenciada diretamente pela manipulação do indivíduo após a mutação. A etapa de Definição dos Indivíduos evita essa manipulação descartando os indivíduos infactíveis.

4.1.6 Parâmetros Genéticos

Os parâmetros genéticos são definidos especificamente para determinada população. O desempenho do AG é influenciado pela definição destes parâmetros. Os valores são definidos de acordo com as necessidades dos problemas e por simulações realizadas como testes. Os parâmetros considerados neste trabalho estão detalhados a seguir.

4.1.6.1 Tamanho da População

O tamanho da população influencia no desempenho e eficiência do algoritmo genético, representando o campo de busca do problema. Com uma população pequena, há um desempenho menor, uma vez que o espaço de busca é menor.

Já com uma população grande, previne-se convergências prematuras para soluções locais ao invés de globais e a porção do espaço de busca é maior. Porém, são necessários mais recursos computacionais e um período de tempo maior para o processamento do algoritmo.

4.1.6.2 Taxa de não cruzamento

A taxa de não cruzamento varia de 0 a 1, o que indica que quanto mais próximo de 1, menos indivíduos sofrem cruzamento (*crossover*).

Neste trabalho, apresentam-se as seguintes situações:

- taxa de não cruzamento unitária: nenhum indivíduo da população sofre cruzamento;
- taxa de não cruzamento nula: todos os indivíduos da população sofrem cruzamentos entre si;

- taxa de não cruzamento igual a 0,2: 20% dos indivíduos da população não sofrem o processo de cruzamento. Assim, 80% dos indivíduos são modificados após o *crossover*;
- taxa de não cruzamento igual a 0,5: 50% dos indivíduos da população não sofrem o processo de cruzamento. As variações da população são menores se comparadas a uma taxa de não cruzamento de 0,2, pois menos indivíduos novos serão gerados na população.

4.1.6.3 Taxa de Mutação

A taxa de mutação indica a chance do gene ser mutado, gerando um novo indivíduo. Quando se tem uma taxa de mutação pequena, previne-se que a busca fique parada em sub-regiões do espaço de busca. Além disso, garante-se a possibilidade que qualquer ponto desse espaço seja atingido. Já no caso em que a taxa de mutação é muito alta, a busca torna-se essencialmente aleatória, sendo indesejado. As seguintes situações foram analisadas:

- taxa de mutação nula: nenhum indivíduo da população tem chance de participar do processo de mutação;
- taxa de mutação igual a 0,02: cada gene do indivíduo possui 2% de chance de ser mutado, gerando um novo indivíduo na população;
- taxa de mutação igual a 0,1: alta probabilidade do gene ser mutado (10% de chance), o que acarreta em uma variação grande da população a cada geração, aumentando o campo de busca pela solução ótima, mas diminuindo a permanência de boas soluções ao longo das gerações.

4.1.6.4 Critério de parada

Para encerrar a execução de um algoritmo genético, diferentes critérios podem ser adotados. Um critério de parada pode ser definido após uma certa quantidade de gerações, quando as aptidões dos indivíduos de uma população se

tornam muito parecida ou quando se tem conhecimento da resposta máxima da função objetivo. Em nosso trabalho, utilizamos como critério de parada o número de gerações, a qual foi definida após diversas simulações efetuadas, notando-se que a aptidão não apresentava mais variações consideráveis.

4.1.7 Solução (Melhor Indivíduo)

Após atingir o número máximo de gerações, o algoritmo avalia os indivíduos da população final e escolhe o mais apto como a solução do problema.

Por se tratar de um algoritmo fundamentado em uma metaheurística, recomenda-se realizar diversas simulações para que seja analisada a convergência dos resultados para a melhor solução.

5 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados das simulações realizadas. As situações para análise foram realizadas alterando os parâmetros genéticos de cruzamento e mutação.

O tamanho do cromossomo, quantidade de IFs e posição das faltas foram mantidos para todas as situações. A quantidade de IFs equivale a duas unidades e a posição das faltas é representada por [4, 8, 10, 12], o que remete-se a ocorrência de falta permanente na seção 4 (nós 4 e 5), 8 (nós 8 e 9), 10 (nós 10 e 11) e 12 (nós 12 e 13), uma por vez.

As simulações foram realizadas alterando o tamanho da população, número de gerações, assim como taxa de não cruzamento e de mutação para a análise da influência destes parâmetros na solução do problema.

Para os estudos de casos realizados, os parâmetros constantes estão representados na Tabela 01:

Tamanho do Cromossomo	12
Quantidade de IF	2
Posição das faltas	[4, 8, 10, 12]

Tabela 01 – Definição de parâmetros.
Fonte: Autoria Própria.

5.1 CASO 1 - SEM OPERADORES GENÉTICOS

Neste primeiro caso, não são considerados os operadores genéticos de cruzamento e mutação, conforme a Tabela 02.

Tamanho da População	50
Taxa de Mutação	0
Taxa de não cruzamento	1
Número de Gerações	50

Tabela 02 – Caso 1: Sem operadores genéticos.
Fonte: Autoria Própria.

Para esta situação, com 50 gerações e o tamanho da população de 50 indivíduos, taxa de mutação nula e taxa de não cruzamento unitária (nenhum indivíduo sofre cruzamento), a média das distâncias de todas as soluções apresentam melhora ao decorrer das gerações, apesar das pequenas oscilações. A população se homogeneiza ao longo do processo do algoritmo devido ser composta pelo mesmo indivíduo, até o critério de parada ser atingido, após 50 gerações completas. Uma vez que apenas o método da roleta é utilizado, novos indivíduos nunca são gerados. A evolução da média das distâncias está representada na Figura 20.

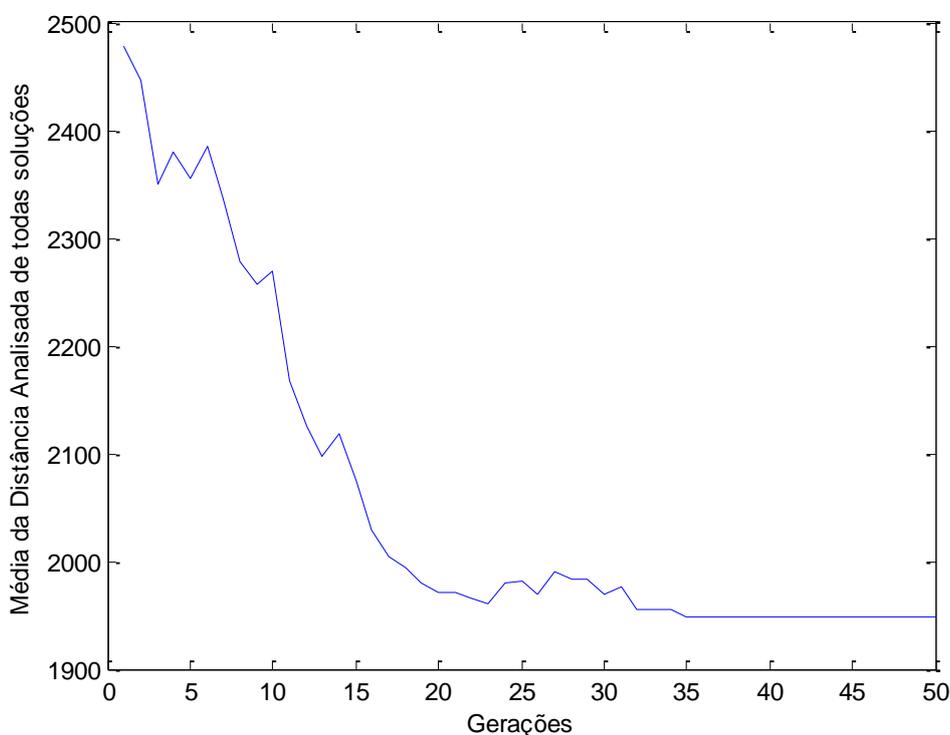


Figura 20 – Distância média via MATLAB para o caso 1.
Fonte: Autoria Própria.

A solução proposta pelo algoritmo convergiu para alocação dos IFs nas seções 5 e 9, o que significa que um IF deve ser instalado entre os nós 5 e 6, enquanto o outro deve ser instalado entre os nós 7 e 10.

A média da distância a ser inspecionada pela equipe de manutenção é de 1947,5 metros.

O tempo de deslocamento da equipe de manutenção até encontrar a seção em falta para o reparo e restabelecimento do fornecimento de energia corresponde a 1,9475 minutos considerando o deslocamento a 60km/h. Esse tempo corresponde a

uma diminuição de 1,8625 minutos em relação a inspeção de toda rede a fim do reparo e restabelecimento de energia.

Na Figura 21, é apresentado o gráfico com a evolução da distância da melhor solução para o problema. Como pode-se analisar, desde as primeiras gerações a população contém a melhor solução fazendo com que permaneça ao passar das gerações. Esta não é a melhor solução para o problema, visto que apenas 10% das simulações indicaram a alocação dos IFs nas seções 5 e 9. Uma vez que não existe a influência dos operadores genéticos, o algoritmo não consegue chegar à solução ótima de alocação dos IFs.

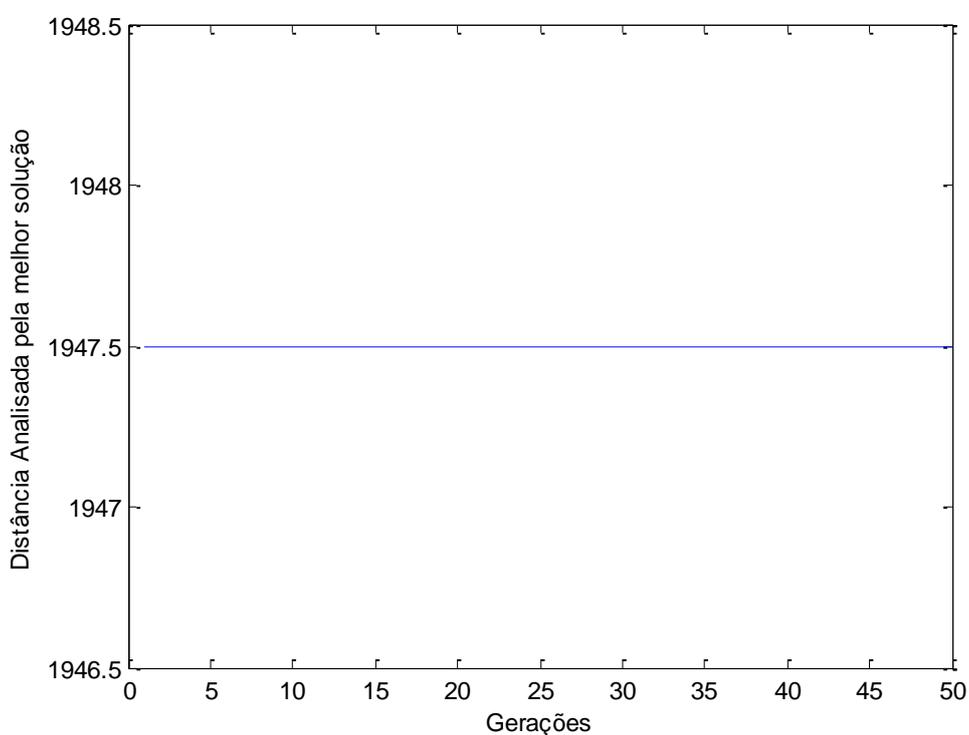


Figura 21 – Distância da melhor solução via MATLAB para o caso 1.
Fonte: Autoria Própria.

5.2 CASO 2 - SEM CROSSOVER E COM MUTAÇÃO

Para ambas as situações seguintes, a taxa de não cruzamento foi mantida unitária para verificar-se a influência da taxa de mutação, considerando um valor muito baixo e em outra situação com o valor elevado.

5.2.1 Baixa Taxa de Mutação

Mantendo o tamanho da população, a quantidade de gerações e a taxa de não cruzamento unitária indicando que não há cruzamento, a taxa de mutação passou a ser de 0,02 conforme Tabela 03:

Tamanho da População	50
Taxa de Mutação	0,02
Taxa de não cruzamento	1
Número de Gerações	50

**Tabela 03 – Caso 2: Sem crossover e baixa taxa de mutação.
Fonte: Autoria Própria.**

A taxa de mutação aplicada de 0,02 significa que cada gene do indivíduo possui 2% de chance de ter seu bit alterado. Assim, todos os genes possuem a mesma probabilidade de serem alterados para 0, se este for 1, ou para 1 se este for 0 antes da mutação.

Com esta situação, a melhor solução proposta foi a alocação dos IFs nas seções 3 e 6, considerando o histórico de soluções. Na Figura 22 observa-se a média das distâncias analisadas de todas as soluções. Percebe-se que a população não tende a se estabilizar devido a existência da taxa de mutação, fazendo com que a população seja alterada a cada geração.

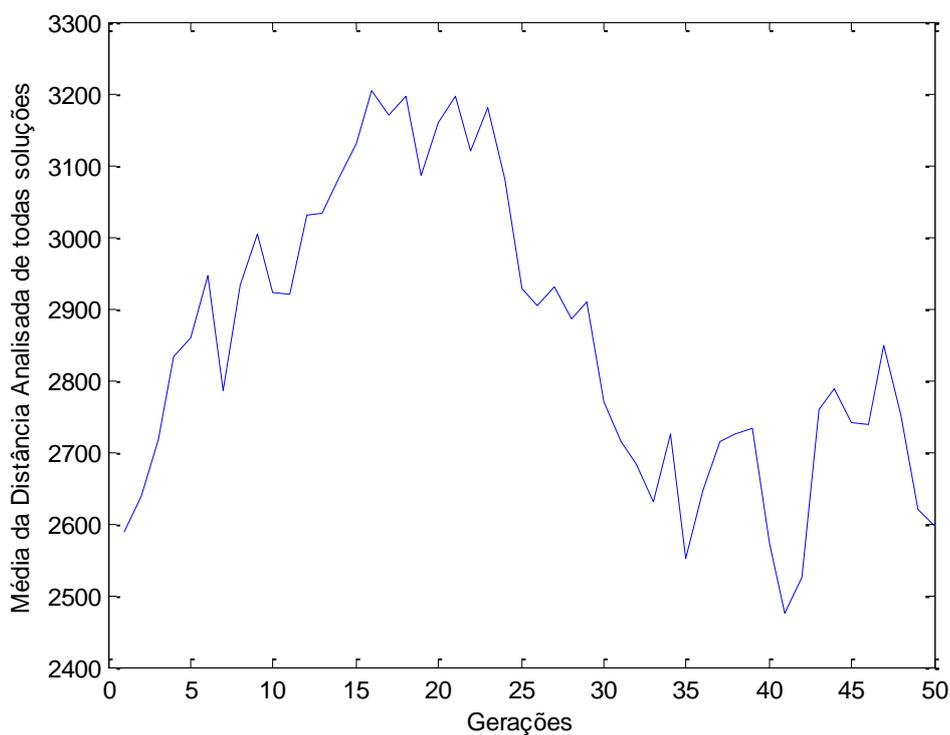


Figura 22 – Distância média via MATLAB para alteração da taxa de mutação.
Fonte: Autoria Própria.

Com o aumento da taxa de mutação de 0 para 0,02, o algoritmo inicia com a melhor solução, porém passa por outras soluções até o critério de parada ser atingido conforme a Figura 23.

Mesmo a taxa de mutação utilizada sendo pequena, nota-se a sua influência nas populações no processamento do algoritmo sem grandes impactos, uma vez que é encontrada a melhor solução no início das gerações. Esta não se mantém até a última geração, visto que os indivíduos sofrem mutação e sem cruzamento, apresenta uma solução não satisfatória a partir da quinta geração.

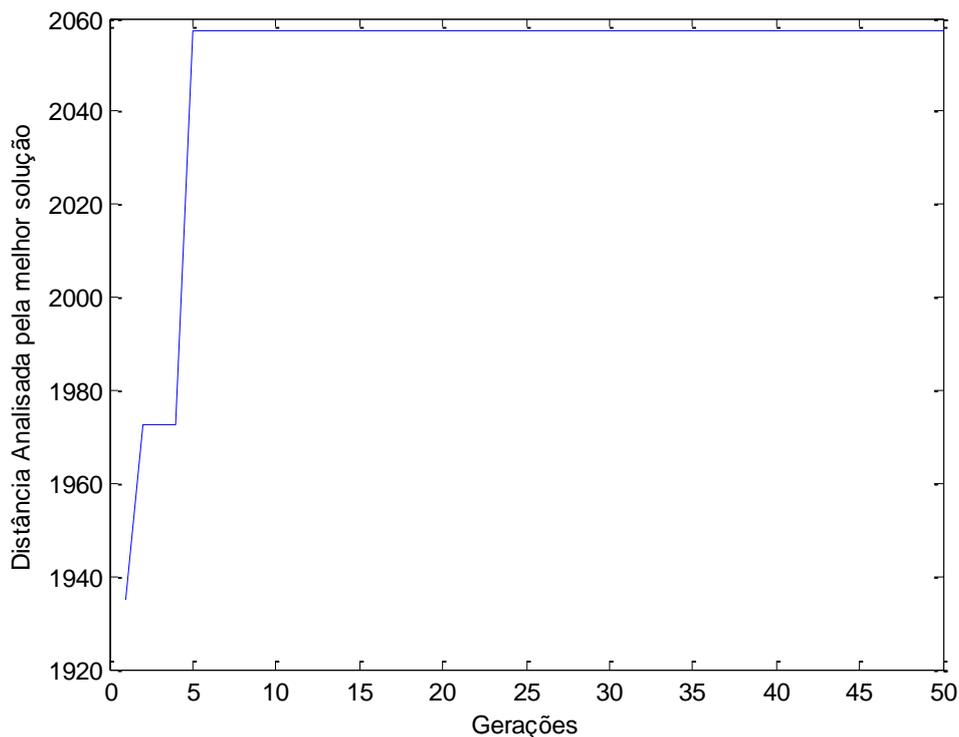


Figura 23 – Distância da melhor solução via MATLAB para o caso 2.
Fonte: Autoria Própria.

5.2.2 Elevada Taxa de Mutação

Para a próxima situação, a taxa de mutação foi elevada para 0,1, conforme Tabela 04 e os demais parâmetros foram mantidos.

Tamanho da População	50
Taxa de Mutação	0,1
Taxa de não cruzamento	1
Número de Gerações	50

Tabela 04 – Caso 2: Sem *crossover* e elevada taxa de mutação.
Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 24, o gráfico da média das distâncias de todas as soluções apresenta grande variação, já que há 10% de chances de cada gene ser alterado. Assim a cada geração há novos indivíduos com menos características dos indivíduos anteriores, tendendo a busca se ampliar cada vez mais.

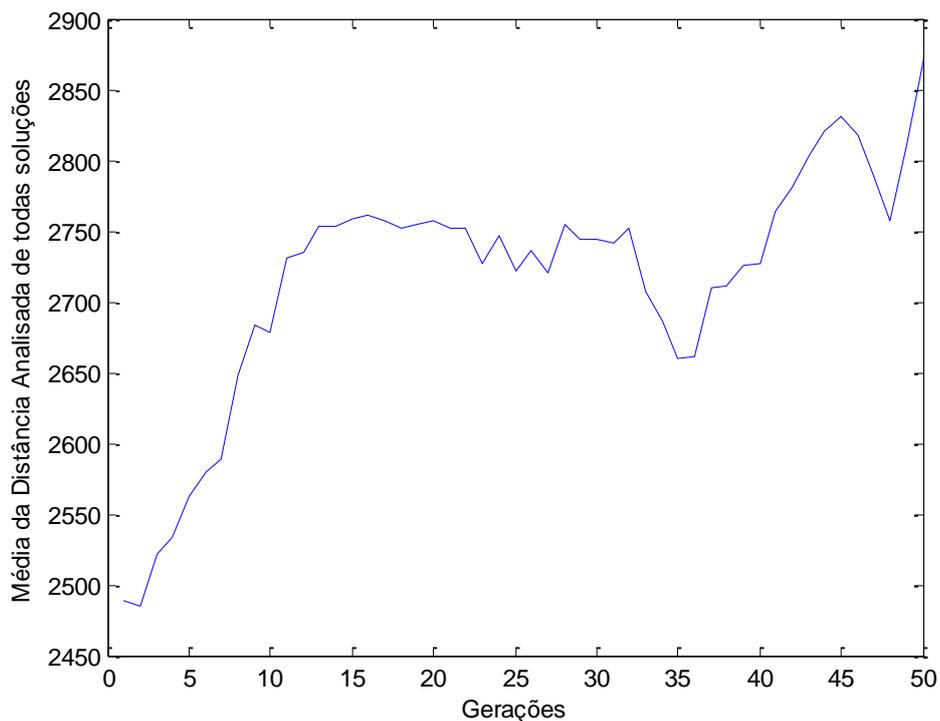


Figura 24 – Distância média via MATLAB para aumento da taxa de mutação.
Fonte: Autoria Própria.

Nesta situação, nota-se que a melhor solução para a alocação dos IFs permaneceu nas seções 3 e 6, considerando o histórico de soluções, com a distância a ser analisada pela equipe de manutenção em 1935 metros e o tempo em 1,935 minutos. Como a taxa de mutação é muito alta, grande parte da população sofre mutação, o que faz que com uma solução considerada boa seja alterada e perdida ao longo das gerações.

A Figura 25 apresenta a evolução da distância de melhor solução com a situação da taxa de mutação elevada. Durante as gerações o algoritmo passa pela solução ótima com a menor distância encontrada de 1935 metros (alocação dos IFs nas seções 3 e 6), porém o campo de busca se expande devido aos novos indivíduos mutados.

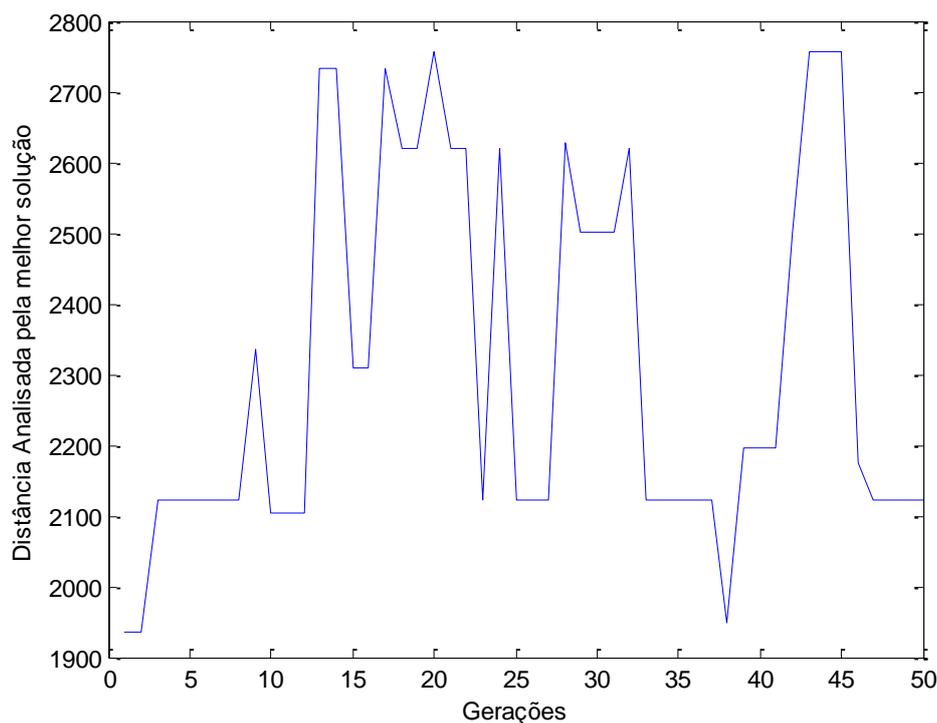


Figura 25 – Distância da melhor solução via MATLAB para aumento da taxa de mutação.
Fonte: Autoria Própria.

5.3 CASO 3 - TAXA DE MUTAÇÃO NULA

5.3.1 Taxa de não cruzamento nula

Neste caso, foram considerados os parâmetros da Tabela 05.

Esta análise difere-se da primeira situação do Caso 1, pois todos os indivíduos sofrem o processo de cruzamento.

Tamanho da População	50
Taxa de Mutação	0
Taxa de não cruzamento	0
Número de Gerações	50

Tabela 05– Caso 3: Taxa de mutação e não cruzamento nulas.
Fonte: Autoria Própria.

Os resultados obtidos sem mutações e com todos os indivíduos sofrendo cruzamento, indicam a alocação de IF nas seções 3 e 6, mantendo os resultados anteriores.

O gráfico das médias das distâncias está demonstrado na Figura 26. Nota-se que a população se mantém heterogênea uma vez que todos os indivíduos sofrem o cruzamento, fazendo com que haja o risco de a melhor solução ser descartada durante as etapas de cruzamento.

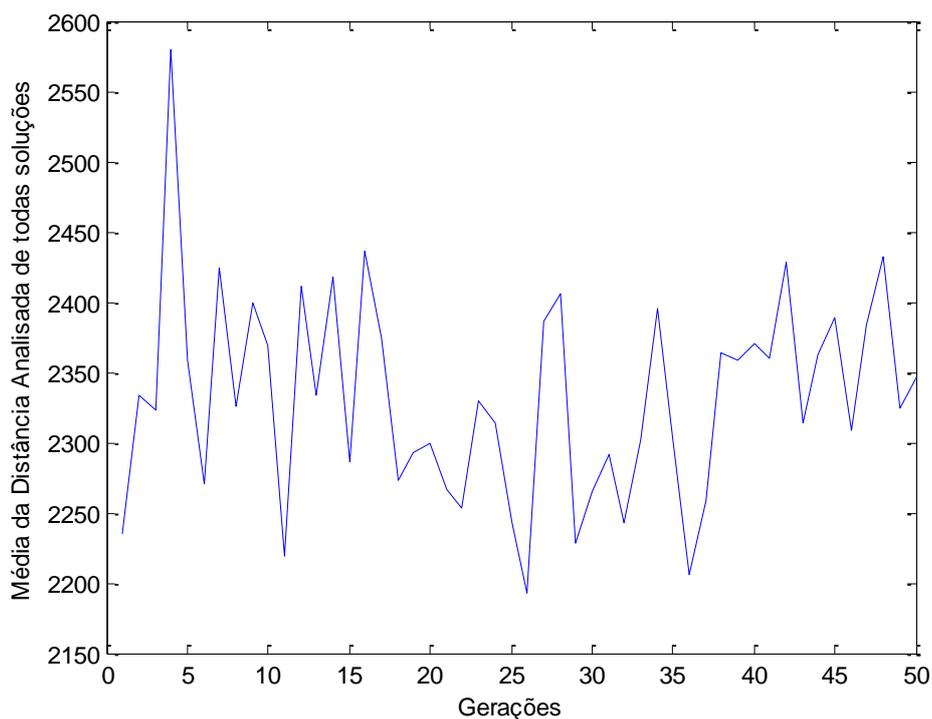


Figura 26 – Distância média via MATLAB para taxa de mutação nula.
Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 27, nota-se a grande influência do operador Cruzamento no desenvolvimento do algoritmo. Nas primeiras gerações a solução apresenta como 2020 metros a possível solução, porém encontra a ótima de 1945 metros, permanecendo nesta solução por quase todo o processo das gerações. Após 33 gerações, apresenta uma variação, mas retorna em torno da mínima distância encontrada.

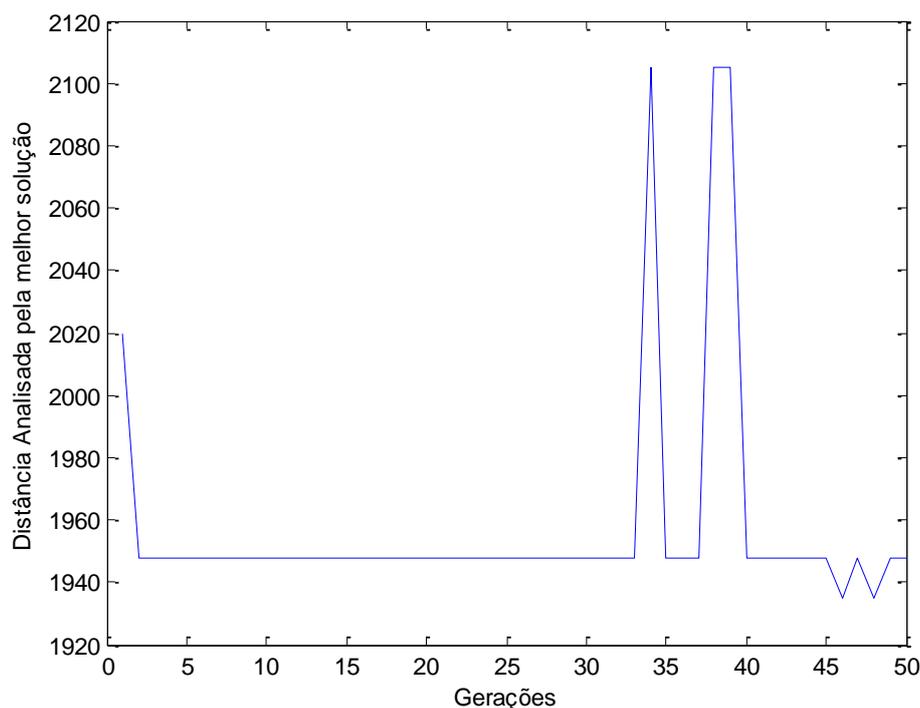


Figura 27 – Distância da melhor solução via MATLAB para taxa de mutação nula.
Fonte: Autoria Própria.

5.3.2 Baixa Taxa de não cruzamento

A nova análise foi realizada com os parâmetros da Tabela 06.

Tamanho da População	50
Taxa de Mutação	0
Taxa de não cruzamento	0,2
Número de Gerações	50

Tabela 06 – Caso 3: Baixa taxa de não cruzamento.
Fonte: Autoria Própria.

Nesta situação, a taxa de não cruzamento de 0,2 impacta em 20% da população não sofrer cruzamento, ou seja, 80% são cruzados gerando novos indivíduos. Conforme o esperado, o gráfico da distância média da Figura 28 apresenta grande variação da população devido aos cruzamentos durante as 50 gerações.

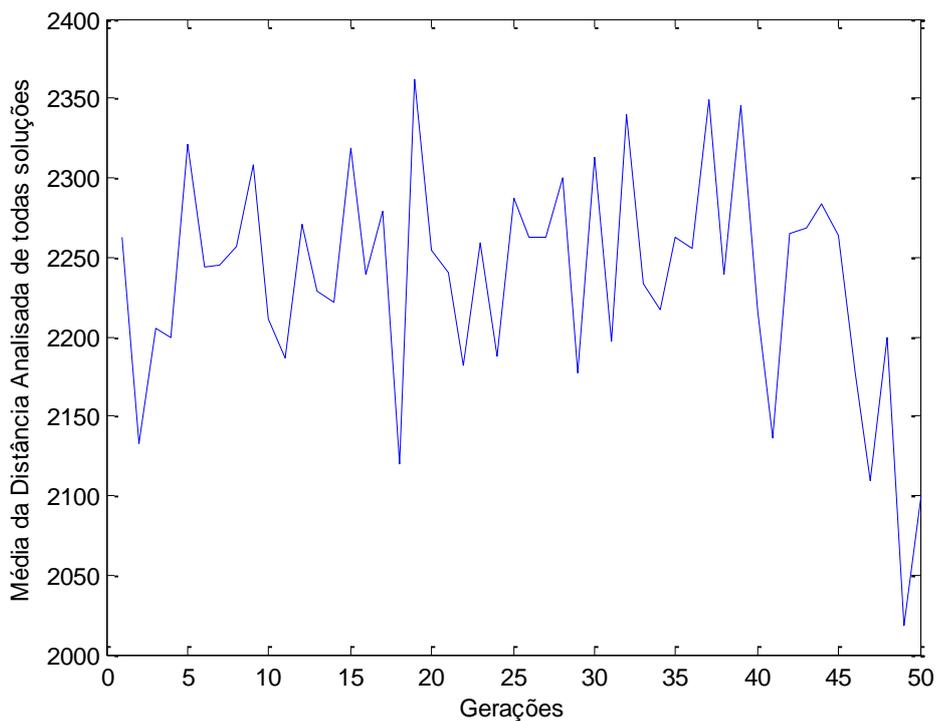


Figura 28 – Distância média via MATLAB para baixa taxa de não cruzamento.
Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 29, nota-se que o algoritmo apresenta a solução ótima da mínima distância encontrada nas primeiras e nas últimas gerações. Isto ocorre devido ao fato de indivíduos bons serem cruzados e conseguirem manter a solução em níveis satisfatórios.

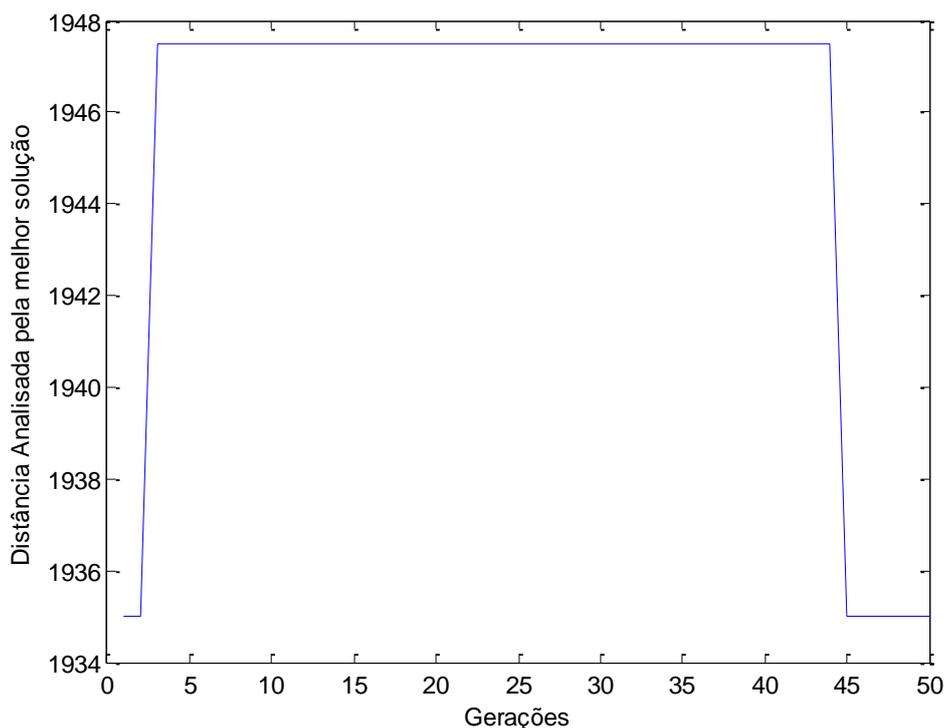


Figura 29 – Distância melhor solução via MATLAB para baixa taxa de não cruzamento.
Fonte: Autoria Própria.

5.3.3 Elevada Taxa de não cruzamento

Com o aumento da taxa de não cruzamento para 0,5, ou seja, 50% da população sofrem cruzamento, nota-se que houve uma melhora em relação à população, que tende a se estabilizar, mostrada na Figura 30.

A melhor solução mantém-se com a alocação dos IFs em 3 e 6, apresentando uma distância média a ser analisada de 1935 metros e o tempo médio em 1,935 minutos.

Na Figura 31, percebe-se que o algoritmo permanece na solução ótima durante toda a simulação, indicando que quanto mais indivíduos bons são cruzados, mais a população homogeneíza, mantendo a melhor solução. Ao se utilizar uma taxa de não cruzamento alta, grande parte da população se torna parecida, fazendo com que a melhor solução seja encontrada no início da simulação e permaneça até o critério de parada.

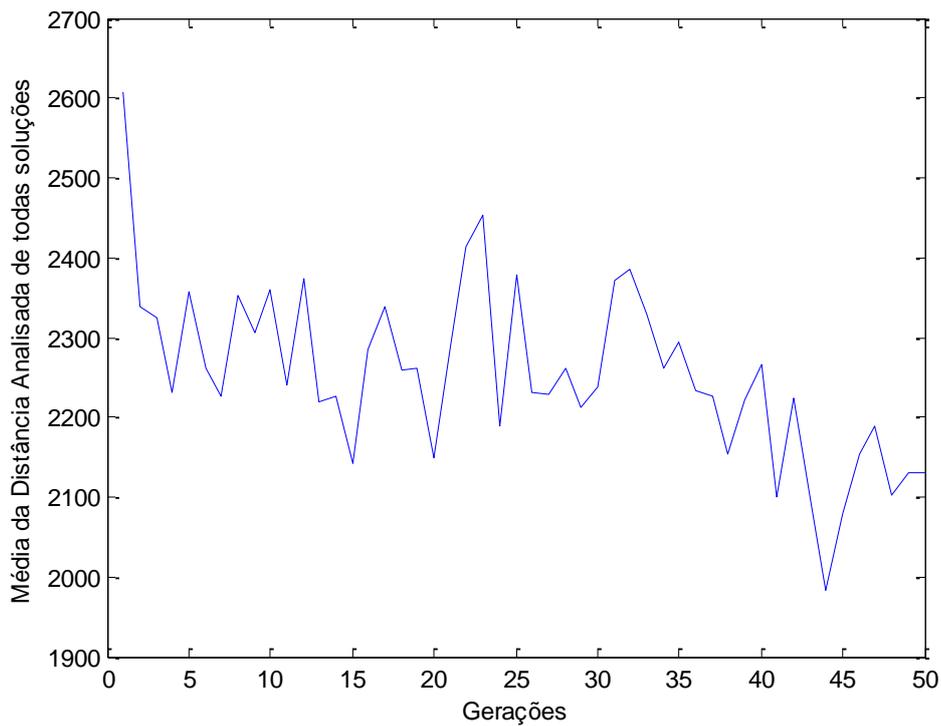


Figura 30 – Distância média via MATLAB para aumento da taxa de não cruzamento.
Fonte: Autoria Própria.

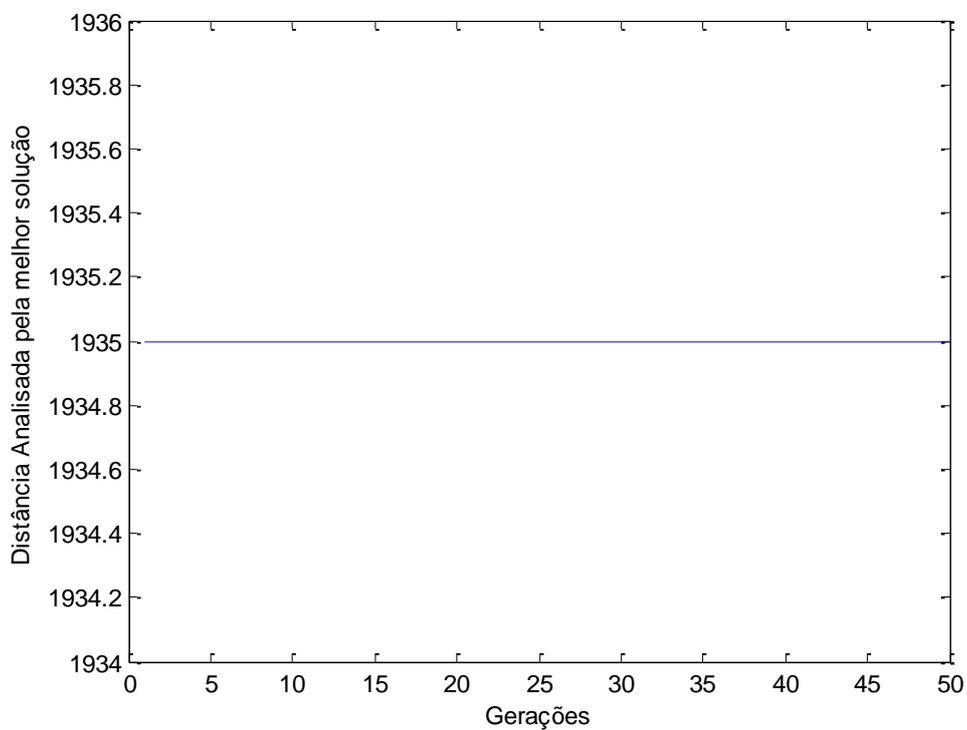


Figura 31 – Distância da melhor solução via MATLAB para elevada taxa de não cruzamento.
Fonte: Autoria Própria.

Percebe-se que quanto maior a taxa de indivíduos que participam da etapa de cruzamento, mais a população se torna homogênea e o algoritmo converge para a solução ótima, tendendo a se estabilizar nesta solução.

5.4 CASO 4 - COM CRUZAMENTO E MUTAÇÃO

A última análise foi realizada com os parâmetros da Tabela 07.

Tamanho da População	50
Taxa de Mutação	0,02
Taxa de não cruzamento	0,1
Número de Gerações	50

Tabela 07 – Caso 4: Com cruzamento e mutação.
Fonte: Autoria Própria.

Refinando-se as taxas de não cruzamento e de mutação, encontramos o valor de 0,02 para a taxa de mutação e de 0,1 para taxa de não cruzamento por apresentarem uma melhora significativa na população e na determinação da solução ótima. Com estes valores para os operadores genéticos, a população tende a se homogeneizar, conforme a Figura 32.

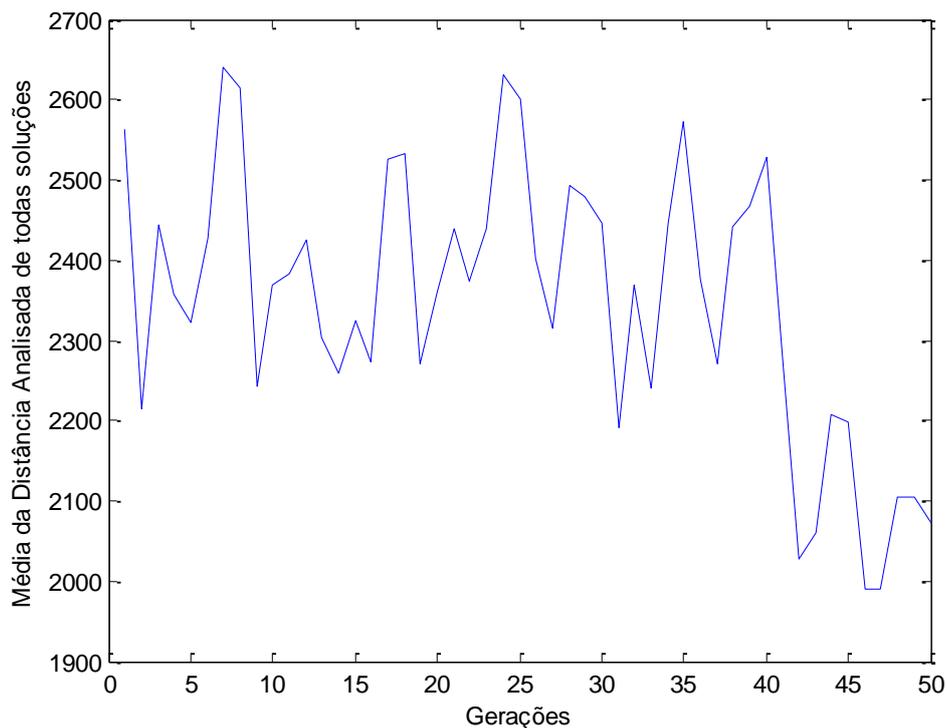


Figura 32 – Distância média via MATLAB para o caso 4.
Fonte: Autoria Própria.

Para o caso da melhor solução, o algoritmo iniciou com uma solução não satisfatória, permanecendo por 17 gerações nesta possível solução. Após isto, apresenta uma nova solução melhorando o cenário e atinge a melhor solução após 35 gerações com a alocação dos IFs nas seções 3 e 6, conforme a Figura 33.

A média da distância e o tempo médio de deslocamento da equipe de manutenção permanecem os mesmos, ou seja, 1935 metros e 1,935 minutos.

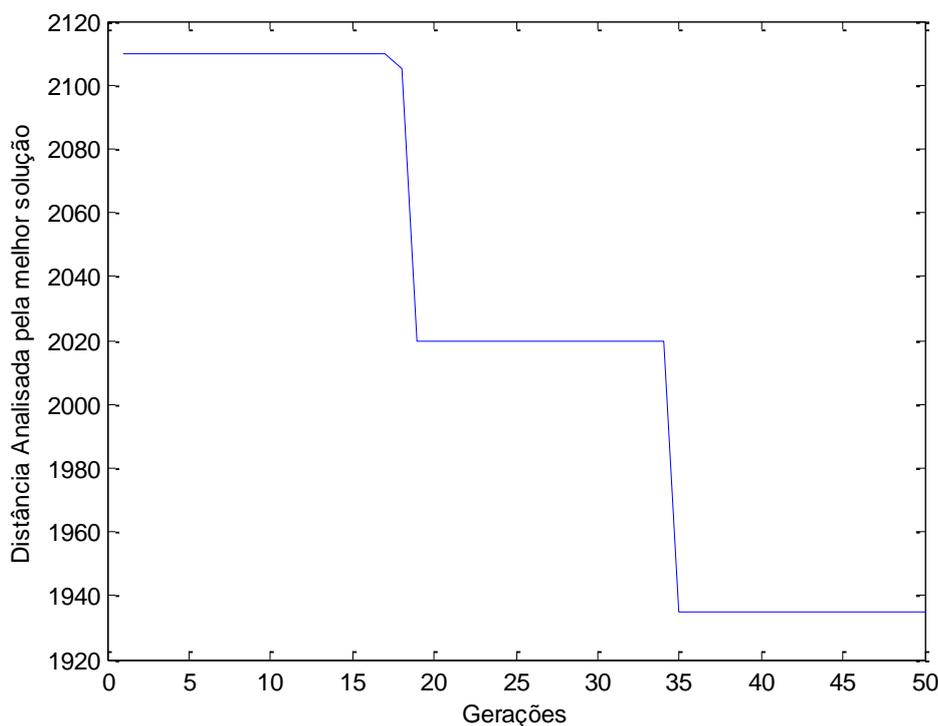


Figura 33 – Distância melhor solução via MATLAB para o caso 4.
Fonte: Autoria Própria.

Com a utilização dos operadores genéticos, o algoritmo converge para a melhor solução, determinando a alocação dos indicadores de falta nas seções 3 e 6, correspondendo a uma distância de 1935 metros em 1,935 minutos, ao ser considerado um veículo a 60 km/h. Enquanto os operadores de *crossover* e mutação não eram utilizados a segunda melhor solução foi proposta, com a alocação dos IFs nas seções 5 e 9 percorrendo uma distância mínima de 1947,5 metros em 1,9475 minutos. É possível perceber que mesmo a diferença entre as duas soluções sendo pequenas, as mesmas impactam na formação da população e na mínima distância a ser analisada pela equipe de manutenção.

Com a influência dos operadores genéticos, por mais que a solução ótima não seja encontrada no início da execução do algoritmo, a partir do processo de seleção, cruzamento e mutação, o algoritmo converge para a melhor solução.

Durante as simulações realizadas, obtivemos duas soluções possíveis como resultado final do algoritmo. Num total de 20 simulações seguidas realizadas, a solução com a instalação dos IFs nas seções 3 e 6 representou 90% dos casos, enquanto 10% das simulações apresentaram a alocação dos IFs nas seções 5 e 9.

Toma-se como solução final do problema a alocação dos dispositivos nas seções 3 e 6, já que esta solução apresentou 90% das simulações realizadas, representado pelo indivíduo na Figura 34.

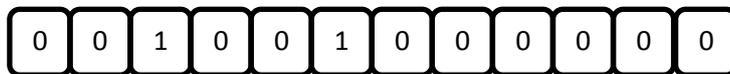


Figura 34 – Indivíduo correspondente a solução ótima obtido pelo AG.
Fonte: Autoria Própria.

Conforme a Figura 15, a seção 3 corresponde a instalação do IF entre os nós 3 e 4, enquanto a seção 6 refere-se ao trecho entre os nós 6 e 7.

A rede completa apresenta uma distância equivalente a 3810 metros a ser percorrida pela equipe de manutenção para inspeção visual no caso de falta sem a instalação dos IFs, o que levaria 3,81 minutos considerando o deslocamento a 60km/h. Com a instalação dos dispositivos, obtém-se a redução da distância a ser inspecionada para 1935 metros em 1,935 minutos, ou seja, uma redução de 49,2126%.

Estes valores podem parecer ínfimos, porém devemos lembrar que o método pode ser aplicado em redes maiores, resultando em maiores proporções.

6 CONCLUSÃO

Os objetivos principais da metodologia de alocação de IFs desenvolvida foram alcançados, tendo em vista que os resultados obtidos mostraram-se coerentes.

Com a instalação de IFs em pontos adequados conforme o resultado do caso abordado, a equipe de manutenção é direcionada à seção da falta permanente em menor tempo e, conseqüentemente, permite o restabelecimento mais rápido do sistema, impactando diretamente na melhoria da qualidade no fornecimento de energia elétrica.

É importante ressaltar que este trabalho não atende a todos os critérios reais que envolvem a instalação dos dispositivos IFs, visto que não foram considerados outros equipamentos de proteção, cargas e tipos de consumidores, assim como os custos envolvidos para instalação dos dispositivos. No entanto, a utilização do AG mostrou-se eficiente para se obter alocações eficientes de instalação de IFs.

Os resultados demonstrados no capítulo anterior mostram como a utilização de metaheurísticas podem contribuir para otimização de processos de manutenção. É possível perceber que para determinado tamanho de população e número de gerações, o algoritmo é capaz de identificar a melhor solução, utilizando os operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação.

Diversas dificuldades na implementação do algoritmo foram enfrentadas durante o desenvolvimento deste trabalho. O maior obstáculo foi a interpretação do problema para aplicar o Algoritmo Genético. Foram realizados diversos ajustes na rotina desenvolvida analisando os resultados obtidos nas simulações.

Portanto, o algoritmo desenvolvido é uma ferramenta útil para que sejam alocados os IFs de maneira satisfatória a fim de reduzir o tempo que a equipe de manutenção leva para encontrar a seção faltosa.

Como sugestões de trabalhos futuros recomendamos a análise financeira da instalação dos IFs; considerar a influência de cargas e outros equipamentos de uma rede para a instalação dos IFs; aplicação de outros métodos de otimização para alocação de dispositivos de proteção; aplicação do AG para alocação de outros equipamentos na rede de distribuição.

REFERÊNCIAS

ABRADEE. **Redes de Energia Elétrica.** Disponível em <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 25 jan. 2015.

ANEEL. **Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica.** Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2014.

ANEEL. **Qualidade do Serviço e do Produto.** Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=79&idPerfil=2&idiomaAtual=0>>. Acesso em: 23 mai. 2014.

ANGERER, F.M.; **New developments in Faulted Circuit Indicators help utilities reduce cost and improve service.** *IEEE Rural Electric Power Conference*, pp. B4-B4-3, 2008.

ANGERER, F.M.; **OH and UG fault indication via radio networks.** *IEEE/PESTransmission and Distribution Conference and Exposition*, vol. 2, pp. 991-992, 2001.

BJERKAN, E. **Efficient fault management using remote fault indicators.** In: *CIREN - The 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Prague, p.1-4, 2009.

CARVALHO, P. L. F. André. **Algoritmos Genéticos.** Disponível em <<http://www.icmc.usp.br/pessoas/andre/research/genetic/#cara>>. Acesso em: 19 out. 2014.

COLEON, R. **Para-raios para aplicação em subestações.** Disponível em: <<https://richardcoleon.files.wordpress.com/2011/12/capc3adtulo-5.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2015.

CONG, D.-P.; RAISON, B.; ROGNON, J.-P.; BONNOIT, S.; MANJAL, B. **Optimization of fault indicators placement with dispersed generation insertion.** *IEEE Power Engineering Society - General Meeting*, pp. 1530-1537, 2005.

COUTTO FILHO, M. B. DO; RODRIGUES, M. A. P.; SOUZA, J. C. S. et al.; **Localização de defeitos em sistemas de energia elétrica utilizando sistemas inteligentes.** In: *XV SNTPTTEE, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.* Brasil, pp.1-17,1999.

CPFL ENERGIA.**Proteção de redes aéreas de distribuição - Sobrecorrente.**Disponível em <<http://sites.cpf.com.br/documentos-tecnicos/GED-2912.pdf>>.Acesso em: 20 jan. 2015.

DASHTI, R.; SADEH, J.; **Fault Indicator Allocation in Power Distribution Network for Improving Reliability and Fault Section Estimation.** *IEEE The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, 2011.

DUGAN, R.C.; RAY, L. A.; SABIN, D. D.; BAKER, G.; GILKER, C.SUNDARANI, A. **Fast tripping of utility breakers and industrial load interruptions.** *IEEE Industry Applications Magazine*, v. 2, pp. 55-64, may/jun. 1996.

ELETROBRÁS.**Proteção de sistemas aéreos de distribuição / Centrais Elétricas Brasileiras - Eletrobrás.**Rio de Janeiro: Campus: Eletrobrás, pp.146, 1982.

FELBER, L. A.**Regulação de tensão em subestações de distribuição de energia elétrica.** Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

FERNANDES, A. M. R. **Inteligência Artificial: noções gerais.** Florianópolis: VisualBooks, 2005.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning.** *John Wiley & Sons, United States of America*,1997.

HO, Chin-Ying.; LEE, Tsung-En; LIN, Chia-Hung. **Optimal Placement of Fault Indicators Using the Immune Algorithm.** *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 26, n°1, fev. 2011.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems.** *Bradford Books, Reprint Edition*, v.1,1992.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos.** Rio de Janeiro: Brasport, 2008.

LUCAS, C. D. **Algoritmos Genéticos: uma Introdução.** Rio Grande do Sul, 2002.

MUENCH, F. J.; WRIGHT, G. A.; **Fault Indicators: Types, Strengths & Applications.** *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, pp. 3688-3693, 1982.

NEIS, P. **Processamento Inteligente de alarmes empregando algoritmos genéticos.** Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

NORTROLL, **Product Catalog: Fault Passage Indicators to locate short circuit and earth faults.** Levanger, Norway. 7 p.

NORTROLL, **Linetroll® 110 Tur.** Disponível em <<http://mr-bh.com/documents/nortroll/UG%20LT%20110Tur.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2015.

REZENDE, S. O. **Sistemas Inteligentes - Fundamentos e Aplicações.** Manole, vol.1, São Paulo, 2003.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. **Indicadores de Faltas.** Disponível em <<http://www2.selinc.com.br/indifaltas.htm>>. Acesso em: 19out. 2014.

SILVA, W. **Algoritmo de Isolamento de Faltas Elétricas em Redes de Distribuição.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SOUZA, D. **Abordagem Baseada em Lógica Fuzzy para Alocação de Indicadores de Falta em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

TANG, Y.; WANG, H.F.; AGGARWAL, R.K.; JOHNS, A.T. **Fault indicators in transmission and distribution systems.** *Proceedings of Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 238-243, 2000.

TENG, J.; HUANG, W.; LUAN, S.; **Automatic and Fast Faulted Line-Section Location Method for Distribution Systems Based on Fault Indicators.** *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 29, n°4, jul. 2014.

USIDA, W. **Sistema Inteligente para Alocação Eficiente de Dispositivos Indicadores de Falta em Alimentadores de Distribuição.** Tese (Doutorado

Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

WIKIPEDIA, **Hot stick**. Disponível em <http://en.wikipedia.org/wiki/Hot_stick>. Acesso em: 26 jan. 2015.

ZAUK, M. J. **Uma solução determinística para o problema de localização da seção em falta em sistemas elétricos de potência através do processamento de alarmes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior de Engenharia Elétrica. - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2011.

ZHANG, H.F.; PAN, Z.C.; SANG, Z.Z, **Fault locating in ungrounded and compensated systems**. In: *Eighth IEE International Conference, Developments in Power System Protection*, vol. 2, pp. 469-472, 2004.