

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS  
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PLANEJAMENTO DE REDE SECUNDÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA ATRAVÉS DE UM ALGORITMO GENÉTICO**

**EDERSON PEREIRA MADRUGA**

**COMISSÃO EXAMINADORA**

**Professor Dr.rer.nat. Márcio Rosa da Silva  
Professor Ms.Gustavo Vieira Pereira**

**São Leopoldo  
2007**

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS  
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PLANEJAMENTO DE REDE SECUNDÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA ATRAVÉS DE UM ALGORITMO GENÉTICO**

**EDERSON PEREIRA MADRUGA**

Trabalho de conclusão de curso submetido como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Engenheiro Eletricista pela Universidade do Vale  
do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientador: Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos  
Co-orientador: Prof. Dr. Leonardo Dagnino Chiwiacowsky

São Leopoldo  
2007

## **Agradecimento**

Agradeço aos Professores Dr. José Vicente Canto dos Santos e Dr. Leonardo Dagnino Chiwiacowsky, que como orientador e co-orientador respectivamente, colaboraram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho, focalizando, norteando e esclarecendo as iniciativas e idéias propostas.

Agradeço também ao amigo Msc. Eng. Fábio Cassucci Gaino que com sua experiência e conhecimentos na área de distribuição muito contribuiu para o êxito do trabalho.

Agradeço à Certaja e aos colegas de trabalho, pelo apoio dispensado a minha formação.

Especialmente agradeço a meu pai Alceu, minha esposa Iris e minha filha Yasmin, pelo incentivo e compreensão durante estes anos aos quais me dediquei aos estudos.

## **Resumo**

A distribuição de Energia Elétrica representa um serviço básico, essencial na vida da humanidade, sendo uma das principais preocupações a sua utilização racional, evitando desperdícios e reduzindo as perdas durante sua produção e distribuição. A maior parte da energia distribuída é em baixa tensão, o que, em função da maior intensidade de corrente elétrica, corresponde a uma parcela significativa das perdas. Este trabalho tem por objetivo desenvolver um algoritmo de apoio à decisão que possibilite um planejamento adequado da expansão de sistemas de baixa tensão, utilizando os recursos financeiros disponíveis de maneira a serem obtidos os melhores níveis de tensão com a menor perda de energia possível. Para isto, foi desenvolvido um Algoritmo Genético que aplica seus operadores para determinar a melhor configuração de cabos, balanceamento de cargas entre as fases do circuito, posicionamento de transformador e banco de capacitores.

Palavra-chave: Distribuição de Energia, Baixa Tensão, Perdas de Energia, Planejamento de Distribuição, Algoritmo Genético.

## **Abstract**

The Distribution of Electric Energy represents basically, an essential service in the humanity life, where one of the main concerns is its rational use, avoiding wastefulness and reducing the losses during its production and distribution. Most part of the energy distribution is in low voltage, and, because of the biggest electric current intensity, it corresponds a significant parcel the losses. This work has the objective to develop an algorithm, which supports the decision and makes possible an adequate planning of expansion of low voltage systems, using the available financial resources in order to get the best levels of tension with the lesser loss energy possible. With this purpose, a Genetic Algorithm was developed, which is used to determine the best configuration concerning wires, loads balancing at the circuit phases, positioning of transformer and bank of capacitors.

Keywords: Energy distribution, low-voltage, energy loss, distribution planning, genetic algorithm.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>9</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1. OBJETIVO.....</b>	<b>10</b>
<b>1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO.....</b>	<b>12</b>
<b>1.3. RELAÇÃO COM DISCIPLINAS DO CURSO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. PLANEJAMENTO DE REDES SECUNDÁRIAS DE DISTRIBUIÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3. ORIGEM DO PENSAMENTO EVOLUTIVO .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4. CONCEITOS BÁSICOS DE GENÉTICA .....</b>	<b>21</b>
2.4.1. <i>Cromossomos e Genes.....</i>	<i>21</i>
2.4.2. <i>Nomenclaturas.....</i>	<i>22</i>
2.4.3. <i>Reprodução.....</i>	<i>23</i>
2.4.4. <i>Recombinação cromossômica (“crossover”).....</i>	<i>24</i>
2.4.5. <i>Mutação.....</i>	<i>24</i>
<b>2.5. ALGORITMOS GENÉTICOS.....</b>	<b>25</b>
2.5.1. <i>Uma visão geral de algoritmos genéticos.....</i>	<i>28</i>
2.5.2. <i>O Algoritmo.....</i>	<i>29</i>
2.5.3. <i>Codificação da Solução.....</i>	<i>30</i>
2.5.4. <i>A Função de Adequação.....</i>	<i>31</i>
2.5.5. <i>Seleção.....</i>	<i>32</i>
2.5.6. <i>Reprodução.....</i>	<i>36</i>
<b>3. SISTEMA PROPOSTO .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1. ALGORITMO GENÉTICO DEDICADO AO PLANEJAMENTO DE REDES SECUNDÁRIAS .....</b>	<b>41</b>
3.1.1. <i>Formulação Matemática do Problema.....</i>	<i>41</i>
3.1.2. <i>Sistema de codificação .....</i>	<i>46</i>
3.1.3. <i>Geração da População Inicial.....</i>	<i>48</i>
3.1.4. <i>Avaliação das Configurações.....</i>	<i>49</i>
3.1.5. <i>Fluxo de potência Trifásico a quatro Fios .....</i>	<i>52</i>
3.1.5.1. <i>Redes de Distribuição Fracamente Malhada .....</i>	<i>57</i>
3.1.6. <i>Seleção.....</i>	<i>62</i>
3.1.7. <i>Recombinação .....</i>	<i>62</i>
3.1.8. <i>Mutação.....</i>	<i>63</i>
3.1.9. <i>Parâmetros de Controle .....</i>	<i>64</i>
3.1.10. <i>Crítérios de Parada.....</i>	<i>65</i>

<b>4. TESTES E RESULTADOS .....</b>	<b>66</b>
<b>4.1. CIRCUITO 1 .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1.1. COMPARAÇÃO COM ALGORITMO GENÉTICO REFERÊNCIA .....</b>	<b>68</b>
<b>4.1.2. ALGORITMO GENÉTICO PROPOSTO.....</b>	<b>72</b>
<b>4.2. CIRCUITO 2 .....</b>	<b>76</b>
<b>4.3. CIRCUITO 3 .....</b>	<b>81</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>91</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE: A.....</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICE: B .....</b>	<b>105</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - DIAGRAMA UNIFILAR DE SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	14
FIGURA 2.2 - O CROMOSSOMO E A CÉLULA.....	22
FIGURA 2.3 - UM CROMOSSOMO REPRESENTANDO UM POSSÍVEL VETOR SOLUÇÃO.....	31
FIGURA 2.4 - EXEMPLO DE SELEÇÃO POR ROLETA.....	34
FIGURA 2.5 - EXEMPLO DE SELEÇÃO POR TORNEIO COM ELITISMO.....	35
FIGURA 2.6 - RECOMBINAÇÃO SIMPLES.....	37
FIGURA 2.7 - EXEMPLO DE MUTAÇÃO ( $PM = 0,08$ ).....	38
FIGURA 3.1 - MACROFLUXOGRAMA DO ALGORITMO GENÉTICO.....	40
FIGURA 3.2 - CIRCUITO SECUNDÁRIO DE DISTRIBUIÇÃO.....	46
FIGURA 3.3 - ESQUEMA DE CODIFICAÇÃO PARA UM PROBLEMA QUALQUER.....	47
FIGURA 3.4 - CROMOSSOMO INICIAL.....	47
FIGURA 3.5 - REDE DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL.....	53
FIGURA 3.6 - SEÇÃO DE UMA LINHA (RAMO L).....	53
FIGURA 3.7 - REDE DE DISTRIBUIÇÃO FRACAMENTE MALHADA.....	57
FIGURA 3.8 - REPRESENTAÇÃO DOS BREAKPOINTS USANDO INJEÇÃO DE CORRENTE NODAL.....	59
FIGURA 3.9 - ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA IMPLEMENTADO PARA REDES RADIAIS E/OU FRACAMENTE MALHADA.....	61
FIGURA 3.10 - EXEMPLO DE CROMOSSOMOS RECOMBINADOS.....	63
FIGURA 3.11 - EXEMPLO DE CROMOSSOMO APLICANDO MUTAÇÃO.....	64
FIGURA 4.1 - CIRCUITO 1.....	67
FIGURA 4.2 - GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DAS ITERAÇÕES – CIRCUITO 1.....	75
FIGURA 4.3 - CONFIGURAÇÕES DO AG NO <i>PLANRSEC</i> .....	77
FIGURA 4.4 - GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DAS ITERAÇÕES – CIRCUITO 2.....	80
FIGURA 4.5 - REDE REAL CARREGADA NO <i>PLANRSEC</i> – CIRCUITO 3.....	81
FIGURA 4.6 - GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DAS ITERAÇÕES – CIRCUITO 3.....	90
FIGURA A.1 - TELA INFORMATIVA DO <i>PLANRSEC</i> .....	98
FIGURA A.2 - TELA PRINCIPAL DO <i>PLANRSEC</i> .....	99
FIGURA A.3 - TELA DE CONFIGURAÇÕES DE DIRETÓRIOS E ARQUIVOS DE SAÍDA.....	100
FIGURA A.4 - TELA DE PARAMETRIZAÇÃO DO AG.....	101
FIGURA A.5 – TELA DE VISUALIZAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS CABOS.....	102
FIGURA A.6 – GRÁFICO GERADO DURANTE O PROCESSAMENTO.....	102
FIGURA A.7 – TELA DE IMPORTAÇÃO DO SISTEMA GIS.....	103
FIGURA A.8 - TELA DE CONEXÃO COM O BANCO DE DADOS ORACLE® DO GIS.....	103
FIGURA A.9- TELA DE CONEXÃO COM O BANCO DE DADOS ORACLE® DO GIS.....	104



## LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 - CUSTOS DE MATERIAIS E EQUIPAMENTOS DO CIRCUITO 1.....	68
TABELA 4.2 - PARÂMETROS DO AG - CIRCUITO 1.....	69
TABELA 4.3 - CARACTERÍSTICAS INICIAIS DO CIRCUITO 1.....	69
TABELA 4.4 - DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE CARGAS DO CIRCUITO 1. ....	70
TABELA 4.5 - CARACTERÍSTICA DOS CABOS SELECIONADOS PELO AG. ....	70
TABELA 4.6 - DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS FEITA PELO AG.....	70
TABELA 4.7 - NÍVEIS DE TENSÃO – CIRCUITO 1.....	71
TABELA 4.8 - CUSTOS DE MATERIAIS E EQUIPAMENTOS DO CIRCUITO 1.....	72
TABELA 4.9 - PARÂMETROS DO AG - CIRCUITO 1.....	73
TABELA 4.10 - CARACTERÍSTICA DOS CABOS SELECIONADOS PELO AG.....	73
TABELA 4.11 - DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS FEITA PELO AG.....	74
TABELA 4.12 - NÍVEIS DE TENSÃO – CIRCUITO 1.....	74
TABELA 4.13 – CUSTOS DE MATERIAIS E EQUIPAMENTOS DO CIRCUITO 2. ....	77
TABELA 4.14 - PARÂMETROS DO AG - CIRCUITO 2.....	77
TABELA 4.15 - CARACTERÍSTICA DOS CABOS SELECIONADOS PELO AG.....	78
TABELA 4.16 - DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS FEITA PELO AG.....	78
TABELA 4.17 - NÍVEIS DE TENSÃO – CIRCUITO 2.....	79
TABELA 4.18 - CARACTERÍSTICAS INICIAIS DO CIRCUITO 3.....	82
TABELA 4.19 - DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE CARGAS DO CIRCUITO 3.....	83
TABELA 4.20 - TENSÃO INICIAL NO CIRCUITO 3.....	84
TABELA 4.21 - CUSTOS DE MATERIAIS E EQUIPAMENTOS DO CIRCUITO 3.....	85
TABELA 4.22 - PARÂMETROS DO AG - CIRCUITO 3.....	86
TABELA 4.23 - CARACTERÍSTICA DOS CABOS SELECIONADOS PELO AG.....	87
TABELA 4.24 - DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS FEITA PELO AG.....	88
TABELA 4.25 - NÍVEIS DE TENSÃO – CIRCUITO 3.....	89
TABELA B.1 – DADOS DOS CONDUTORES UTILIZADOS POR [6]. ....	105
TABELA B.2 - DADOS DOS CONDUTORES UTILIZADOS NO CIRCUITO 3.....	105
TABELA B.3 – DISTÂNCIA ADOTADA ENTRE OS CONDUTORES SECUNDÁRIOS. ....	105

## **1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo serão abordados o objetivo deste trabalho, o método de solução empregado, a estrutura da apresentação e a correlação entre os conhecimentos aplicados e as disciplinas oferecidas pelo curso de Engenharia Elétrica da Unisinos.

### **1.1. Objetivo**

O processo de reestruturação do setor elétrico, que objetiva um ambiente mais competitivo, saindo de uma estrutura vertical monopolista para adotar um modelo em que os serviços de geração, transmissão e distribuição são oferecidos por empresas distintas em um ambiente competitivo, trouxe alguns desafios para o setor elétrico. Um destes desafios é a utilização racional da energia elétrica, evitando desperdícios e reduzindo as perdas durante sua produção e distribuição [2].

Por isto, faz-se necessário que as concessionárias e permissionárias de distribuição de energia procurem métodos de planejamento mais eficientes para a expansão do sistema, buscando a otimização nos investimentos, obtendo assim um maior retorno no que tange à qualidade do fornecimento e à redução das perdas de energia.

O sistema de distribuição é dividido em dois subsistemas básicos, um tendo início nas subestações rebaixadoras (que rebaixam a tensão de níveis de transmissão ou sub-transmissão para níveis médios) chegando até os transformadores rebaixadores de distribuição, ou seja, a rede primária de distribuição. O outro inicia no transformador rebaixador de distribuição indo até a entrada das unidades consumidoras, ou seja, a rede secundária [19].

A grande relevância dos estudos de planejamento e otimização dos circuitos secundários dá-se ao fato deste conter uma parcela significativa das perdas elétricas em distribuição, uma vez que, devido à baixa tensão, as correntes são mais elevadas o que aumenta a perda. Também se destaca os altos custos de investimento e operação destes sistemas, que aliado ao fato de serem o elemento de ligação com o consumidor, ratificam a importância de um planejamento adequado.

Desta forma, este trabalho tem por objetivo desenvolver um método de apoio à decisão, que forneça ao responsável pelo planejamento, alternativas de configurações que garantam simultaneamente as seguintes condições:

- Balanceamento de carga nas respectivas fases do circuito – Distribuir as cargas entre as fases de forma a deixar o circuito mais equilibrado, evita o surgimento de desbalanceamento nos níveis de tensão, o que acarreta menores perdas no sistema. Esta ação é a que representa menor custo operacional para efetivação a campo.
- Posicionamento do transformador de distribuição – Posicionar o transformador no circuito secundário, considerando a topologia da rede primária, de modo a deixá-lo o mais próximo possível do centro de carga, possibilitará níveis de tensão mais adequados. Esta solução, para circuitos longos, é o que pode apresentar melhor relação custo x benefício, uma vez que o custo para realocar um transformador é relativamente elevado.
- Especificação dos cabos a serem utilizados – Principalmente para circuitos curtos, é a solução que apresenta melhor relação custo x benefício. Esta adequação geralmente é a que apresenta melhores resultados no que se refere a

níveis de tensão, porém, os custos envolvidos são relativamente altos e o tempo de execução é maior que os mencionados anteriormente.

- Posicionamento de Banco de Capacitor – A alocação de banco de capacitor no circuito é uma forma de relativo baixo custo para redução de reativos indutivos nas redes secundárias, o que acarreta em melhorias de níveis de tensão e a redução de perdas de energia.

O método escolhido foi empregar um Algoritmo Genético, associado a um programa de fluxo de potência, que partindo de um circuito elétrico de baixa tensão proposto, após o processamento, indique exequíveis configurações que atendam os requisitos citados anteriormente.

## **1.2. Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos e dois apêndices, sendo o primeiro capítulo uma introdução ao universo da distribuição de energia elétrica e aos objetivos do planejamento de redes secundárias. O capítulo 2 traz uma visão geral dos conceitos e aplicações do planejamento da distribuição de energia elétrica, bem como uma introdução aos Algoritmos Genéticos e sua origem. O terceiro capítulo apresenta o sistema proposto, sua formulação matemática, sua codificação, critérios e esquema de blocos. O capítulo 4 mostra os resultados obtidos em testes de circuitos hipotéticos e reais. O quinto, e último capítulo, conclui este trabalho, analisando os resultados dos testes realizados. O apêndice A apresenta o programa desenvolvido neste trabalho, chamado de PlanRSec, suas telas e uma

breve descrição de sua operacionalidade. O apêndice B traz as tabelas com parâmetros elétricos utilizados nos cálculos do fluxo de potência.

### **1.3. Relação com disciplinas do curso**

Para desenvolver este trabalho, foram utilizados conhecimentos adquiridos em diversas disciplinas ofertadas no currículo de Engenharia Elétrica da Unisinos, dentre as mais relevantes destacam-se:

- ✓ Sistemas de Inteligência Artificial;
- ✓ Métodos de Otimização para Engenharia Elétrica;
- ✓ Conversão de Energia;
- ✓ Circuitos Elétricos III;
- ✓ Linguagem de Programação C.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo contém uma síntese da bibliografia consultada como fundamentação teórica deste trabalho, onde é mostrada uma breve descrição de sistema de distribuição de energia elétrica, como é planejada a expansão destes sistemas, as origens do pensamento evolutivo, conceitos básicos de genética e, finalmente, uma introdução aos algoritmos genéticos.

### 2.1. Distribuição de Energia Elétrica

Um sistema genérico de energia elétrica é formado por geradores, transformadores elevadores/abaixadores, linhas de transmissão e alimentadores de distribuição, conforme ilustra a figura 2.1 a seguir [19].

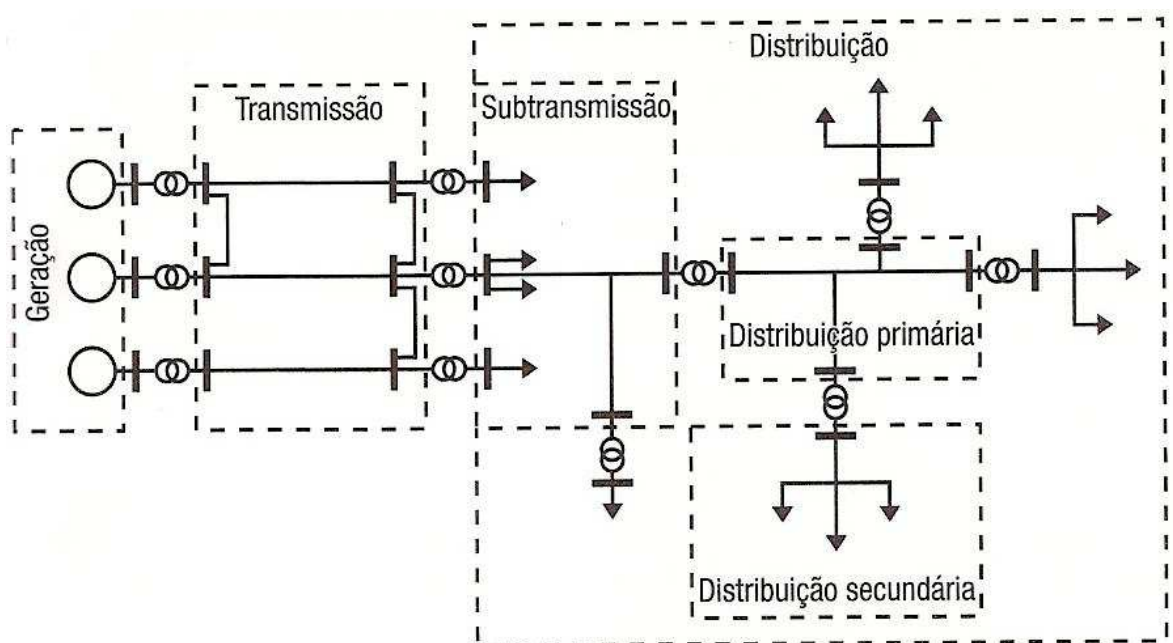


Figura 2.1 - Diagrama unifilar de sistema elétrico de potência.

Assim, conforme figura 2.1, podemos dividir os Sistemas Elétricos de Potência em três grandes blocos:

Geração, que perfaz a função de converter alguma forma de energia em energia elétrica;

Transmissão, que é responsável pelo transporte da energia elétrica dos centros de produção ao consumo;

Distribuição, que distribui a energia elétrica recebida do sistema de transmissão aos grandes, médios e pequenos consumidores.

Como percebemos, a distribuição se divide em sub-transmissão, distribuição primária e distribuição secundária.

A parcela relativa a distribuição secundária, responde por 18,25% do total das perdas do sistema elétrico de potência, conforme indicado em [13].

Este fato, aliado à necessidade de investimentos otimizados, torna importantíssimo o adequado planejamento nas construções e manutenções de circuitos secundários, pois além da parcela significativa de perda envolvida, este segmento da distribuição é o elo principal entre a empresa e os clientes, e seu planejamento correto significa maior qualidade no fornecimento e conseqüente satisfação dos consumidores [5].

## 2.2. Planejamento de Redes Secundárias de Distribuição

O planejamento de rede secundária possui semelhanças ao da rede primária, diferindo principalmente na dimensão do problema de otimização. As particularidades de uma rede secundária devem ser consideradas no planejamento, isto descarta a possibilidade de aplicação fiel de métodos desenvolvidos para rede primária.

A literatura técnica relacionada a planejamento de redes de distribuição de energia elétrica é quase integralmente dedicada a redes primárias, isto se explica pela opção da maioria dos países por utilizarem circuitos secundários curtos e longas redes primárias. No Brasil os circuitos secundários são relativamente longos, no entanto, também são desenvolvidos mais trabalhos voltados para distribuição em média tensão.

Como referência, foram utilizados trabalhos de planejamento de redes primárias e secundárias, conforme segue:

### ✓ Previsão e modelagem de carga:

As cargas associadas à distribuição têm um papel significativo no dimensionamento de cabos e transformadores. O sistema proposto em [32], Previsão de Carga em Sistemas Elétricos de Potência com o Modelo *Neuro-Fuzzy* NFHB, através de dados mensais de consumos, propõe prever o comportamento futuro das cargas.

A estimativa de carga em um transformador, mediante conhecimento do número de consumidores e suas classes tarifárias, é abordado em [3], *Distribution Transformer Load Modeling Using Load Research Data*, onde uma aritmética *Fuzzy* é utilizada.



#### ✓ Fluxos de Potência para Distribuição:

O fluxo de potência é muito importante para o planejamento da distribuição, pois com ele se obtém os limites que garantirão a segurança dos materiais e equipamentos. Para rede secundária é importante que o fluxo abranja redes radiais e malhadas, trifásicas, bifásicas e monofásicas, com cargas equilibradas e desequilibradas. Três métodos que atendem os requisitos citados foram estudados [21] [4] [30], sendo adotado neste trabalho o proposto em [4], que será detalhado na seção 3.1.5.

#### ✓ Planejamento de Redes de Distribuição

O trabalho exposto em [27] propõem o planejamento integrado de rede primária e secundária, otimizando o modelo através de programação inteiro-linear misto. O projeto de redes rurais extensas, utilizando programação de otimização dinâmica é proposto por [10] [11], onde são avaliados custos, níveis de tensão e perda. O trabalho publicado por [7] avalia a utilização de abordagem exata, heurística, híbrida e meta-heurística para solução do planejamento de redes secundárias, considerando basicamente custos de implantação. A referência [6], elaborada por Cossi, propõe um algoritmo genético juntamente com um programa de fluxo de carga, para planejar circuitos secundários. Este trabalho foi a principal referência utilizada neste trabalho.

#### ✓ Controle de Reativos

No artigo [33], é apresentada uma metodologia utilizando algoritmo genético para determinar o tamanho, a posição, o tipo e o número dos capacitores a serem colocados em um sistema radial de distribuição de energia elétrica primária. No trabalho [20] é apresentada uma metodologia utilizando algoritmo genético para alocação de bancos de

capacitores, além de um método rápido do cálculo total da perda de energia, baseado nas curvas diárias normalizadas da carga. No artigo [16] é apresentada uma proposta de um método híbrido (busca tabu, aproximações combinatórias, algoritmos genéticos e aproximações heurísticas), para alocação ótima de capacitores. Na referência [25], temos um algoritmo genético desenvolvido para alocação ótima de capacitores fixos em redes de distribuição. O algoritmo considera as distorções harmônicas, perda de energia, limites de tensão e quantidade de capacitores. No artigo [29], temos a implementação de um algoritmo genético para alocação de bancos de capacitores, objetivando a redução de perda, maximizando o lucro líquido associado com o investimento em bancos de capacitores.

✓ Equilíbrio de Cargas

O trabalho proposto por [18], propõe um balanceamento das cargas nas fases do alimentador, de modo a equilibrar as tensões, aumentando a confiabilidade, a qualidade e reduzindo custos. Isto é feito por *Simulated annealing*, que não garante a solução ótima, mas evita o mínimo local.

✓ Perda de Energia.

A proposta do trabalho [34] é a minimização de perda técnica de energia em um sistema de distribuição, através do controle das chaves seccionadoras do sistema. Para definição das configurações é utilizado Sistemas Classificadores, oriundo da computação evolutiva.

### ✓ Seleção de Condutores

O artigo [22] traz critérios para escolha de condutores, considerando fatores técnicos e econômicos, tais como custos de investimentos e perda.

Como a bibliografia mostra, várias propostas para planejamento de redes secundárias são desenvolvidas, porém, na prática, pouco se aplica. Algumas dificuldades, como a utilização de Fluxo de Potência para circuitos de baixa tensão e o grande volume de projetos, levam grande parte das empresas a manterem métodos de planejamentos arcaicos, onde a avaliação de níveis de tensão, carregamento de condutores e transformadores são feitos de maneira rudimentar, o que acarreta em grandes erros de avaliação, geralmente deixando o circuito sobredimensionado o que torna o investimento oneroso. O cálculo que define as quedas de tensões, muitas vezes é feito com base em tabelas práticas que estipulam para cada tipo de cabo e formação um coeficiente de queda por quilômetro. A definição dos condutores a serem utilizados é feita por conhecimento prático e não há avaliação de custo x benefício da utilização de outras configurações de cabos e posição de transformador. A utilização de bancos de capacitores em baixa tensão, ainda não é adotada no setor elétrico, optando-se por investir em recondutoramento ou troca de transformador.

Nas próximas seções, como introdução aos algoritmos genéticos, será mostrada uma síntese da origem do pensamento evolutivo e uma breve introdução de genética.

### **2.3. Origem do Pensamento evolutivo**

As origens do pensamento evolutivo, onde a idéia de evolução é apresentada pela primeira vez, em oposição ao criacionismo, são atribuídas a Jean-Baptiste de Lamarck

(1744-1829). A teoria de Lamarck, conhecida até hoje como Lamarckismo, propunha o conceito de "herança de características adquiridas" segundo a qual admite-se que a informação pode ser gravada no organismo por suas necessidades ou por uma influência do exterior [23].

O naturalista, Charles Robert Darwin (1809-1882), aparentemente, não aceitava a teoria da evolução até março de 1837, quando o ornitólogo John Gould lhe indicou que seus espécimes de tordos-dos-remédios das ilhas Galápagos eram tão diferentes que chegavam a representar espécies diferentes. Isto fez com que Darwin começasse a aceitar a possibilidade de transmutação de espécies e a juntar evidências nesse sentido. Darwin não só começou a pesquisar evidências, como também a procurar alguma teoria ou mecanismo que pudesse explicá-las.

Em 28 de setembro de 1838 Darwin teve a idéia do mecanismo de seleção natural. Entre a primeira publicação de Darwin sobre este assunto e esse evento, vinte anos se passaram. Em 1844 ele escreveu, e não publicou, um ensaio sobre seleção natural e, em 1856, começou a trabalhar numa grande obra, *Natural Selection* que, entretanto, não foi acabada, pois em junho de 1858 ele recebeu um manuscrito intitulado "Sobre a tendência das variedades se afastarem indefinidamente a partir do Tipo Original", escrito pelo jovem naturalista Alfred Russel Wallace (1823-1913). Wallace concebeu, independentemente de Darwin, o mecanismo de seleção natural a partir de suas viagens para a América do Sul e o arquipélago malaio.

Darwin estendeu o conceito de um universo em constante mudança aos seres vivos, bem como introduziu o conceito de mutabilidade ao acaso, sem nenhum propósito divino ou filosófico que os norteassem. Desta maneira, não só os objetos inanimados, mas também os seres vivos, ou seja, tudo estava sujeito às leis físicas, que Newton, Descartes,

entre outros, haviam delineado. Desta forma, os antigos paradigmas de existir um propósito (divino ou não) para tudo, foram substituídos por uma visão mais simples e mecanicista.

Organismos individuais não evoluem. Evolução biológica é a mudança nas propriedades das populações dos organismos, que transcendem o período de vida de um único indivíduo. As mudanças nas populações que são consideradas evolutivas são aquelas herdáveis através de material genético de uma geração para outra [8] [12] [15].

## **2.4. Conceitos Básicos de Genética**

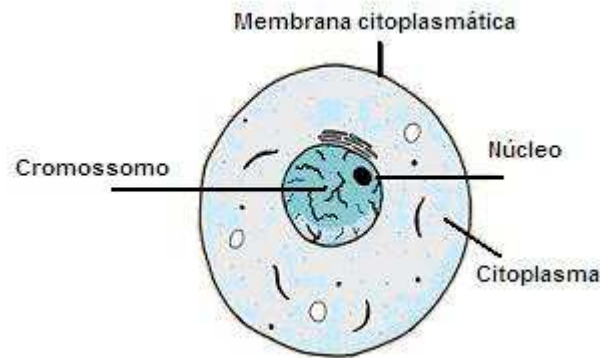
Esta seção introduzirá alguns conceitos de genética a fim de criar uma base teórica para abordagem de Algoritmos Genéticos na seqüência do trabalho.

### **2.4.1. Cromossomos e Genes**

Todos os seres vivos conhecidos são formados a partir de um conjunto de instruções que estão contidas no núcleo de todas as suas células. As estruturas que armazenam estas informações, de como será o indivíduo, recebem o nome de *cromossomos*. A quantidade, o tamanho e o formato destes cromossomos mudam de espécie para espécie, podendo variar de um único e simples anel circular até uma grande quantidade de bastões. No caso humano, por exemplo, existem 23 pares, ou seja, 46 cromossomos com forma de bastão, que dão aos seres humanos todas as características físicas e algumas psicológicas. A este conjunto de cromossomos dá-se o nome de *genoma* [14].

O cromossomo, por sua vez, é constituído, por uma cadeia de ácido desoxirribonucléico (ADN ou DNA), em forma de dupla hélice, que ele traz em seu interior. Essa molécula helicoidal que se encontra em forma contínua por toda extensão do

cromossomo, por sua vez, é formada por uma série de pares de base, e que vale destacar que embora estes pares de base sejam os mesmos em todos os animais e plantas, sua seqüência no cromossomo não é, em geral, a mesma para todos os indivíduos [9].



**Figura 2.2 - O cromossomo e a célula.**

O cromossomo pode ser dividido, para efeito de estudos, em segmentos longitudinais chamados *genes*. Genes funcionam como unidade genética; para efeitos práticos, são considerados como a unidade básica do cromossomo e juntos, carregam todas as características que o organismo pode ter.

#### **2.4.2. Nomenclaturas**

Os cromossomos, em geral, ficam agrupados em pares. São denominados *cromossomos homólogos* os membros de cada par que compartilham os mesmos tipos de genes.

Define-se como *locus* ou *loco* o lugar ocupado por um gene dentro de um cromossomo. O mesmo *loco* pode estar ocupado, em diferentes cromossomos homólogos, por formas gênicas diferentes.

São chamados de *alelos* a essas variantes de um mesmo gene. Todos estão, naturalmente, relacionados à mesma função geral, mas podem atuar diversamente. Assim, por exemplo, no caso humano, num determinado *locus* do cromossomo X existe um *alelo* que condiciona visão normal das cores e, no mesmo *locus* do cromossomo homólogo, poderá haver um alelo que impossibilite o seu portador de distinguir o vermelho do verde.

### **2.4.3. Reprodução**

A reprodução dos seres vivos pode ser dividida em dois tipos: reprodução assexuada e reprodução sexuada. No primeiro caso, os organismos produzem clones, cópias idênticas de si próprios, ocorrendo, em geral, em organismos de baixa complexidade estrutural. Neste caso, estes organismos praticamente não apresentam variações, o que só ocorrerá quando houver mutações (descritas no item 2.4.5).

A reprodução sexuada, entretanto, é o modo usual de organismos mais complexos gerarem novos organismos. Neste caso, dois organismos, através da união de seus gametas, formam um novo organismo. Como cada gameta é haplóide, (carrega apenas metade do número de cromossomos de uma célula normal), a união de dois gametas irá gerar uma célula especial chamada ovo, diplóide, (com o número normal de cromossomos), metade dos quais provenientes do pai e a outra metade da mãe.

Entretanto, diversamente das demais células, o ovo, durante um processo chamado de desenvolvimento, irá se duplicar, diversas vezes, ocorrendo processos de citodiferenciação, pelos quais as células adquirem diferentes feições bioquímicas e estruturais.

A formação do organismo completo poderá ter características fenotípicas distintas das do pai e das da mãe, por dois motivos: primeiro, por apresentar um genótipo distinto do de seus pais (o organismo terá metade dos genes de cada genitor) uma distinção fenotípica também ocorrerá. Segundo, por eventos que podem ocorrer durante a meiose, como se apresenta a seguir.

#### **2.4.4. Recombinação cromossômica (“crossover”)**

Também conhecida como permutação ou simplesmente recombinação, é o fenômeno que ocorre durante a meiose, onde os cromossomos homólogos se pareiam antes de se segregarem para gametas diferentes. O que ocorre, basicamente, é que uma parte de um cromossomo pode ser trocada com a outra parte do cromossomo homólogo, fazendo com que *alelos*, que antes estavam no mesmo cromossomo, passem a ficar em cromossomos separados. Este fenômeno constitui a chamada Terceira Lei da Herança (de Morgan): *"Genes situados no mesmo cromossomo tendem a se manter unidos de uma geração à seguinte, só se separando pelo processo da permuta, cuja frequência reflete, até certo ponto, as relações espaciais entre aqueles genes"*.

#### **2.4.5. Mutação**

A hereditariedade é uma força conservadora que confere estabilidade a sistemas biológicos. Contudo, nenhum mecanismo composto de moléculas e sujeito ao impacto do mundo físico pode ser perfeito. Erros na cópia produzem seqüências alteradas de DNA - MUTAÇÕES - que são perpetuadas. Mutação é um termo vago, e é frequentemente definido como uma mudança na seqüência de pares de base de um gene, mas às vezes o termo é usado de maneira mais ampla de modo a incluir mudanças no número e estrutura



dos cromossomos (o cariótipo). Pode-se dizer que a recombinação difere da mutação porque a recombinação é, usualmente, uma troca recíproca de DNA (*genes*) que em si mesma não são alteradas. Contudo, a recombinação cromossômica não é sempre recíproca e pode ocorrer dentro dos limites de um *gene* e assim alterar a seqüência de pares de base. Assim, alguns eventos são, na realidade, mutações. A mutação representa a matéria prima da evolução. Pode-se dizer que, sem esse fator, a vida nunca passaria além de uma protobactéria.

## 2.5. Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AG), juntamente com Estratégias Evolucionárias (EE) e Programação Evolutiva (PE), formam uma classe de algoritmos de pesquisa baseados em evolução natural [28]. Resumidamente, as técnicas de pesquisa são classificadas em:

- ✓ Técnicas Baseadas em Cálculo - usam um conjunto de condições necessárias e suficientes que devem ser satisfeitas pelas soluções de um problema de otimização:
  - Métodos Diretos – utilizam informações da função como derivadas de primeira e/ou de segunda ordem;
  - Métodos Indiretos - procuram por um extremo local resolvendo um conjunto, normalmente não linear, de equações que resultam quando se coloca o gradiente da função objetivo igual a zero.

- ✓ Técnicas Enumerativas - procuram a solução pesquisando seqüencialmente cada ponto do espaço de busca (finito e discreto). Uma destas técnicas é conhecida como Programação Dinâmica;
- ✓ Técnicas dirigidas por pesquisa aleatória – baseadas em técnicas enumerativas, mas usam informações adicionais para dirigir a pesquisa:
  - *Simulated Annealing* - técnica baseada no processo de evolução termodinâmica para dirigir a pesquisa para o estado de mínima energia;
  - Algoritmos Evolucionários - baseados nos princípios de seleção natural:
    - Estratégias Evolucionárias;
    - Algoritmos Genéticos;
    - Programação Evolutiva.

Algoritmos genéticos (AG) e estratégias evolucionárias (EE) são métodos que simulam, através de algoritmos, os processos da evolução natural (biológica) visando, principalmente, resolver problemas de otimização.

Estes algoritmos podem ser vistos como uma representação matemática - algorítmica das teorias de Darwin e da genética, chamada de a nova sintaxe da teoria da evolução, cujos principais postulados podem ser resumidos:

- A evolução é um processo que opera sobre os cromossomos do organismo e não sobre o organismo que os carrega. Desta maneira, o que ocorrer com o organismo, durante sua vida, não irá se refletir sobre seus cromossomos. Entretanto, o inverso não é verdadeiro: os cromossomos do organismo são

o projeto e terão reflexo direto sobre todas as características desse organismo (o indivíduo é a decodificação de seus cromossomos).

- A seleção natural é o elo entre os cromossomos e o desempenho que suas estruturas decodificam (o próprio organismo). O processo de seleção natural faz com que, aqueles cromossomos, que decodificaram organismos mais bem adaptados ao seu meio ambiente, sobrevivam e reproduzam mais do que aqueles que decodificam organismos menos adaptados.
- O processo de reprodução é o ponto através do qual a evolução se caracteriza. Mutações podem causar diferenças entre os cromossomos dos pais e o de seus filhos. Além disso, processos de recombinação (*crossover*) podem fazer com que os cromossomos dos filhos sejam bastante diferentes dos de seus pais, uma vez que eles combinam materiais cromossômicos de dois genitores.

Estes postulados do processo de evolução biológica intrigaram John Holland, no início da década de 1970. Ele acreditava que, incorporando estes princípios em um programa de computador, pudesse resolver, por simulação, problemas complexos, justamente como a natureza o fazia: produzindo cegamente organismos muitíssimo complexos para resolver o problema de sua sobrevivência. Ele iniciou o trabalho manipulando cadeias de 0's e 1's, para representar os cromossomos, e cada organismo constituindo uma tentativa da solução do problema.

Seu algoritmo conseguia resolver problemas complexos de uma maneira muito simples. Como na natureza, o algoritmo não sabia o tipo do problema que estava sendo resolvido. Uma simples função de adequação fazia o papel da medida de adaptação dos organismos (cromossomos) ao meio ambiente. Assim, os cromossomos com uma adaptação

melhor, medida por esta função, tinham maior oportunidade de reprodução do que aqueles com uma má adequação, imitando o processo evolucionário da natureza.

Em 1975, nos Estados Unidos, com o seu livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, John Holland publicou o primeiro trabalho sobre AG. Este livro foi uma compilação de idéias e trabalhos que ele já vinha desenvolvendo há alguns anos. Uma outra escola de pesquisadores desenvolveu, na Alemanha, uma versão diferente, chamada de Estratégias Evolucionárias. Elas foram introduzidas inicialmente por Rechemberg [31], nos anos 60 e, mais tarde, desenvolvidas por Schwefel [31].

A partir da publicação do trabalho de Holland, a área de AG tem evoluído constantemente e, atualmente, usam-se algoritmos genéticos na solução de uma diversidade enorme de problemas de engenharia. Nota-se, também, esforços contínuos visando aprofundar os aspectos teóricos relativos a estes algoritmos.

### **2.5.1. Uma visão geral de algoritmos genéticos**

Na resolução de problemas através da utilização de AG, dois aspectos devem ser considerados:

- Uma maneira de codificação da solução em 'cromossomos' - por exemplo pode-se adotar uma representação binária da solução;
- Uma função de adequação - para indicar o valor de qualquer cromossomo, no contexto do problema, mostrando quanto este valor dista da solução procurada.

Cada cromossomo representa uma tentativa de solução, no espaço de soluções possíveis do problema.

A técnica de codificar soluções pode variar de problema para problema e de algoritmo genético para algoritmo genético. No trabalho original de Holland, a codificação é feita usando cadeias de bits. Segundo Goldberg [17] esta é a técnica que funciona melhor pois a base binária apresenta maior número de esquemas por bit de informação. Entretanto, outras técnicas podem ser usadas como, por exemplo, a utilização direta de números reais.

A função de adequação é a maneira de se fazer a ligação entre o algoritmo genético e o problema a ser resolvido. Ela toma como entrada o cromossomo, que é uma tentativa de solução do problema, e devolve um número real, informando o desempenho deste cromossomo no problema; este número representa o seu grau de adaptabilidade, que informa quão longe ou perto este cromossomo está da solução ótima do problema. Assim, a função de adequação faz, no algoritmo genético, o mesmo papel que o meio ambiente faria com os organismos vivos: fornece o grau de adaptação do organismo (cromossomo) ao ambiente e este valor será usado no processo de seleção para reprodução.

### **2.5.2. O Algoritmo**

O algoritmo, proposto por Holland, é conhecido na literatura como *Simple Genetic Algorithm* ou *Standard Genetic Algorithm* ou simplesmente pela sigla SGA. Pode-se descrever o algoritmo, sucintamente, em seis passos [8]:

- 1) Inicie uma população, de tamanho  $N$ , com cromossomos gerados aleatoriamente;
- 2) Aplique a função de adequação em cada cromossomo desta população;

- 3) Crie novos cromossomos através de cruzamentos de cromossomos selecionados desta população. Aplique recombinação e mutação nestes cromossomos;
- 4) Elimine membros da antiga população, de modo a ter espaço para inserir estes novos cromossomos, mantendo a população com o mesmo número  $N$  de cromossomos;
- 5) Aplique a função de adequação nestes cromossomos e insira-os na população;
- 6) Se a solução ideal for encontrada ou, se o tempo (ou número de gerações) se esgotou, retorne o cromossomo com a melhor adequação. Caso contrário, volte ao passo 3.

Se tudo ocorrer bem, esta simulação do processo evolutivo irá produzir, à medida que as gerações forem se sucedendo, cromossomos cada vez mais bem adaptados, isto é, com melhor valor da função de adequação, de maneira que, no final, obtém-se uma solução (cromossomo) com alto grau de adequação ao problema proposto.

Valores típicos para o tamanho da população estão entre 20 e 200.

### **2.5.3. Codificação da Solução**

Como mencionado, o melhor método para trabalhar com o AG é codificar os parâmetros de uma possível solução do problema em uma cadeia de bits de 0's e 1's [17]. Isso permite uma manipulação fácil e eficiente dos operadores genéticos sobre estes cromossomos. Números reais, ao invés de cadeias de bits, podem ser usados com alterações nos operadores de reprodução [26].

Quando os parâmetros do problema são inteiros, a representação é direta. Por exemplo, se um parâmetro inteiro estiver restrito ao intervalo  $[-121, 113]$  pode-se usar uma cadeia, ou parte dela, com 8 bits reservados para este parâmetro (1 de sinal e 7 para a amplitude  $2^7 = 128$ ).

No caso de parâmetros com valores reais, pode-se trabalhar com sua representação em formato inteiro. Por exemplo, se um parâmetro do problema variar na faixa de  $[2.12$  a  $15.72]$ , com precisão de duas casas decimais, pode-se multiplicá-lo por 100 e utilizar a parte inteira do produto. Dessa forma, recai-se no caso anterior.

<i>Gene 1</i>				<i>Gene 2</i>					<i>Gene n</i>			
1	0	1	0	1	1	0	1	...	0	0	0	1

**Figura 2.3 - Um Cromossomo representando um possível vetor solução.**

#### **2.5.4. A Função de Adequação**

A função de adequação tem o papel de ligar o algoritmo genético ao problema propriamente dito. Ela é usada para avaliar o cromossomo para posterior uso pelos operadores de reprodução. A função de adequação possui como entrada uma cadeia de bits e como saída um valor real.

Deve-se notar que é necessário dispor de algum modo para avaliar o quão distante um cromossomo está da solução ideal, o que nem sempre é uma tarefa trivial. Este processo de adequação pode, dependendo da complexidade do problema, ser exato ou não. Nos casos de grande complexidade, alguma heurística poderá ser utilizada.

A função de adequação se diz normalizada quando seus valores estão sempre dentro do intervalo  $[0,1]$ . Isto significa que um cromossomo com valor de adequação 1 (o

maior valor) é a melhor solução possível. Portanto, este cromossomo é a resposta do problema. No caso oposto, um valor 0 (zero) representaria a pior solução possível.

Não é necessário, contudo, que a função seja normalizada, pois, basicamente, é uma função de comparação de cromossomos e, o que interessa, na verdade, são os valores relativos entre um cromossomo e os outros. Para facilitar o algoritmo de seleção é necessário que a função de adequação nunca apresente valores negativos [17] [24].

### 2.5.5. Seleção

O processo de seleção ocorre após a aplicação da função de adequação nos cromossomos. Ela desempenha o papel da seleção natural na evolução, selecionando para sobreviver e reproduzir os organismos melhores adaptados ao meio, no caso, os cromossomos com melhor valor na função de adequação.

A maneira pela qual os cromossomos são selecionados para reprodução pode variar, dependendo do método utilizado. Entretanto, é certo que os cromossomos melhor adaptados terão, necessariamente, uma probabilidade maior de sobrevivência e reprodução que os de baixa função de adequação [17] [24]. Existem várias formas ou tipos de seleção, dos quais

podemos destacar:

- Seleção proporcional: cada configuração tem direito de gerar um número de descendentes que é proporcional ao valor de sua função de adaptação, de acordo com a relação:

$$N^{\circ} \text{ de descendentes} = \frac{\text{função de adequação}}{\text{média da função objetivo}}$$

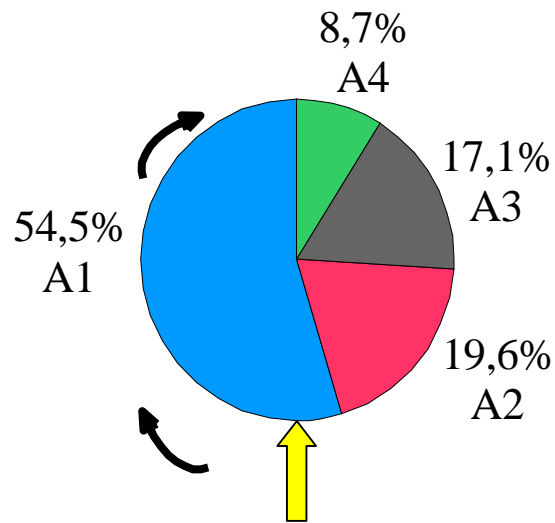


A relação anterior não encontra números inteiros, o que não faz sentido porque o número de descendentes deve ser inteiro. Este problema é resolvido usando a roleta, onde a cada configuração é designada uma parcela da roleta proporcional ao número de descendentes. Gera-se então um número aleatório entre 0 e  $2\pi$  que permite identificar uma região da roleta e a configuração que corresponde a essa região que deve ter direito a gerar um descendente. O processo se repete  $n$  vezes até terminar a seleção.

Exemplo de seleção proporcional:

Cromossomo	$x$	$f(x)=x^2$	Prob.Seleção
A1 = 11001	25	625	54,5 %
A2 = 01111	15	225	19,6 %
A3 = 01110	14	196	17,1 %
A4 = 01010	10	100	8,7 %

Probabilidade de seleção proporcional à aptidão  $p_i = \frac{f(x_i)}{\sum_{k=1}^N f(x_k)}$

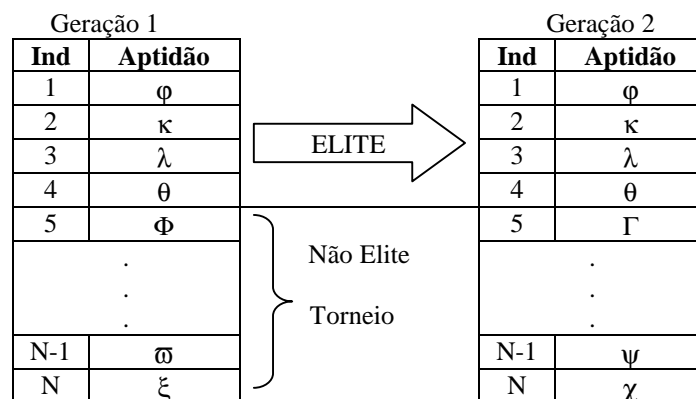


**Figura 2.4 - Exemplo de seleção por roleta.**

- Seleção usando escalonamento linear: consiste em realizar uma transformação linear das funções de adaptação para melhorar a seletividade do processo para solucionar problemas de aparecimento de super configurações nas fases iniciais do processo e a perda de seletividade nas fases finais do mesmo. O processo deve ser terminado usando qualquer proposta de seleção proporcional.
- Seleção usando ordenamento: o número de descendentes que corresponde a cada configuração depende de uma seleção ordenada (*ranking*) das configurações em ordem decrescente dos valores das funções de adaptação para o problema de maximização e, em ordem invertida para o problema de minimização. O número de descendentes também não é inteiro e, portanto deve ser determinado usando a roleta ou uma proposta equivalente.

- Seleção usando torneio: são realizados  $n$  jogos, sendo  $n$  o tamanho da população. Em cada jogo são selecionadas aleatoriamente  $k$  configurações diferentes da população corrente e escolhida aquela com o melhor valor da função de adaptação (melhor solução). O valor  $k$  é geralmente pequeno, tipicamente  $k \notin \{2, 3, 4, 5\}$ . Após  $n$  jogos o processo de seleção é terminado.

Durante o processo de seleção pode-se utilizar algumas técnicas para a obtenção de configurações de melhor qualidade da nova população. Uma das técnicas adotadas é chamada na literatura de elitismo. O elitismo força o algoritmo genético a preservar os melhores indivíduos a cada geração, enquanto os filhos substituem os indivíduos menos adaptados. Os melhores indivíduos poderiam ser perdidos se eles não fossem selecionados para reprodução ou se eles fossem destruídos pelos operadores recombinação e mutação.



Onde:

$\varphi, \kappa, \lambda, \theta$ : Aptidões dos indivíduos elite;

$\Phi \dots \omega, \xi$ : Aptidões dos indivíduos não elite;

$\Gamma \dots \psi, \chi$ : Novas aptidões obtidas a partir dos cromossomos gerados do cruzamento da população não elite com a população elite.

**Figura 2.5 - Exemplo de seleção por torneio com elitismo.**

Durante o processo iterativo do algoritmo preservam-se aquelas configurações de melhor qualidade e diferentes para formar o conjunto de elite global  $E_{TG}$ . Para este conjunto analisam-se todas as configurações de elite locais obtidas em cada iteração, fazendo uma seleção daqueles indivíduos que possuem função objetivo de boa qualidade, e diferentes em suas configurações. O conjunto de elite global recebe configurações do conjunto de elite local que são de boa qualidade e que não estão no conjunto de elite global. Trata-se de um conjunto atualizado de melhores soluções.

### **2.5.6. Reprodução**

A reprodução é a maneira pela qual dois novos cromossomos são gerados, a partir de dois antigos. Estes dois cromossomos são copiados (portanto, os filhos, inicialmente são clones dos pais) e a seguir os operadores de recombinação e mutação vão agir sobre eles, podendo torná-los diferentes de seus pais.

O processo, portanto, depende de dois parâmetros, escolhidos a priori pelo programador/operador, e são: A probabilidade de recombinação (*crossover*), denotada por  $pc$ , e a probabilidade de mutação, denotada por  $pm$ . (Valores típicos para  $pc$  estão entre 0,5 e 1,0 e para  $pm$  entre 0,001 e 0,02) [17] [24].

#### **2.5.6.1. Recombinação**

Recombinação é o processo através do qual dois cromossomos (A e B) trocam genes, como descrito a seguir:

Um ponto do cromossomo (*locus*) é escolhido aleatoriamente. Ambos os cromossomos são quebrados neste mesmo ponto. A primeira parte do cromossomo A é

concatenada à segunda parte do cromossomo B, formando um novo cromossomo. O mesmo ocorre com as outras partes: a primeira parte do cromossomo B é ligada à segunda parte do cromossomo A, formando um segundo cromossomo. Este processo pode ser resumido através do seguinte algoritmo:

- i. Gera-se um número aleatório entre 0 e 1 ;
- ii. Se este número for menor ou igual a  $pc$ , então a recombinação irá ocorrer, caso contrário não haverá recombinação;
- iii. Escolhe-se, aleatoriamente, o ponto em que haverá a quebra;
- iv. Quebram-se os dois cromossomos neste ponto;
- v. Formam-se dois novos cromossomos juntando-se a primeira parte do cromossomo A com a segunda do cromossomo B, e a primeira parte do cromossomo B com a segunda parte do cromossomo A, conforme figura 2.6.

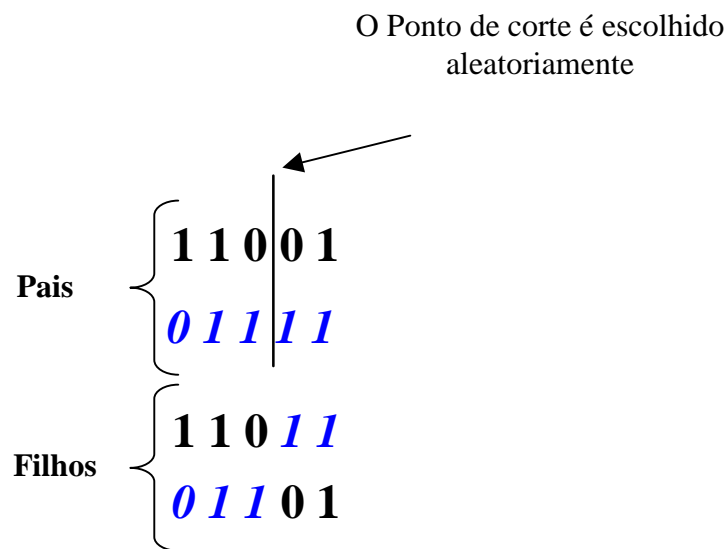


Figura 2.6 - Recombinação Simples.

Pode-se também quebrar os cromossomos em dois ou mais pontos. Denomina-se recombinação simples ou tradicional quando o cromossomo é quebrado em um ou dois pontos.

A recombinação *multiponto* ocorre quando os cromossomos são quebrados em  $k$  segmentos ( $k > 2$ ), e estes segmentos, alternadamente, são trocados entre os dois cromossomos. O outro extremo ocorre quando todos os bits, ao invés de segmentos, são trocados, com alguma probabilidade fixada, caso em que a recombinação é denominada uniforme [17] [24].

### 2.5.6.2. Mutação

O operador de mutação pode ser aplicado, indistintamente, antes ou depois do operador de recombinação e, diferentemente da recombinação, ele irá operar usando apenas um único cromossomo.

O operador de mutação percorre todos os bits do cromossomo e, para cada bit, gera um evento com probabilidade  $pm$ ; se este evento ocorrer, o valor do bit é trocado.

Como a probabilidade  $pm$  é muito baixa, poucos cromossomos são afetados por ela [17] [24].

Um exemplo de mutação é mostrado na figura 2.7. Observa-se que apenas foi alterado o valor do terceiro bit do segundo cromossomo.

Cromossomo Antigo	Números Aleatórios	Novo Cromossomo
0 1 0 1	0,12; 0,70; 0,45; 0,92	0 1 0 1
1 1 <b>0</b> 1	0,92; 0,13; <b>0,06</b> ; 0,23	1 1 <b>1</b> 1

Figura 2.7 - Exemplo de Mutação ( $pm = 0,08$ ).

### 3. SISTEMA PROPOSTO

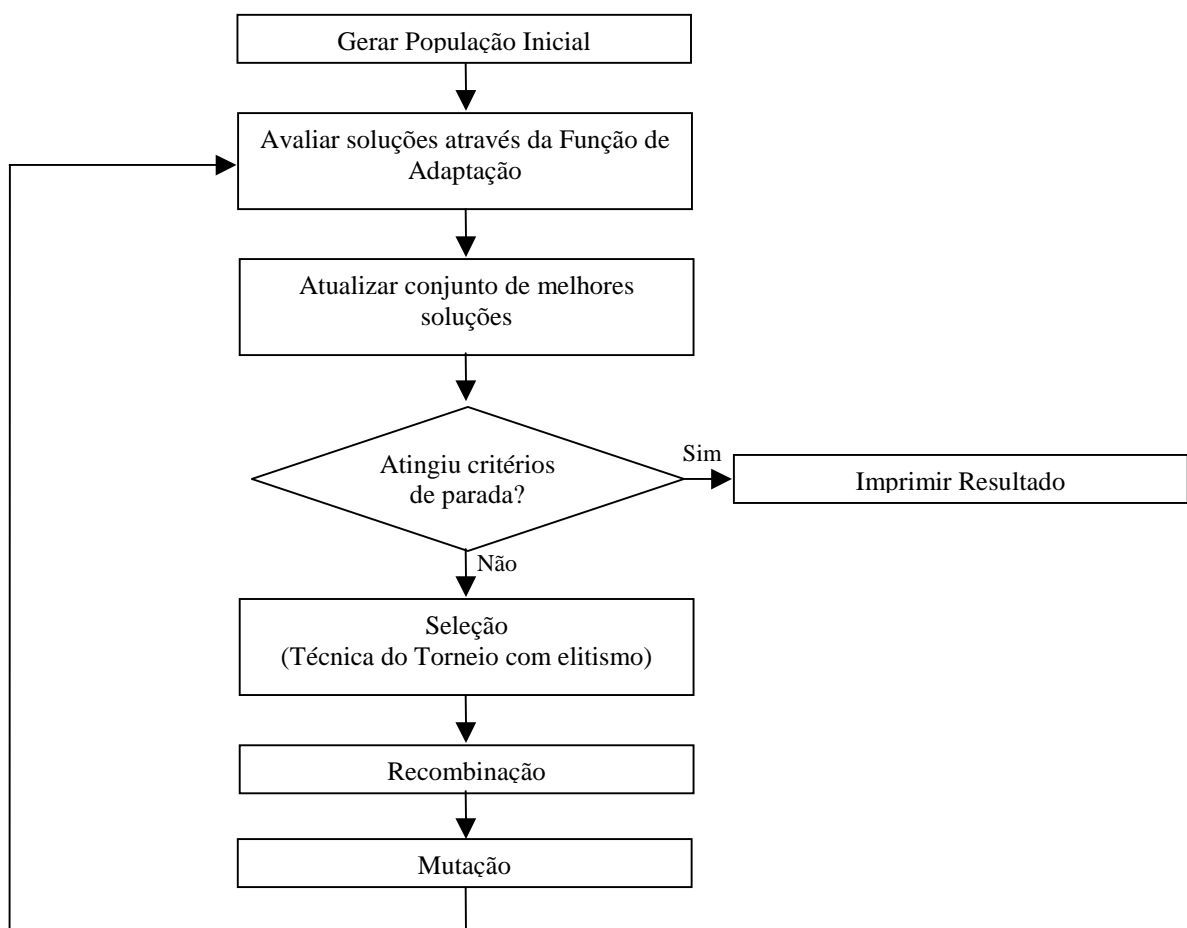
Dada a importância dos sistemas secundários de distribuição, conforme descrito na seção 2.1, e a necessidade de um planejamento sistêmico, abrangendo questões técnicas e financeiras, conforme seção 2.2, este trabalho propõe desenvolver um Algoritmo Genético de apoio à decisão, que a partir de uma configuração inicial da rede, defina as características de cabos, o posicionamento do transformador e de banco de capacitores e o faseamento das cargas, de modo a garantir limites adequados de níveis de tensão para todas as cargas, preservando os limites operativos dos equipamentos e materiais, buscando minimizar os custos operativos, dentro de uma restrição financeira conhecida.

A proposta geral do algoritmo genético implementado é apresentada a seguir:

- i) Gerar aleatoriamente uma população inicial, com base nos critérios adotados para o esquema de codificação e geração desta população;
- ii) Avaliar para cada elemento desta população a função de adaptação com base nos seguintes requisitos:
  - a) Processar o fluxo de potência trifásico a quatro fios (três fases e neutro);
  - b) Verificar os limites de queda de tensão;
  - c) Verificar a capacidade máxima de fluxo de potência no circuito secundário;
  - d) Verificar a capacidade de operação de transformação;
  - e) Verificar o máximo recurso financeiro disponível.
- iii) Armazenar o conjunto de melhores soluções;

- iv) Verificar a convergência. Se o processo convergiu, imprimir o resultado da melhor configuração encontrada;
- v) Realizar o processo de seleção utilizando o método do torneio com elitismo;
- vi) Realizar o processo de recombinação;
- vii) Realizar mutação e voltar ao passo ii.

A seguir o macrofluxograma do Algoritmo Genético proposto:



**Figura 3.1 - Macrofluxograma do Algoritmo Genético.**



### 3.1. Algoritmo Genético dedicado ao Planejamento de Redes Secundárias

Para o planejamento de circuitos secundários de distribuição, alguns aspectos envolvidos são destacados: função adaptação, sistema de codificação, seleção, recombinação, mutação, parâmetros de controle e critério de parada.

#### 3.1.1. Formulação Matemática do Problema

A formulação matemática empregada teve como base a adotada por Cossi [6], porém, algumas alterações são propostas, destacando-se a alocação de banco de capacitores e a busca por melhores níveis de tensão mesmo estando na faixa adequada de fornecimento.

Matematicamente o planejamento de circuitos secundários pode ser formulado:

$$W = \text{Min}( W_{TC_{ij}} + W_{TT_i} + W_{BS_i} + W_{BC_i} + W_{PO_{ij}} ); \quad (1)$$

$$W_{TC_{ij}} = di \sum_{i \in C} \sum_{j \in L} \left( CFC_{ij_{abcn}} + C_{kWh} \cdot T \cdot R_{ij_{abcn}} \cdot |I_{j_{abcn}}|^2 \right); \quad (1.1)$$

$$W_{TT_i} = ti \sum_{i \in N} (CFT_i); \quad (1.2)$$

$$W_{BS_i} = fi \sum_{j \in NB} \sum_{i \in P} (CFB_{j,i}); \quad (1.3)$$

$$W_{BC_j} = ic C_{BC}; \quad (1.4)$$

$$W_{PO_{ij}} = T C_{kWh} \sum_{i \in C} \sum_{j \in L} \left[ \left( R_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2 \right) (1 - ct_j) \right]; \quad (1.5)$$

s.a.

$$P_{k_{abcn}}^{in} - P_{k_{abcn}}^c - V_{k_{abcn}} \sum_{m \in k} V_{m_{abcn}} \left[ \left( \frac{R_{km_{abcn}}}{R_{km_{abcn}}^2 + X_{km_{abcn}}^2} \right) \cos \theta_{km_{abcn}} - \left( \frac{X_{km_{abcn}}}{R_{km_{abcn}}^2 + X_{km_{abcn}}^2} \right) \text{sen} \theta_{km_{abcn}} \right] = 0; \quad (2)$$

$$Q_{k_{abcn}}^{in} - Q_{k_{abcn}}^c - V_{k_{abcn}} \sum_{m \in k} V_{m_{abcn}} \left[ \left( \frac{R_{km_{abcn}}}{R_{km_{abcn}}^2 + X_{km_{abcn}}^2} \right) \text{sen } \theta_{km_{abcn}} + \left( \frac{X_{km_{abcn}}}{R_{km_{abcn}}^2 + X_{km_{abcn}}^2} \right) \text{cos } \theta_{km_{abcn}} \right] = 0; \quad (3)$$

$$k=1,2,\dots,nb;$$

$$V_{k_{abcn}}^{\min} \leq V_{k_{abcn}}^{\text{lim}} \leq V_{k_{abcn}}^{\max}; \quad (4)$$

$$|f_{km_{abcn}}| \leq \bar{f}_{km_{abcn}}; \quad (5)$$

$$\sum_{k \in NB} \sqrt{(P_{k_{abcn}}^C)^2 + (Q_{k_{abcn}}^C)^2} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in L} \sqrt{(R_{ij_{abcn}} (I_{j_{abcn}})^2)^2 + (X_{ij_{abcn}} (I_{j_{abcn}})^2)^2} \leq \sum_{i \in NT} S_{i_{abcn}}^T; \quad (6)$$

$$W \leq RF_{\max}. \quad (7)$$

Sendo:

Min() = Função minimizar;

W = Função objetivo em R\$;

$W_{TC}$  = Parcela da função objetivo relativo à Troca de Condutores;

$W_{TT}$  = Parcela da função objetivo relativo à Troca do local do Transformador;

$W_{BS}$  = Parcela da função objetivo relativo à Balanceamento da rede Secundária;

$W_{PO}$  = Parcela da função objetivo relativo as Perdas Operacionais;

$W_{BC}$  = Parcela da função objetivo relativo aos custos da implementação de Banco de Capacitores na rede secundária;

$CFC_{ij_{abcn}}$  = Custo da troca de cabos das fases  $a, b, c$  e do neutro (material e mão-de-obra);

$CFT_i$  = Custo da troca de local do transformador;

$CFB_i$  = Custo do balanceamento das cargas nas fases;

$C_{BC}$  = Custo do banco de capacitores;

$C_{kWh}$  = Custo do  $kWh$  em R\$;

$T$  = período de planejamento em dias;

$C$  = Conjunto formado pelos tipos de cabos disponíveis;

$L$  = Conjunto formado pelos ramais do circuito;

$N$  = Conjunto formado pelos possíveis locais para instalação do transformador;

$NB$  = Conjunto formado pelas barras do circuito;

$NT$  = Conjunto formado pelos transformadores existentes;

$P$  = Conjunto dos números que representam as posições das cargas nas fases;

$di$  = Variável de decisão para troca ou não de condutores (0=não, 1=sim);

$ti$  = Variável de decisão para mudança ou não da posição do transformador (0=não, 1=sim);

$fi$  = Variável de decisão para o balanceamento ou não das cargas (0=não, 1=sim);

$ic$  = Variável de decisão para a inclusão de Banco de Capacitores (0=não, 1=sim);

$ct_j$  = Variável que indica se o cabo da linha  $j$  foi substituído;

$P^{in}_{k_{abcn}}$  e  $Q^{in}_{k_{abcn}}$  = Potências ativa e reativa injetadas na barra  $k$ ;

$P^c_{k_{abcn}}$  e  $Q^c_{k_{abcn}}$  = Potências ativa e reativa consumidas pela barra  $k$ ;

$S^T_{i_{abcn}}$  = Potência aparente do transformador;

$R_{ij_{abcn}}$  = Resistência dos condutores;

$X_{ij_{abcn}}$  = Reatância dos condutores;

$\theta_{km_{abcn}}$  = Abertura angular da linha  $k-m$ ;

$V^{\text{lim}}_{k_{abcn}}$  = Tensão limiar no nó  $k$ ;

$V_{k_{abcn}}$  = Tensão calculada no nó  $k$ ;

$I_{j_{abcn}}$  = Corrente do ramo  $j$ ;

$f_{km_{abcn}}$  = Fluxo no ramo  $k-m$ ;

$\overline{f_{km_{abcn}}}$  = Máximo fluxo no ramo  $k-m$ ;

$RF_{\text{max}}$  = Recurso financeiro disponível.

**Função Objetivo:** A equação (1) representa os custos fixos e variáveis de uma rede secundária, na operação e nos investimentos para adequação, durante o período de planejamento.

A solução ótima refere-se ao menor valor obtido para esta função. Os custos fixos representam os investimentos na reestruturação do sistema, tais como cabos (equação 1.1), deslocamento de transformador (equação 1.2), balanceamento de cargas (equação 1.3) e inclusão de Banco de Capacitores (equação 1.4).

Os custos variáveis representam as despesas necessárias para operar o sistema, ou seja, as perdas de energia (equação 1.5).

**Restrição do Fluxo de Potência:** As equações (2) e (3) asseguram o balanço de demanda para cada nó do circuito, fazendo com que o fluxo líquido de potência seja nulo (Leis de Kirchhoff).

**Restrição de limites de queda de tensão:** A equação (4) representa a restrição imposta para garantir que os níveis de tensão em cada nó sejam mantidos dentro dos limites preestabelecidos pela resolução 505 da ANEEL [1].

**Restrição do máximo fluxo de potência nos ramos:** A equação (5) limita o máximo fluxo de potência a um limite chamado de “corrente admissível para regime permanente” [19], ou seja, se o fluxo superar, dentro do período planejado, o limite estabelecido para a linha, estes deverão ser penalizados.

**Restrição da capacidade de operação do transformador:** A equação (6) assegura que a capacidade total do transformador de distribuição seja suficiente para atender a demanda durante o período de planejamento.

**Restrição Financeira:** Esta restrição, equação (7), assegura que a solução ótima encontrada esteja dentro dos recursos financeiros disponíveis.

### 3.1.2. Sistema de codificação

A codificação (estrutura cromossômica) em base decimal inteira é a mais utilizada para mapear possíveis soluções para o problema de planejamento dos circuitos secundários, uma vez que desta forma, possibilitam um desempenho computacional satisfatório.

A vantagem desta forma de codificação é a de armazenar uma maior quantidade de informações, para cromossomos de mesmo tamanho, que a codificação binária e ser uma representação real das variáveis do problema.

A figura 3.2 mostra um circuito secundário e as variáveis envolvidas no problema, onde o nó de referência é o poste com transformador,  $(P_{abcn}, Q_{abcn})$  as cargas ativas e reativas instaladas nas respectivas fases em cada nó, os trechos entre nós e seus respectivos condutores.

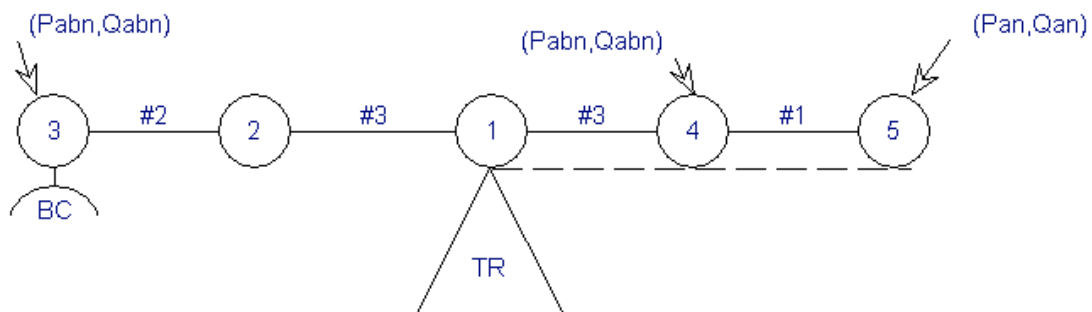


Figura 3.2 - Circuito Secundário de Distribuição.

A seguir, temos o esquema de codificação para um circuito genérico.

Cargas (balanceamento das cargas)												Cabos			TR	BC		
1			j			j+1			nb			1	nL		nó	nó		
$P_1^a$	$P_1^b$	$P_1^c$	...	$P_j^a$	$P_j^b$	$P_j^c$	$P_{j+1}^a$	$P_{j+1}^b$	$P_{j+1}^c$	...	$P_{nb}^a$	$P_{nb}^b$	$P_{nb}^c$	#	...	#	j	j
$Q_1^a$	$Q_1^b$	$Q_1^c$	...	$Q_j^a$	$Q_j^b$	$Q_j^c$	$Q_{j+1}^a$	$Q_{j+1}^b$	$Q_{j+1}^c$	...	$Q_{nb}^a$	$Q_{nb}^b$	$Q_{nb}^c$					

Figura 3.3 - Esquema de codificação para um problema qualquer.

Em um circuito qualquer tem-se:

- ✓  $P_j^a, P_j^b, P_j^c, Q_j^a, Q_j^b, Q_j^c$  : proposta de ligações das cargas ativa e reativa nas fases A, B, C para cada barra  $j$  do circuito ( $j=1, \dots, nb$ );
- ✓ As posições seguintes  $k=1, \dots, nL$  representam os condutores em cada um dos trechos  $k$  do circuito secundário;
- ✓ A penúltima posição é reservada para indicar dentre os pontos possíveis para posicionar o transformador onde o mesmo está alocado;
- ✓ A última posição indica dentre as barras possíveis para posicionar o Banco de Capacitores onde o mesmo está alocado.

Uma possível configuração inicial para o circuito da figura 3.2, através de números inteiros, representando as variáveis do problema, está ilustrada na figura 3.4.

Nó 1			Nó 2			Nó 3			Nó 4			Nó 5			Cabo/Ramo				TR	BC
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	1-2	2-3	1-4	4-5	Nó	Nó
3	2	1	2	1	3	3	2	1	2	1	3	1	2	3	3	2	3	1	1	3

Figura 3.4 - Cromossomo inicial.

Assim as cargas instaladas nas fases A, B e C são representadas pelos números 1,2 e 3. Os cabos utilizados em cada trecho do circuito são representados por números que identificam a bitola do cabo (tipo 1 - 3#4CAA, tipo 2 - 2#4CAA, etc.), conforme tabela B.2 do apêndice B. Os postes com transformador e banco de capacitores são representados pelo número do nó do circuito.

O tamanho do cromossomo está diretamente relacionado com a dimensão do circuito em estudo.

### **3.1.3. Geração da População Inicial**

A geração da população inicial é feita aleatoriamente, no entanto, pode ser implementada uma inicialização mais otimizada, utilizando métodos heurísticos construtivos, baseados em regras práticas obtidas da experiência dos técnicos e engenheiros do setor de planejamento das concessionárias e permissionárias.

No Algoritmo Genético implementado, a população inicial é gerada da seguinte forma:

Para cada barra do circuito geram-se três posições que podem ser ocupadas pelos números 1, 2 e 3, escolhidos aleatoriamente, sem repetições, representando as cargas conectadas nas fases A, B e C respectivamente;

Para cada posição representando os ramos do circuito (ramais, vãos) gera-se um número aleatório pertencente ao conjunto dos números que representam a quantidade de fases do ramo e a bitola dos cabos adotados.



Na posição representando o poste para instalação do transformador, gera-se um número aleatório pertencente ao conjunto dos números que representam os nós do circuito que possuem rede primária.

Para a posição que representa a barra onde será instalado o Banco de Capacitores, gera-se um número aleatório pertencente ao conjunto de números que representam os nós do circuito que possuam número de fases compatíveis com a quantidade de fases do capacitor a ser instalado.

#### **3.1.4. Avaliação das Configurações**

Cada indivíduo da população é avaliado de acordo com a função de adaptação a qual implicará diretamente na permanência do mesmo nas gerações futuras. No modelo de função de adaptação proposto considera-se que as restrições do suprimento da demanda (equações (2) e (3)), são atendidas através da solução de um programa de cálculo de fluxo de potência trifásico a quatro fios [30] que fornece todas as outras grandezas de interesse do circuito: magnitude de tensão nas fases *A*, *B* e *C* em todas as barras, fluxo de potência nas fases *A*, *B*, *C* e no Neutro, em todos os ramos, além das perdas totais. As demais restrições (equações (4) a (7)), dada a natureza não linear do problema, são consideradas usando funções de penalização para as soluções inactíveis, demonstrada na equação (8) a seguir:

$$\begin{aligned}
\text{fa} &= \mathbf{W} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in L} \sqrt{\left( R_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2 \right)^2 + \left( X_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2 \right)^2} + \\
&+ \text{fpv} \sum_{k \in \text{NB}} \begin{cases} \left( V_{k_{abcn}}^{\text{lim}} - V_{k_{abcn}}^{\text{cal}} \right) & , se : V_{k_{abcn}}^{\text{min}} \geq V_{k_{abcn}}^{\text{cal}} \geq V_{k_{abcn}}^{\text{max}} \\ 1 - V_{k_{abcn}}^{\text{cal}} & , se : V_{k_{abcn}}^{\text{min}} < V_{k_{abcn}}^{\text{cal}} < V_{k_{abcn}}^{\text{max}} \end{cases} + \\
&+ \text{fpt} \sum_{k \in \text{NB}} \sum_{i \in C} \sum_{j \in L} \begin{cases} S_{i_{abc}}^T - \left( \left( \sqrt{\left( P_{k_{abcn}}^C \right)^2 + \left( Q_{k_{abcn}}^C \right)^2} \right) + \sqrt{\left( R_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2 \right)^2 + \left( X_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2 \right)^2} \right) \\ 0 \end{cases} \\
, se : &\left( \sum_{k \in \text{NB}} \sqrt{\left( P_{k_{abcn}}^C \right)^2 + \left( Q_{k_{abcn}}^C \right)^2} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in L} \left( \sqrt{\left( R_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2 \right)^2 + \left( X_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2 \right)^2} \right) \right) \geq \sum_{i \in \text{NT}} S_{i_{abc}}^T + \quad (8) \\
, se : &\left( \sum_{k \in \text{NB}} \sqrt{\left( P_{k_{abcn}}^C \right)^2 + \left( Q_{k_{abcn}}^C \right)^2} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in L} \left( \sqrt{\left( R_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2 \right)^2 + \left( X_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2 \right)^2} \right) \right) < \sum_{i \in \text{NT}} S_{i_{abc}}^T \\
&+ \frac{\text{Máx}(S^T_a, S^T_b, S^T_c) - \text{Méd}(S^T_a, S^T_b, S^T_c)}{\text{Méd}(S^T_a, S^T_b, S^T_c)} + \\
&+ \begin{cases} \text{Máx}(S^T_a, S^T_b, S^T_c) - \frac{S_{i_{abc}}^T}{\text{NFT}} & , se : \text{Máx}(S^T_a, S^T_b, S^T_c) \geq \frac{S_{i_{abc}}^T}{\text{NFT}} \\ 0 & , se : \text{Máx}(S^T_a, S^T_b, S^T_c) < \frac{S_{i_{abc}}^T}{\text{NFT}} \end{cases} + \\
&+ \text{fpf.} \sum_{j \in L} \begin{cases} |f_{j_{abcn}}| & , se : |f_{j_{abcn}}| \geq \bar{f}_{j_{abcn}} \\ 0 & , se : |f_{j_{abcn}}| < \bar{f}_{j_{abcn}} \end{cases} + \\
&+ \text{fprf.} \sum_{j \in L} \begin{cases} W & , se : W \geq RF_{\text{max}} \\ 0 & , se : W < RF_{\text{max}} \end{cases}
\end{aligned}$$

Onde:

$W$  = Função Objetivo em R\$, definida pela equação (1);

$R_{ij_{abcn}}$  = Resistência dos condutores;

$X_{ij_{abcn}}$  = Reatância dos condutores;

$I_{j_{abcn}}$  = Corrente de ramo;

$R_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2$  = Perda ativa do sistema;

$X_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2$  = Perda reativa do sistema;

$V_{k_{abcn}}^{lim}$  = Tensão limiar  $V_{k_{abcn}}^{min}$  ou  $V_{k_{abcn}}^{max}$ , sendo  $V_{k_{abcn}}^{min}$  se  $V_{k_{abcn}}^{cal} < V_{k_{abcn}}^{min}$  ou  $V_{k_{abcn}}^{max}$  se  $V_{k_{abcn}}^{cal} > V_{k_{abcn}}^{max}$

$V_{k_{abcn}}^{cal}$  = Tensão calculada;

$f_{j_{abcn}}$  = Fluxo no ramo  $j$ ;

$\overline{f_{j_{abcn}}}$  = Máximo fluxo no ramo  $j$ ;

$P^c_{k_{abcn}}$  e  $Q^c_{k_{abcn}}$  = Potências ativa e reativa consumidas pela barra  $k$ ;

$S^T_{i_{abcn}}$  = Potência aparente do transformador;

$Máx(S^T_a, S^T_b, S^T_c)$  = Máxima potência aparente das fases A, B e C do transformador;

$Méd(S^T_a, S^T_b, S^T_c)$  = Média das potências aparente das fases A, B e C do transformador;

$C$  = Conjunto formado pelos tipos de cabos disponíveis;

$L$  = conjunto formado pelos ramais do circuito;

$NB$  = Conjunto formado pelas barras do circuito;

$NT$  = Conjunto formado pelos transformadores existentes;

$RF_{max}$  = Recurso financeiro disponível;

$NFT$  = Quantidade de fases secundárias do transformador;

$fpt$  = Penalização da restrição do transformador;

$fvp$  = Penalização da restrição dos limites de tensão;

$fpp$  = Penalização da restrição do fluxo de potência;

$fprf$  = Penalização da restrição financeira.

Conforme mencionado anteriormente para avaliar-se cada indivíduo da população é necessário processar um programa de cálculo de fluxo de potência. O fluxo de potência é uma ferramenta auxiliar, porém de suma importância na metodologia proposta para planejamento de redes secundárias. Foi escolhido o Fluxo de Potência Trifásico a quatro fios, pois fornece um resultado de boa qualidade, conforme detalhado na próxima seção.

### **3.1.5. Fluxo de potência Trifásico a quatro Fios**

O método para o cálculo do fluxo de potência adotado utiliza o modelo trifásico a quatro fios (3 fases e neutro), para a solução de redes de distribuição radial e/ou fracamente malhada, usando formulações básicas das leis de Kirchhoff [30]. Este método apresenta características de convergência adequada para o problema sob estudo e é estável numericamente. A seguir, descreve-se o método do fluxo de potência utilizado para redes de distribuição radial e em seguida para redes de distribuição fracamente malhada.

Para facilitar a aplicação do método os ramos são numerados começando pelo nó raiz e ordenados por camada, conforme ilustrado na Figura 3.5.

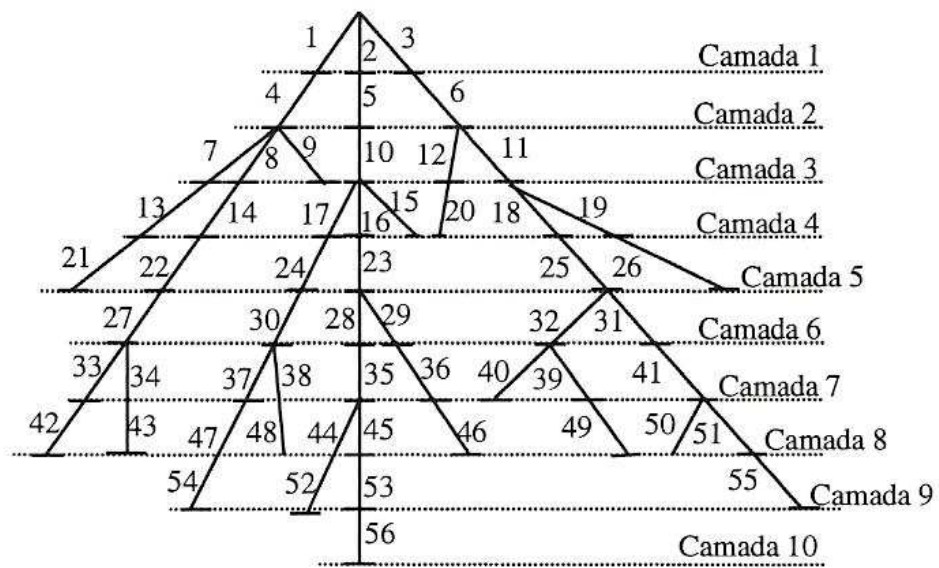


Figura 3.5 - Rede de Distribuição Radial.

Sendo:

- $n$ : Número de nós;
- $b$ :  $n-1$  ramos;
- $L$ : Ramo;
- $L1$ : Nó inicial do ramo;
- $L2$ : Nó final do ramo.

A Figura 3.6, representa a seção de uma linha (ramo l) em uma rede trifásica.

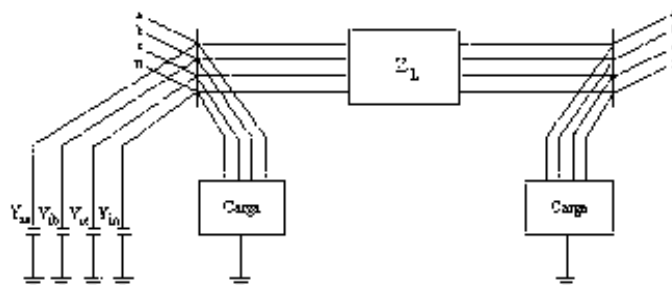


Figura 3.6 - Seção de uma linha (ramo l).

A matriz de impedância série ( $Z$ ) para a seção da linha da figura 3.6, pode ser representada por:

$$Z_L = \begin{bmatrix} Z_{aa,L} & Z_{ba,L} & Z_{ca,L} & Z_{na,L} \\ Z_{ab,L} & Z_{bb,L} & Z_{cb,L} & Z_{nb,L} \\ Z_{ac,L} & Z_{bc,L} & Z_{cc,L} & Z_{nc,L} \\ Z_{an,L} & Z_{bn,L} & Z_{cn,L} & Z_{nn,L} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

O processo iterativo para o cálculo do fluxo de potência, consiste em adotar valores de tensão e ângulo para o nó de referência e atribuir valores de tensão para todos os outros nós do sistema. Todo o processo para o cálculo do fluxo de potência é descrito a seguir [4]:

- i. O processo começa com o cálculo da injeção de corrente para cada nó da rede conforme equação (10).

$$\begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ib} \\ I_{ic} \end{bmatrix}^{(K)} = \begin{bmatrix} (S_{ia} / V_{ia}^{(K-1)})^* \\ (S_{ib} / V_{ib}^{(K-1)})^* \\ (S_{ic} / V_{ic}^{(K-1)})^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ia}^* & & \\ & Y_{ib}^* & \\ & & Y_{ic}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix}^{(K)}; \quad (10)$$

$$[I_{in}]^{(K)} = -[(I_{ia} + I_{ib} + I_{ic})]^{(K)}.$$

Sendo:

$I_{i,abcn}$  : Injeção de corrente no nó  $i$ ;

$S_{i,abcn}$  : Injeção de potência especificada no nó  $i$ ;

$V_{i,abcn}$  : Tensão no nó  $i$ ;

$Y_{i,abcn}$  : Admitância de todos os elementos *shunts* conectados no nó  $i$ ;

$K$  : Contador do número de iterações;

$*$  : Operador complexo conjugado.

- ii. Em seguida, partindo dos ramos da última camada em direção às camadas conectadas ao nó de referência, calcula-se as correntes em cada ramo fazendo-se a soma da corrente do próprio nó com a corrente de todos os ramos que derivam até o mesmo nó, conforme equação (11).

$$\begin{bmatrix} J_{La} \\ J_{Lb} \\ J_{Lc} \\ J_{Ln} \end{bmatrix}^{(K)} = - \begin{bmatrix} J_{La} \\ J_{Lb} \\ J_{Lc} \\ J_{Ln} \end{bmatrix}^{(K)} + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} J_{ma} \\ J_{mb} \\ J_{mc} \\ J_{mn} \end{bmatrix}^{(K)}. \quad (11)$$

Sendo:

$J_{L,abcn}$  : Fluxos de corrente na respectiva seção da linha;

$m$  : linhas da seção conectados ao nó  $J$ .

Obs: o sinal negativo na equação 11 é para ficar consistente com a injeção de corrente em 10.

- iii. Em seguida, partindo-se do nó de referência em direção às últimas camadas, calcula-se a nova tensão para cada nó de acordo com a tensão dada pela equação (12).

$$\begin{bmatrix} V_{Ja} \\ V_{Jb} \\ V_{Jc} \\ V_{Jn} \end{bmatrix}^{(K)} = \begin{bmatrix} V_{ta} \\ V_{tb} \\ V_{tc} \\ V_{tn} \end{bmatrix}^{(K)} - \begin{bmatrix} Z_{aa,L} & Z_{ba,L} & Z_{ca,L} & Z_{na,L} \\ Z_{ab,L} & Z_{bb,L} & Z_{cb,L} & Z_{nb,L} \\ Z_{ac,L} & Z_{bc,L} & Z_{cc,L} & Z_{nc,L} \\ Z_{an,L} & Z_{bn,L} & Z_{cn,L} & Z_{nn,L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{La} \\ J_{Lb} \\ J_{Lc} \\ J_{Ln} \end{bmatrix}^{(K)} \quad (12)$$

Sendo:

$Z_{ii}$  : Impedância própria da fase  $i$  do ramo  $L$ ;

$Z_{ji}$  : Impedância mútua entre as fases  $i$  e  $j$  do ramo  $L$ ;

$J_{L,abcn}$  : Nó receptor e emissor do ramo  $L$ .

- iv. Por fim, utiliza-se como critério de convergência a variação das potências ativa e reativa dos nós da rede. As variações das potências ativa e reativa em cada nó, para todas as fases e neutro, são calculadas de acordo com a equação (13).

$$\begin{aligned} \Delta S_{ia}^{(K)} &= V_{ia}^{(K)} \cdot (I_{ia}^{(K)})^* - Y_{ia}^* |V_{ia}|^2 - S_{ia} ; \\ \Delta S_{ib}^{(K)} &= V_{ib}^{(K)} \cdot (I_{ib}^{(K)})^* - Y_{ib}^* |V_{ib}|^2 - S_{ib} ; \\ \Delta S_{ic}^{(K)} &= V_{ic}^{(K)} \cdot (I_{ic}^{(K)})^* - Y_{ic}^* |V_{ic}|^2 - S_{ic} ; \\ \Delta S_{in}^{(K)} &= V_{in}^{(K)} \cdot (I_{in}^{(K)})^* - Y_{in}^* |V_{in}|^2 - S_{in} . \end{aligned} \quad (13)$$

O processo retorna para o cálculo das injeções de corrente nos nós e todo o processo se repete até que  $\Delta S_{i,abcn}^{(K)}$  esteja dentro de uma tolerância especificada.



### 3.1.5.1. Redes de Distribuição Fracamente Malhada

O algoritmo desenvolvido para redes radiais não pode ser aplicado diretamente para redes fracamente malhadas, é necessário primeiramente transformá-las em uma configuração radial aplicando alguns conceitos da teoria de circuitos com vistas a quebrar as interconexões da rede, criando os chamados *breakpoints* (pontos de ruptura). As correntes dos ramos interrompidos pela criação desses *breakpoints* serão substituídas por injeções de correntes em ambos os seus nós finais, com polaridade oposta, sem afetar as condições de operação do sistema. A partir do cálculo das correntes dos *breakpoints* de cada malha, determinam-se a variação das tensões dos nós da abertura dos *breakpoints*, para cada iteração até a convergência, ou seja, até que a variação dessas tensões seja menor ou igual a uma tolerância preestabelecida.

Assim como para redes de distribuição radiais, para facilitar a aplicação do método os ramos de uma rede fracamente malhada são numerados começando pelo nó raiz e ordenados por camada, conforme ilustrado na Figura 3.7.

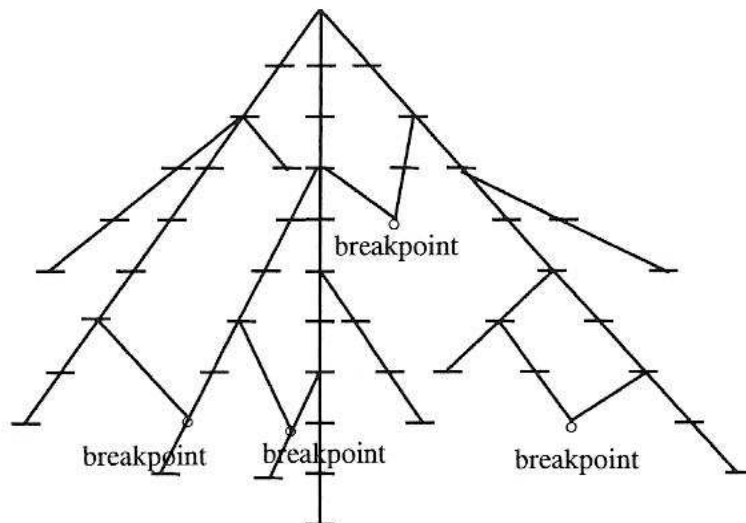


Figura 3.7 - Rede de distribuição fracamente malhada.

Todo o processo para o cálculo do fluxo de potência para redes fracamente malhada é descrito a seguir:

- i. Quebrar laço, formando os chamados *breakpoints*: o sistema passa a ter a estrutura de uma rede radial;
- ii. Injetar corrente nos dois nós criados com a quebra do laço com polaridades opostas de acordo com as equações (14) e (15), como mostra a Figura 3.8. As correntes nas outras barras serão zero;

$$\begin{bmatrix} I_{j1a} \\ I_{j1b} \\ I_{j1c} \end{bmatrix}^{(K)} = - \begin{bmatrix} I_{ja} \\ I_{jb} \\ I_{jc} \end{bmatrix}^{(K)} . \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} I_{j2a} \\ I_{j2b} \\ I_{j2c} \end{bmatrix}^{(K)} = \begin{bmatrix} I_{ja} \\ I_{jb} \\ I_{jc} \end{bmatrix}^{(K)} . \quad (15)$$

Sendo:

$J1$  e  $J2$  : *Breakpoints* (nós) criados com a quebra da interconexão do nó

$j, j=1, 2 \dots np$ ;

$I_{J1_{abcn}}$  e  $I_{J2_{abcn}}$  : Injeção de corrente nos nós  $j_1$  e  $j_2$ , respectivamente;

$J_j$  : Corrente de *breakpoint*;

$nb$  : Número total de *breakpoints*.

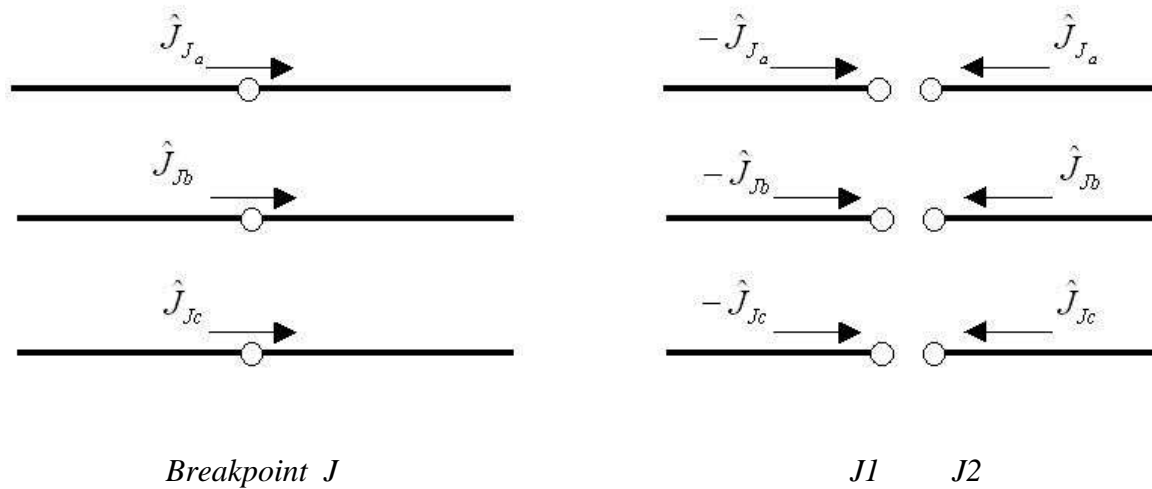


Figura 3.8 - Representação dos breakpoints usando injeção de corrente nodal.

- iii. Formar matriz impedância dos *breakpoints* ( $Z_{abc}^B$ ) de acordo com a equação (16).

Em nosso algoritmo,  $Z_{abc}^B$  é formado e construído no começo, antes de qualquer iteração;

$$\begin{bmatrix} V_1^B \\ V_1^B \\ \vdots \\ V_{nb1}^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1l} & \cdots & Z_{li} & \cdots & Z_{lp} \\ Z_{jl} & \cdots & Z_{ji} & \cdots & Z_{jp} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{pl} & \cdots & Z_{pi} & \cdots & Z_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_j \\ \vdots \\ J_p \end{bmatrix}. \quad (16)$$

- De acordo com a equação (16), a coluna  $J$  será igual ao vetor de tensão *breakpoint* para  $J_j=1$  e  $J_i=0$ , com  $i = 1, 2, \dots, nb$  e  $i \neq j$ .
  - Isto corresponde à aplicação de 1 pu de corrente de *breakpoint*  $J$  com todas as cargas e fontes removidas, o que é equivalente a injeção de corrente de 1 pu com polaridade oposta nos dois nós do *breakpoint*, equações (14) e (15).
- iv. Processar fluxo de potência para uma rede radial: processa-se o fluxo de potência calculando as equações apresentadas para uma rede radial considerando todos os nós da rede, incluindo os *breakpoints*;

- v. Teste de convergência: além do teste de convergência normal para uma rede radial, para os *breakpoints* deve-se calcular também a variação das tensões ( $\Delta V_{J1,2_{abc}}^B$ ) nos nós de cada *breakpoint*, como ilustra a equação (17):

$$[\Delta V_{J1,2_{abc}}^B]^{(K)} = [Z_{abc}^B][J_{J_{abc}}]^{(K)}. \quad (17)$$

Sendo:

$\Delta V_{J1,2_{abc}}^B$  : vetor das tensões da abertura dos *breakpoints* do circuito;

$Z_{abc}^B$  : matriz não-esparsa das impedâncias de *breakpoints*;

$J_{abc}$  : vetor das correntes de *breakpoints*.

Neste caso:

- Se  $\Delta V_{J1,2_{abc}}^B \leq$  referência, processo convergido;
- Caso contrário, atualizar as correntes dos *breakpoints* de acordo com as equações (18) e (19). Continuar o processo até todas as variações das tensões dos *breakpoints* serem menores que a tolerância preestabelecida.

$$I_{J1_{abc}} = I_{J1_{abc}} - J_{abc}. \quad (18)$$

$$I_{J2_{abc}} = I_{J2_{abc}} + J_{abc}. \quad (19)$$

A figura 3.9 ilustra a estrutura do algoritmo do fluxo de carga implementado para redes de distribuição radiais e/ou fracamente malhada.

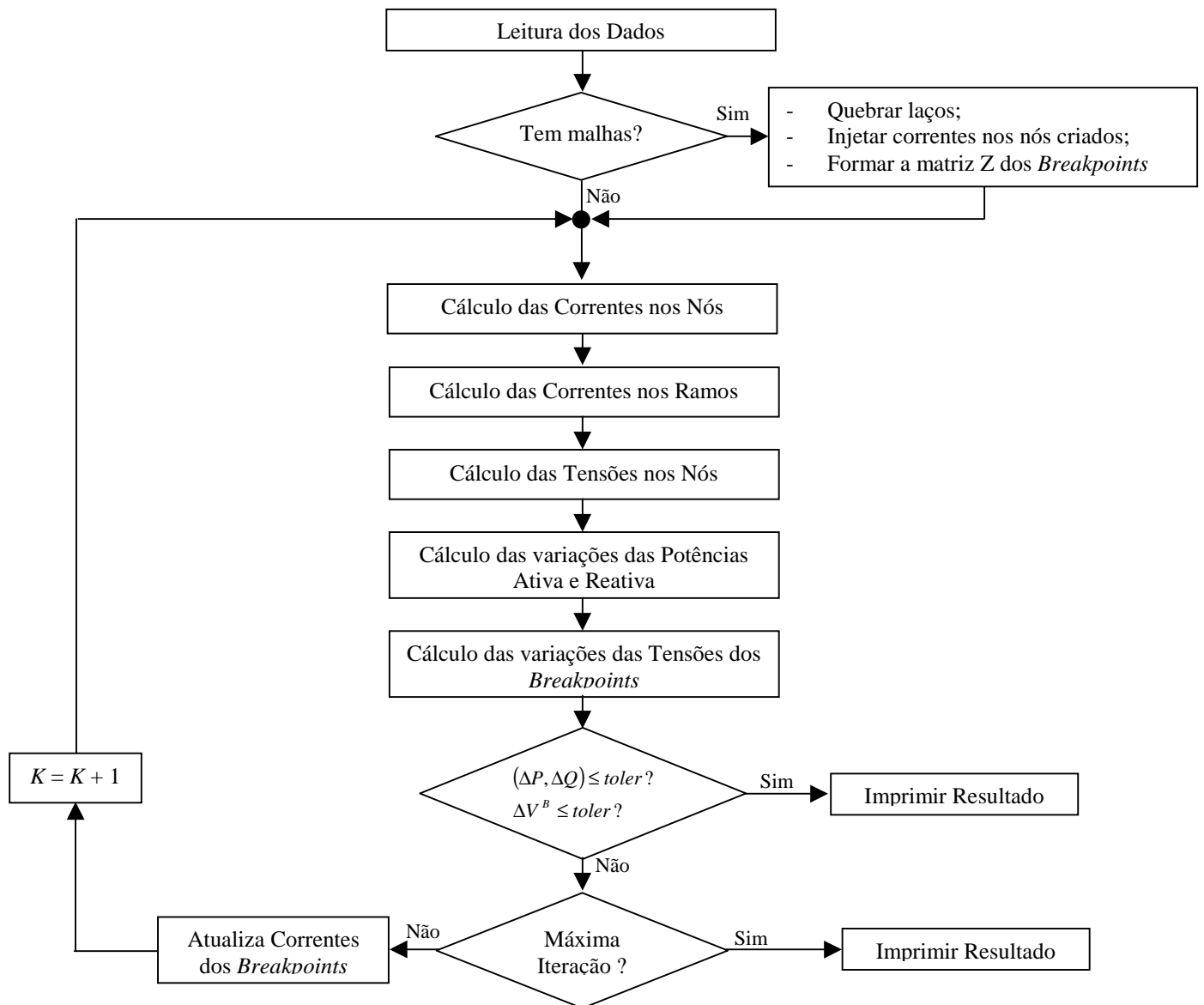


Figura 3.9 - Algoritmo de fluxo de carga implementado para redes radiais e/ou fracamente malhada.

### 3.1.6. Seleção

Para selecionar as melhores configurações, utilizou-se a técnica do elitismo, onde, da população corrente, são separadas uma porcentagem ( $x\%$ ) das melhores configurações, formando o conjunto de configurações de elite. A seleção então foi realizada no conjunto formado pelas configurações da população que não são de elite,  $((1-x\%).tp)$  ( $tp$ : tamanho da população).

Para tal utilizou-se a técnica de torneio, onde são realizados  $n$  jogos, sendo  $n$  o tamanho da população que não são de elite. Em cada jogo foram selecionadas aleatoriamente três configurações diferentes e escolhida aquela com o melhor valor da função de adaptação (melhor solução), formando assim uma nova população intermediária que irão se recombinar com as configurações de elite, escolhidas aleatoriamente. O mecanismo de torneio foi escolhido pela vantagem do pequeno esforço computacional realizado. Elimina os problemas existentes na seleção proporcional já que a seleção por torneio não depende dos valores exatos da função objetivo de cada configuração.

### 3.1.7. Recombinação

O processo de recombinação utilizado é a recombinação de um único ponto para cada um dos diferentes tipos de variáveis (balanceamento de cargas, bitola de condutores, posição do transformador e posição do Banco de Capacitores), mapeados pela estrutura do cromossomo. Ou seja, a parcela de uma configuração é trocada com a parcela correspondente da outra configuração do mesmo par selecionado de acordo com a taxa de recombinação  $pc$  preestabelecida. Sendo os pares escolhidos de maneira aleatória.

A Figura seguinte exemplifica o processo de recombinação, onde são trocadas as parcelas escolhidas como pontos de recombinação entre os pares.

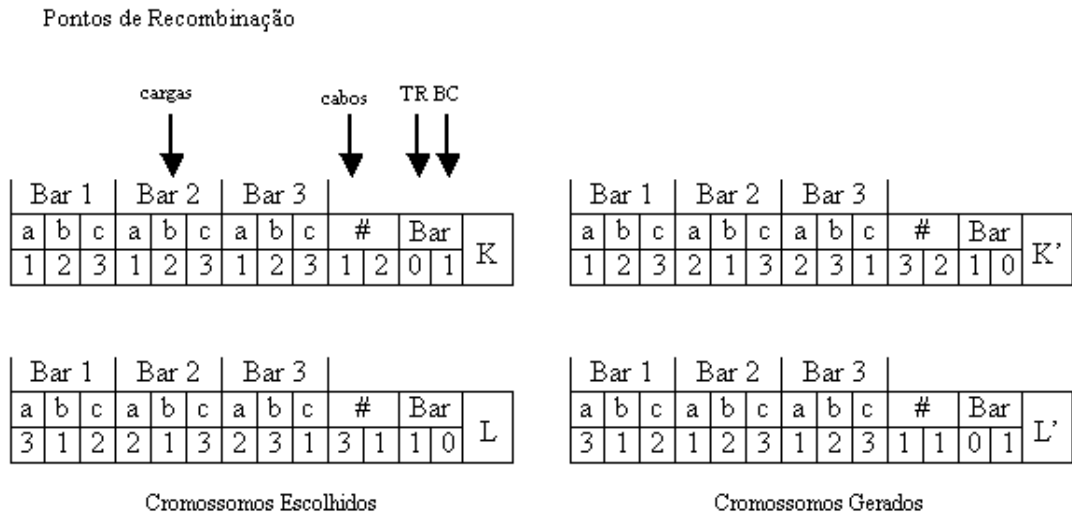


Figura 3.10 - Exemplo de Cromossomos Recombinados.

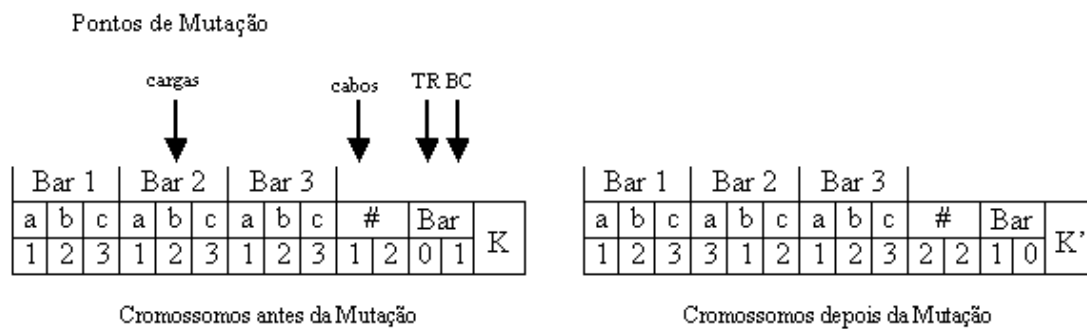
### 3.1.8. Mutação

O processo de mutação adotado é do tipo indutivo em que se efetua uma alteração no cromossomo de acordo com a taxa de mutação  $pm$  preestabelecida. Para efetuar a mutação, para cada um dos setores de variáveis que compõem o cromossomo, procede-se da seguinte maneira:

- i) **Distribuição de Cargas:** realizar uma rotação nas cargas das fases A, B e C (trocar cargas das fases). Esta rotação pode ser executada em sentido horário ou anti-horário, isto acontece de forma aleatória.
- ii) **Bitola dos Cabos:** Alterar bitola do cabo, para um valor nominal acima ou abaixo da bitola existente. A decisão de aumentar ou diminuir a bitola do cabo é aleatória.

- iii) **Posição do Transformador:** Alterar a posição do transformador na rede para um poste à esquerda ou à direita do mesmo (se houver condições técnicas para isto, ou seja, se existir Rede Primária na barra em questão). Esta escolha também é de maneira aleatória.
- iv) **Posição do Banco de Capacitores:** Alterar aleatoriamente a posição do Banco de Capacitores para um poste à esquerda ou à direita do mesmo (se as condições técnicas forem satisfeitas).

A Figura 3.11, exemplifica este processo.



**Figura 3.11 - Exemplo de Cromossomo aplicando Mutação.**

### 3.1.9. Parâmetros de Controle

Os parâmetros de controle adotados para o problema (número de gerações, tamanho da população, número máximo de gerações, taxas de recombinação e mutação) foram escolhidos de acordo com o tamanho do circuito e através da análise de alguns testes.



### **3.1.10. Critérios de Parada**

O critério de parada adotado compara a melhor solução, se esta não apresenta melhoria durante um número especificado de iterações ou o número máximo de gerações é atingido, o processo é considerado convergido.

#### **4. TESTES E RESULTADOS**

Neste capítulo são demonstrados os resultados obtidos, topologia e parâmetros utilizados na avaliação de três circuitos secundários do sistema de distribuição, sendo dois hipotéticos e uma rede real.

As simulações foram realizadas considerando a possibilidade de troca de cabos nos trechos, o posicionamento do transformador em barras com rede primária existente, troca de carga entre as fases e a alocação de um banco de capacitores na rede secundária, de modo a encontrar a melhor configuração, considerando as limitações térmicas dos materiais e equipamentos e a restrição econômica imposta. O custo de operação (perda) foi calculado considerando o período de planejamento de um ano, porém, cabe salientar que este considera a perda Joule constante durante as 24 horas do dia, o que não acontece na prática, portanto, estes valores são meramente relativos.

## 4.1. Circuito 1

Do artigo [6], referência para este trabalho, foi extraído o circuito 1, que servirá como validação do algoritmo proposto. A figura 4.1 ilustra o circuito 1 carregado no programa desenvolvido, chamado *PlanRSec (Planejamento de Rede Secundária)*, que é apresentado com maiores detalhes no Apêndice A.

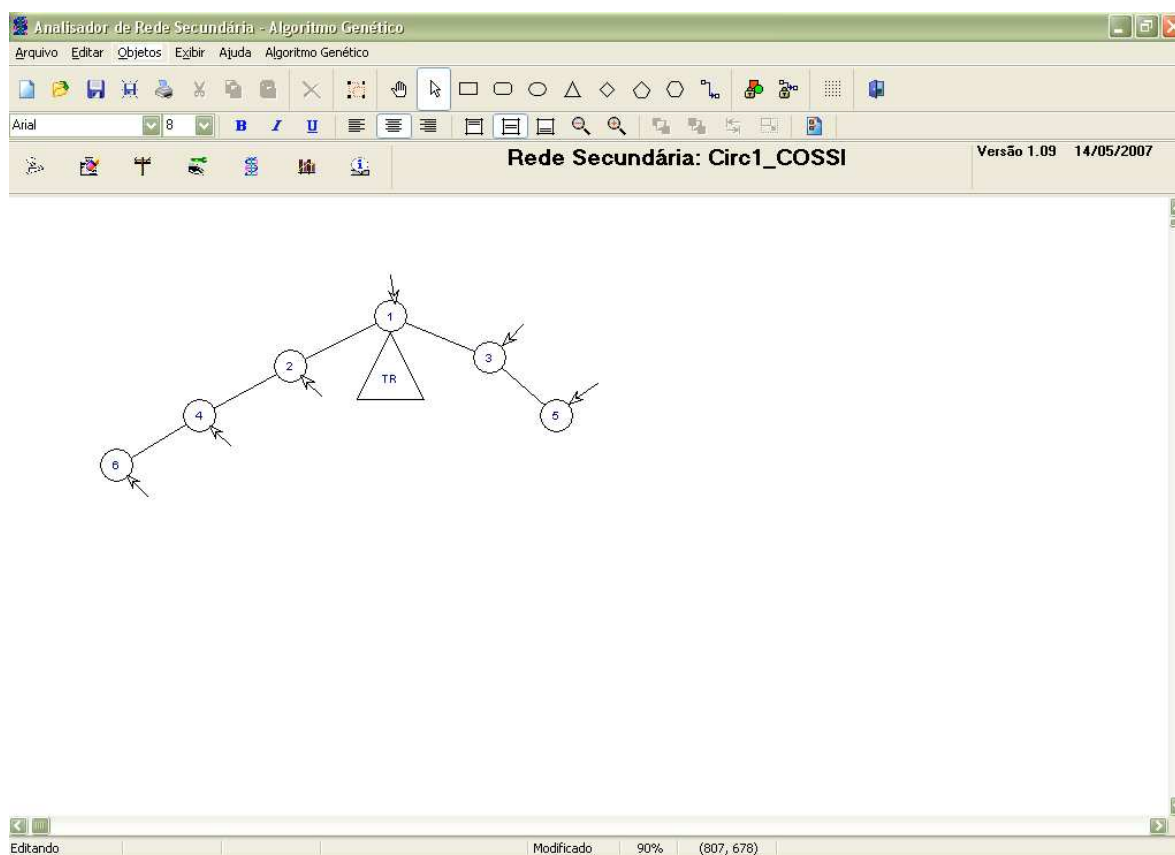


Figura 4.1 - Circuito 1.

Este circuito será simulado considerando os mesmos custos das variáveis do problema mostrado em [6].

#### 4.1.1. Comparação com Algoritmo Genético referência

Com o objetivo de validar o algoritmo desenvolvido, o *PlanRSec* foi ajustado com os mesmos parâmetros utilizados em [6], e não foi solicitado que o AG alocasse banco de capacitores e nem buscasse melhoria nos níveis de tensão dentro da faixa adequada, conforme ilustram as tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

Na tabela 4.1 temos os custos associados a cada tipo de condutor, que neste caso, limitam-se a quatro tipos, variando de 1 a 4. Quanto menor o tipo de cabo, menor é o seu custo por quilômetro, pois trata-se de um condutor mais fino. Também vemos os custos de instalação destes condutores, também definidos por quilômetro. Já os custos de troca de transformador e balanceamento de cargas são constantes, ou seja, se um destes itens for alterado este custo será agregado à função objetivo.

**Tabela 4.1 - Custos de materiais e equipamentos do circuito 1.**

<b>Cabos</b>	
<b>Bitola (Tipo)</b>	<b>Custo Fixo (U\$/Km)</b>
1	20,00
2	25,00
3	30,00
4	35,00
Instalação	800,00
<b>Transformador</b>	
<b>Custo (U\$)</b>	80,00
<b>Balanceamento das Cargas</b>	
<b>Custo (U\$)</b>	10,00
<b>Energia (kWh)</b>	
<b>Custo (U\$)</b>	0,10

Na tabela 4.2 temos os parâmetros utilizados pelo genético, destacando-se o tamanho da população, taxa de recombinação e taxa de mutação.

**Tabela 4.2 - Parâmetros do AG - circuito 1.**

<b>Parâmetros do AG</b>	
Fator de Potência	0,90
Comprimento dos vãos (Km)	0,10
Taxa de Recombinação (%)	70,00
Taxa de Mutação (%)	0,70
Tamanho da População	30
Tensão nominal do Circuito (V)	127,00
Potência Base (MVA)	100,00
Potência do Transformador (kVA)	75,00
Limite inferior permitido para tensão (pu)	0,95
Limite superior permitido para tensão (pu)	1,05
Máximo recurso financeiro disponível (pu)	80,00

A tabela 4.3 traz as características iniciais dos condutores e o poste onde o transformador está alocado.

**Tabela 4.3 - Características iniciais do circuito 1.**

<b>Tipo de Cabo Selecionado</b>		<b>Transformador</b>
<b>Ramal</b>	<b>Cabo</b>	
1-2	2	Poste 1
1-3	2	
2-4	1	
3-5	2	
4-6	2	

Na tabela 4.4 temos a distribuição inicial de cargas por fase e por poste (barra), indicando um desequilíbrio inicial de 8,62% e um carregamento de 84%.

**Tabela 4.4 - Distribuição inicial de cargas do circuito 1.**

<b>Cargas por Fase (kVA)</b>			
<b>Poste</b>	<b>Fases</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
1	3,00	2,00	2,00
2	3,00	4,00	2,00
3	6,00	0,00	0,00
4	2,00	6,00	4,00
5	3,00	3,00	4,00
6	4,00	4,00	6,00
TOTAL	21,000	19,000	18,000

A seguir são apresentados os resultados do processamento, reproduzidos nas tabelas 4.5, 4.6 e 4.7.

A tabela 4.5 mostra que o algoritmo genético não alterou os tipos de condutores e a posição do transformador no circuito 1.

**Tabela 4.5 - Característica dos cabos selecionados pelo AG.**

<b>Tipo de Cabo Selecionado</b>		<b>Transformador</b>
<b>Ramal</b>	<b>Cabo</b>	
1-2	2	Poste 1
1-3	2	
2-4	1	
3-5	2	
4-6	2	

A tabela 4.6 indica que o AG alterou a posição das cargas nas fases, procurando melhorar o equilíbrio entre elas. Com esta ação, o desequilíbrio ficou em 29,31% e o carregamento térmico do transformador em 100%.

**Tabela 4.6 - Distribuição de cargas feita pelo AG.**

<b>Cargas por Fase (kVA)</b>			
<b>Poste</b>	<b>Fases</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
1	2,0	2,0	3,0
2	3,0	2,0	4,0
3	0,0	0,0	6,0
4	2,0	6,0	4,0
5	3,0	3,0	4,0
6	6,0	4,0	4,0
TOTAL	16,0	17,0	25,0

Já a tabela 4.7, mostra que a tensão ficou dentro da faixa adequada em todas as barras.

**Tabela 4.7 - Níveis de tensão – circuito 1.**

<b>Tensão (pu)</b>			
<b>Poste</b>	<b>VA</b>	<b>VB</b>	<b>VC</b>
1	1,000	1,004	1,003
2	0,994	0,994	0,994
3	0,996	1,000	0,991
4	0,991	0,985	0,989
5	0,992	0,997	0,986
6	0,991	0,985	0,997

O artigo [6] também informa que o custo total final para esta configuração fica em U\$ 60,232.

Como pode ser observado o AG propôs como melhor solução apenas o balanceamento de cargas nas fases, o que deixaria o transformador com 16kVA, 17kVA e 25kVA nas fases A, B e C, respectivamente. Isto perfaz um desequilíbrio entre fases de 29,31% e equivale a um carregamento térmico do transformador de 100%. Os custos envolvidos nesta configuração, serviços e perdas operacionais, perfazem um custo anual de U\$ 60,232.

#### 4.1.2. Algoritmo Genético Proposto

Para efetuar a validação, foi avaliado um caso idêntico ao proposto pela referência [6], utilizando-se os mesmos parâmetros, não deixando o AG proposto alocar Banco de Capacitores, nem buscando melhorias de tensão dentro da faixa adequada. Dessa forma foi simplificado o algoritmo aqui proposto de forma a possibilitar a validação necessária.

Os custos associados aos diversos tipos de condutores, bem como o de instalação de transformador e balanceamento de cargas, foram mantidos, conforme indica a tabela 4.8.

**Tabela 4.8 - Custos de materiais e equipamentos do circuito 1.**

<b>Cabos</b>	
<b>Bitola (Tipo)</b>	<b>Custo Fixo (R\$/Km)</b>
1	20,00
2	25,00
3	30,00
4	35,00
Instalação	800,00
<b>Transformador</b>	
<b>Custo (R\$)</b>	80,00
<b>Balanceamento das Cargas</b>	
<b>Custo (R\$)</b>	20,00
<b>Capacitor</b>	
<b>Custo (R\$)</b>	0,00
<b>Energia (kWh)</b>	
<b>Custo (R\$)</b>	0,10

Os dados elétricos dos condutores acima são indicados na tabela B.1 do Apêndice B. A disposição inicial das cargas corresponde ao indicado na tabela 4.4.



A tabela 4.9 traz os parâmetros informados ao AG, que são idênticos aos da tabela 4.2 utilizada por [6].

**Tabela 4.9 - Parâmetros do AG - circuito 1.**

<b>Parâmetros do AG</b>	
Fator de Potência	0,90
Comprimento dos vãos (Km)	0,10
Taxa de Recombinação (%)	70,00
Taxa de Mutação (%)	0,70
Tamanho da População	30
Tensão nominal do Circuito (V)	127,00
Potência Base (MVA)	1,00
Potência do Transformador (kVA)	75,00
Limite inferior permitido para tensão (pu)	0,95
Limite superior permitido para tensão (pu)	1,05
Máximo recurso financeiro disponível (R\$)	160,00
Buscar melhoria de tensão mesmo estando dentro da Faixa Adequada	Não
Instalar Capacitor na Rede Secundária	Não
Capacitor Trifásico (kVAr)	0,00

Simulando o circuito 1 no algoritmo genético proposto, mantendo as configurações indicadas em [6], não solicitando ao AG alocar banco de capacitores e buscando melhoria na tensão dentro da faixa adequada, os seguintes resultados, passíveis de comparação com [6], foram obtidos:

A tabela 4.10 mostra os cabos e a posição do transformador indicado pelo algoritmo genético proposto. Ressalta-se que o AG não indicou alteração de cabos e da posição do transformador.

**Tabela 4.10 - Característica dos cabos selecionados pelo AG.**

<b>Tipo de Cabo Selecionado</b>		<b>Transformador</b>
<b>Ramal</b>	<b>Cabo</b>	
1-2	2	Poste 1
1-3	2	
2-4	1	
3-5	2	
4-6	2	

A tabela 4.11 traz a nova distribuição de cargas sugerida pelo algoritmo genético proposto, deixando o circuito com um desequilíbrio de cargas de 3,45% e um carregamento térmico de 80%.

**Tabela 4.11 - Distribuição de cargas feita pelo AG.**

<b>Cargas por Fase (kVA)</b>			
<b>Poste</b>	<b>Fases</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
1	2,00	2,00	3,00
2	3,00	4,00	2,00
3	6,00	0,00	0,00
4	2,00	6,00	4,00
5	3,00	3,00	4,00
6	4,00	4,00	6,00
<b>TOTAL</b>	<b>20,00</b>	<b>19,00</b>	<b>19,00</b>

As tensões nas barras, obtidas pela simulação com o algoritmo genético proposto, são mostradas na tabela 4.12.

**Tabela 4.12 - Níveis de tensão – circuito 1.**

<b>Tensão (pu)</b>			
<b>Poste</b>	<b>VA</b>	<b>VB</b>	<b>VC</b>
1	1,000	1,000	1,000
2	0,998	1,000	1,000
3	0,998	1,000	1,000
4	0,997	0,999	0,999
5	0,998	1,000	1,000
6	0,996	0,998	0,998

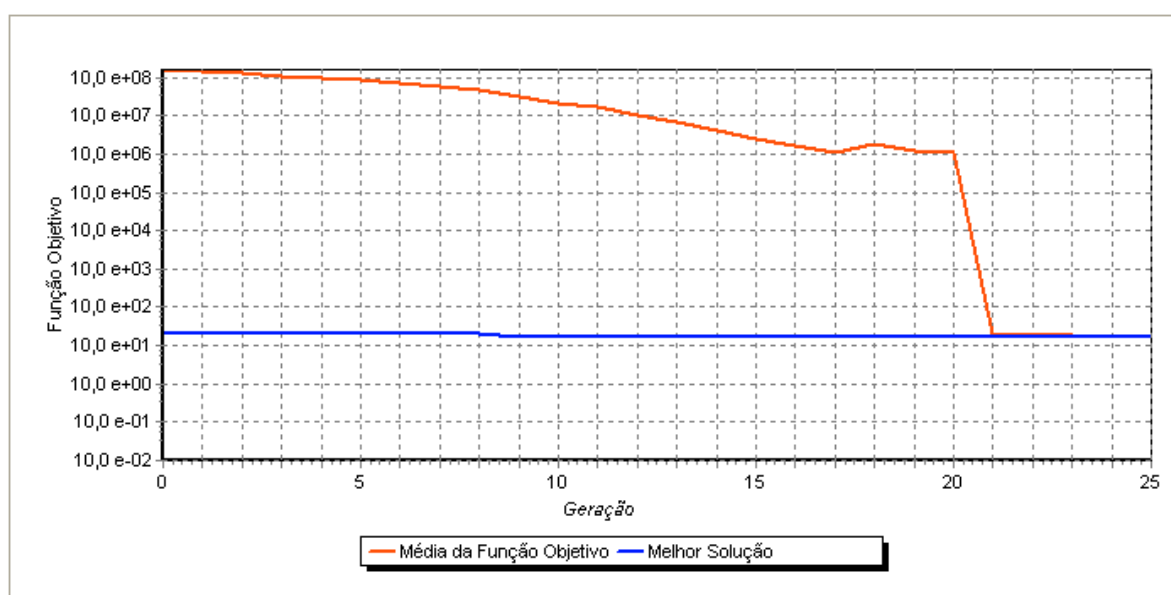
O custo total informado pelo algoritmo genético indica R\$ 129,65, sendo que destes, R\$ 119,65 são em perdas Joule.

O AG proposto, assim como o publicado em [6], sugere apenas uma realocação de cargas, o que melhora o nível de desequilíbrio e o carregamento térmico. As perdas e os níveis de tensão permanecem praticamente inalterados.

Concluimos ainda que o Algoritmo Genético desenvolvido apresenta um resultado melhor no que tange ao equilíbrio de cargas na linha (3,45% contra 29,31%) e

carregamento térmico do transformador (80% contra 100%), isto possibilita níveis melhores de tensão.

O processamento evoluiu conforme ilustra a figura 4.2, em que a série vermelha, chamada “Média da Função Objetivo”, indica a média aritmética da aptidão de todos os indivíduos da população em cada geração. A série azul, chamada “Melhor Solução”, mostra a evolução da aptidão do melhor indivíduo em cada geração. Nota-se que, como esperado, o valor da função objetivo (função de adaptação) para a melhor solução diminui ou se mantém de uma geração para a outra. Já a média, em geral diminui, porém, devido aos cruzamentos e mutações oscilam evitando mínimos locais.



**Figura 4.2 - Gráfico de evolução das iterações – Circuito 1.**

## 4.2. Circuito 2

O algoritmo genético desenvolvido propõe duas significativas alterações no trabalho de Cossi [6]: instalação de banco de capacitores na rede secundária e melhoria dos níveis de tensão dentro da faixa adequada. Esta proposta será avaliada considerando-se o mesmo circuito da seção 4.1, mantendo-se inalterados os condutores disponíveis, os custos e os parâmetros do algoritmo genético, informando ao método a possibilidade de instalação de um banco de capacitores e busca por melhores níveis de tensão dentro da faixa adequada de fornecimento.

Na figura 4.3 é ilustrada a configuração dos parâmetros no programa desenvolvido.

**Analisador de Rede Secundária - Algoritmo Genético**

### Configurações:

Geral | Parâmetros

**Cálculo:**

Tamanho da População:	População de Elite (%):	Recombinação (%):	Mutação (%):	Máximo de Gerações:
100	20,00	70,00	2,00	100
Período de Planej. (dias):	Horas de IP Mês:	Número de Soluções:	Potência Base (MVA):	Fator de Potência:
365	360	1	1,00	0,90

Considerar como Manutenção  Trocar Condutores  Posicionar Transformador  Balancear Cargas  Instalar Capacitor  
 Buscar melhora de tensão dentro da faixa adequada  Opções sem Cap.

Forçar iterações até o máximo permitido

Inst. Cabo em (R\$/Km):	Transformador (R\$):	Realocação TR (R\$):	Balanc. RS (R\$):	Capacitor (R\$):
800,00	0,00	80,00	10,00	20,00
Valor do kWh (R\$):	Recurso Disponível (R\$):	Reat. Capacitiva (kVAr):	Fases do Capacitor:	
0,10	160,00	10,00000000	3	

**Penalizações:**

Rest. Transformador:	Rest. Lim. Tensão:	Rest. Financeira:	Rest. Fluxo de Potência:
20	100	40	30

Cancela Ok

**Figura 4.3 - Configurações do AG no PlanRSec.**

As tabelas 4.13 e 4.14 detalham os parâmetros utilizados.

**Tabela 4.13 – Custos de materiais e equipamentos do circuito 2.**

<b>Cabos</b>	
<b>Bitola (Tipo)</b>	<b>Custo Fixo (R\$/Km)</b>
1	20,00
2	25,00
3	30,00
4	35,00
Instalação	800,00
<b>Transformador</b>	
<b>Custo (R\$)</b>	80,00
<b>Balanceamento das Cargas</b>	
<b>Custo (R\$)</b>	10,00
<b>Capacitor</b>	
<b>Custo (R\$)</b>	20,00
<b>Energia (kWh)</b>	
<b>Custo (R\$)</b>	0,10

**Tabela 4.14 - Parâmetros do AG - circuito 2.**

<b>Parâmetros do AG</b>	
Fator de Potência	0,90
Comprimento dos vãos (Km)	0,10
Taxa de Recombinação (%)	70,00
Taxa de Mutação (%)	2,00
Tamanho da População	100
Tensão nominal do Circuito (V)	127,00
Potência Base (MVA)	1,00
Potência do Transformador (kVA)	75,00
Limite inferior permitido para tensão (pu)	0,95
Limite superior permitido para tensão (pu)	1,05
Máximo recurso financeiro disponível (R\$)	160,00
Buscar melhoria de tensão mesmo estando dentro da Faixa Adequada	Sim
Instalar Capacitor na Rede Secundária	Sim
Capacitor Trifásico (kVAr)	10,00

Ao término da simulação efetuada no *PlanRSec*, foram obtidas, pelo algoritmo genético, as seguintes configurações para o circuito 2:

Assim como o resultado obtido para a primeira simulação, não há mudança de cabos e posição do transformador, conforme mostra a tabela 4.15. No entanto, o AG sugere a instalação de um banco de capacitor no poste 6.

**Tabela 4.15 - Característica dos cabos selecionados pelo AG.**

Tipo de Cabo Selecionado		Transformador	Capacitor
Ramal	Cabo	Poste 1	Poste 6
1-2	2		
1-3	2		
2-4	1		
3-5	2		
4-6	2		

As cargas também são balanceadas, deixando o desequilíbrio em 4,34% e o carregamento do transformador em 79,74%.

**Tabela 4.16 - Distribuição de cargas feita pelo AG.**

Poste	Cargas por Fase (kVA)		
	Fases		
	A	B	C
1	2,00	3,00	2,00
2	4,00	2,00	3,00
3	0,00	0,00	6,00
4	6,00	4,00	2,00
5	3,00	4,00	3,00
6	3,94	5,45	3,94
TOTAL	18,935	18,448	19,935

Os níveis de tensão se aproximaram mais de 1 pu, conforme mostra tabela 4.17.

**Tabela 4.17 - Níveis de tensão – circuito 2.**

Tensão (pu)			
Poste	VA	VB	VC
1	1,000	1,000	1,000
2	0,998	1,000	1,000
3	0,999	1,000	1,000
4	0,996	1,000	1,000
5	0,999	1,000	1,000
6	0,996	0,999	1,000

O custo total para a configuração indicada é de R\$ 134,51, onde o custo operacional (perda Joule) é de R\$ 104,51.

Fica comprovado que o AG proposto melhora as condições técnicas do circuito, mantendo os custos dentro da faixa estipulada.

O desequilíbrio de cargas fica em 4,34%, melhor que no circuito original (8,62%) e do que indicado em [6] (29,31%).

O carregamento térmico também é melhor, 79,74% contra 84,00% do circuito original e 100% do proposto em [6].

Os níveis de tensão ficam mais próximos de 1 pu e os custos operacionais ficam abaixo do indicado como restrição.

A evolução do processamento ocorreu conforme ilustra o gráfico abaixo, mostrando a evolução das soluções encontradas pelo algoritmo genético em cada geração. Nota-se que a resposta final foi encontrada já na 14ª geração.

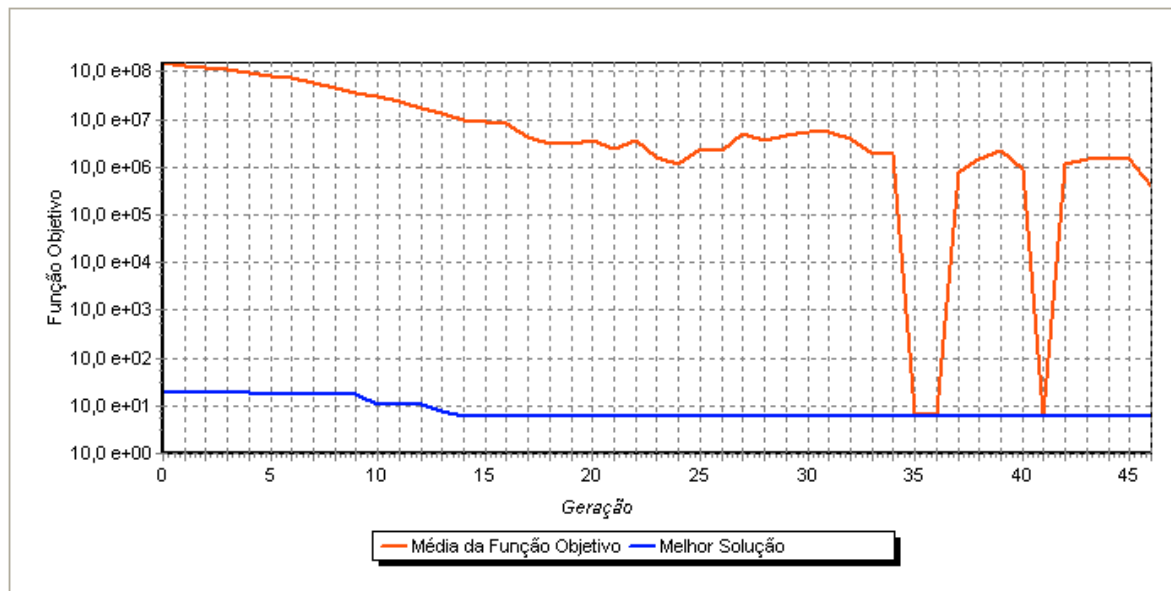


Figura 4.4 - Gráfico de evolução das iterações – Circuito 2.



### 4.3. Circuito 3

Após testar o algoritmo genético desenvolvido em redes hipotéticas, apresentamos nesta seção os resultados de simulações para um circuito real, mostrado na figura 4.5, em operação na Certaja.

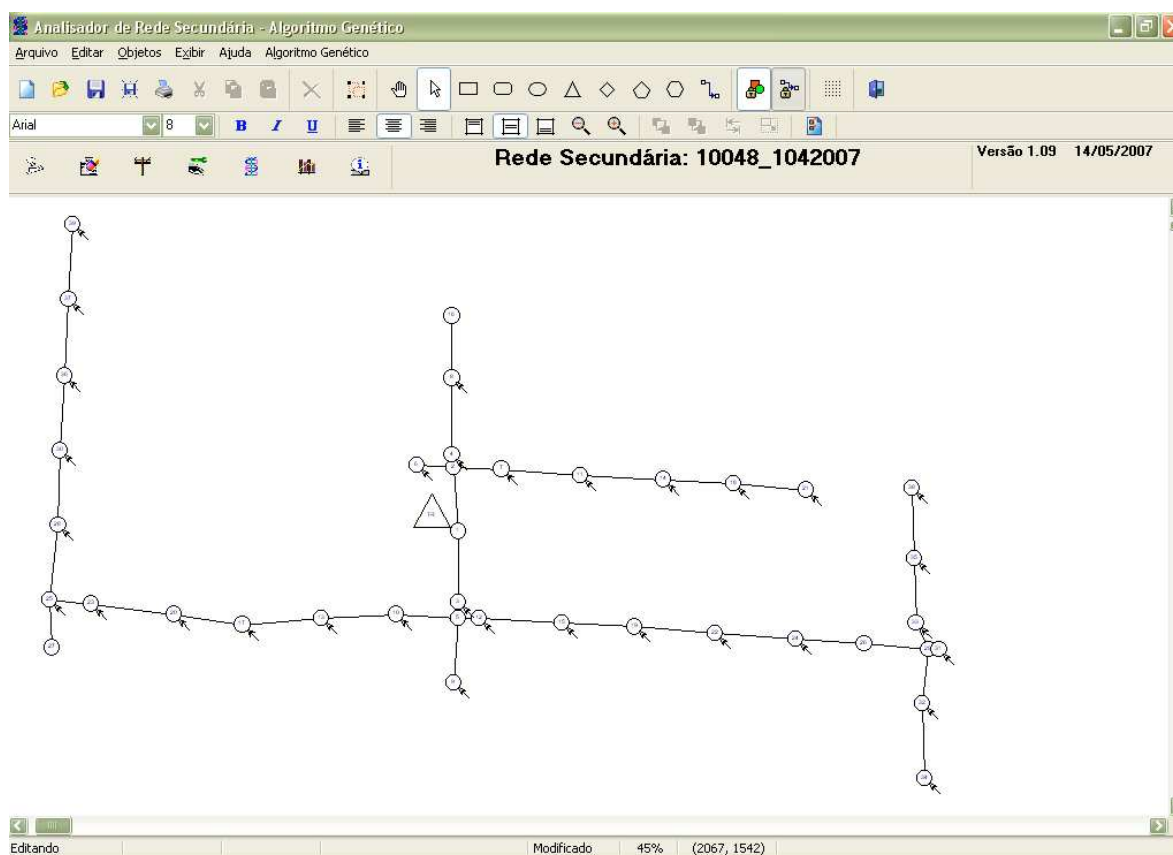


Figura 4.5 - Rede real carregada no *PlanRSec* – Circuito 3.

A Certaja é uma Cooperativa Permissionária de Serviço Público de Energia que opera em 21 municípios do Vale do Taquari e Rio Pardo, região central do Rio Grande do Sul, com sede em Taquari.

Os dados técnicos desta rede real foram obtidos do *software* de gestão da distribuição, um sistema GIS, e são mostrados nas tabelas 4.18 e 4.19.

A tabela 4.18 mostra, em detalhes, o tipo de cabo utilizado em cada ramal do circuito (códigos e dados técnicos dos cabos são mostrados na tabela B.2 do Apêndice B), assim como a posição do transformador, e indica que não há capacitor instalado na baixa tensão.

**Tabela 4.18 - Características iniciais do circuito 3.**

Tipo de Cabo Selecionado		Transformador	Capacitor
Ramal	Cabo		
1 - 2	1	Poste 1	Não Instalado
1 - 3	1		
2 - 4	1		
2 - 6	1		
2 - 7	1		
3 - 5	1		
4 - 8	1		
5 - 9	1		
5 - 10	1		
5 - 12	1		
7 - 11	1		
8 - 16	1		
10 - 13	1		
11 - 14	1		
12 - 15	1		
13 - 17	1		
14 - 18	1		
15 - 19	1		
17 - 20	1		
18 - 21	1		
19 - 22	1		
20 - 23	1		
22 - 24	1		
23 - 25	1		
24 - 26	1		
25 - 27	1		
25 - 28	1		
26 - 29	1		
28 - 30	1		
29 - 31	1		
29 - 32	1		
29 - 33	1		
30 - 36	1		
32 - 34	1		
33 - 35	1		
35 - 38	1		
36 - 37	1		
37 - 39	1		

A tabela 4.19 apresenta as cargas instaladas em cada fase de cada barra, e se o poste possui rede primária disponível, ou seja, um possível ponto para alocação do transformador.

**Tabela 4.19 - Distribuição inicial de cargas do circuito 3.**

Poste	RP	Cargas por Fase (kVA)		
		Fases		
		A	B	C
1	Sim	0,00	0,00	0,00
2		0,00	0,00	0,00
3		0,71	1,59	0,77
4	Não	0,00	0,00	0,00
5		0,00	0,00	0,07
6		3,32	2,86	0,00
7		0,00	0,00	0,00
8		0,74	0,00	0,00
9		0,26	1,24	1,29
10		1,62	0,00	0,00
11		0,88	0,88	0,95
12		0,00	0,00	0,07
13		0,00	0,00	0,00
14		1,47	2,67	0,68
15		1,09	0,58	1,18
16		9,33	3,97	1,36
17		0,00	0,00	0,07
18		0,00	1,77	0,07
19		0,67	0,91	0,09
20		0,00	3,51	1,05
21		2,01	1,40	0,07
22		1,28	1,03	1,24
23		0,00	0,00	0,07
24		1,00	1,31	0,61
25		0,00	1,07	0,00
26		0,00	0,00	0,00
27		0,00	0,00	0,00
28		1,96	0,00	2,08
29		0,00	0,00	0,00
30		0,17	0,17	0,17
31		0,00	0,00	0,06
32		0,00	0,00	1,06
33		0,65	0,00	0,61
34		1,08	1,04	0,02
35		0,00	0,00	0,02
36		0,00	1,08	0,00
37		3,30	0,18	0,18
38		0,00	0,00	1,06
39	2,77	0,36	0,36	
TOTAL		34,310	27,620	15,260

O desequilíbrio de cargas originalmente é de 33,34%, e o carregamento térmico do transformador é de 137,24%.

Calculando o fluxo de potência deste circuito, obtêm-se as tensões em cada barra, que são mostradas na tabela 4.20.

**Tabela 4.20 - Tensão inicial no circuito 3.**

Poste	Tensão (pu)		
	VA	VB	VC
1	1,000	1,003	1,003
2	0,995	0,995	1,001
3	0,973	0,991	0,993
4	0,995	0,995	1,001
5	0,995	0,995	1,001
6	0,992	0,988	0,999
7	0,967	0,988	0,991
8	0,994	0,995	1,001
9	0,990	0,982	0,996
10	0,966	0,988	0,991
11	0,964	0,986	0,990
12	0,953	0,984	0,986
13	0,994	0,995	1,001
14	0,989	0,976	0,994
15	0,950	0,979	0,985
16	0,939	0,979	0,981
17	0,989	0,972	0,993
18	0,940	0,974	0,982
19	0,936	0,975	0,976
20	0,989	0,969	0,992
21	0,929	0,969	0,980
22	0,933	0,971	0,971
23	0,918	0,966	0,976
24	0,931	0,968	0,967
25	0,913	0,965	0,975
26	0,930	0,967	0,965
27	0,913	0,965	0,975
28	0,904	0,963	0,972
29	0,930	0,967	0,962
30	0,897	0,961	0,971
31	0,930	0,967	0,962
32	0,930	0,967	0,962
33	0,929	0,966	0,962
34	0,890	0,960	0,971
35	0,930	0,967	0,962
36	0,929	0,965	0,961
37	0,884	0,959	0,970
38	0,929	0,965	0,960
39	0,882	0,959	0,970

Observam-se várias barras com tensão inferior a 0,95 pu, valor limite inferior estipulado para faixa adequada, conforme [1].

O algoritmo informou um custo operacional anual (perda Joule) de R\$ 10.896,18.

A tabela 4.21 traz os custos dos condutores, transformador, balanceamento de cargas, capacitor e energia. Os dados técnicos destes condutores são demonstrados na tabela B.2 do Apêndice B.

**Tabela 4.21 - Custos de materiais e equipamentos do circuito 3.**

<b>Cabos</b>	
<b>Bitola (Tipo)</b>	<b>Custo Fixo (R\$/Km)</b>
1	1024,80
2	1630,80
3	2596,80
4	3267,60
5	5198,40
6	6522,00
Instalação	580,00
<b>Realocação do Transformador</b>	
<b>Custo (R\$)</b>	675,00
<b>Balanceamento das Cargas</b>	
<b>Custo (R\$)</b>	50,00
<b>Capacitor</b>	
<b>Custo (R\$)</b>	128,30
<b>Energia (kWh)</b>	
<b>Custo (R\$)</b>	0,23

A tabela 4.22 mostra os parâmetros utilizados para o AG:

**Tabela 4.22 - Parâmetros do AG - circuito 3.**

<b>Parâmetros do AG</b>	
Fator de Potência	0,90
Taxa de Recombinação (%)	70,00
Taxa de Mutação (%)	2,00
Tamanho da População	100
Tensão nominal do Circuito (V)	220,00
Potência Base (MVA)	1,00
Potência do Transformador (kVA)	75,00
Limite inferior permitido para tensão (pu)	0,95
Limite superior permitido para tensão (pu)	1,05
Máximo recurso financeiro disponível (R\$)	10.000,00
Buscar melhoria de tensão mesmo estando dentro da Faixa Adequada	Sim
Instalar Capacitor na Rede Secundária	Sim
Capacitor Trifásico (kVAr)	10,00

Simulando o circuito 3 no *software* desenvolvido, *PlanRSec*, após 49 gerações o algoritmo genético fornece a seguinte configuração final:

Os cabos a serem instalados são mostrados na tabela 4.23, o transformador é movimentado pra a barra 3 e o banco de capacitores é instalado no poste 39.

**Tabela 4.23 - Característica dos cabos selecionados pelo AG.**

Tipo de Cabo Selecionado		Transformador	Capacitor
Ramal	Cabo		
1 - 2	4	Poste 3	Poste 39
1 - 3	6		
2 - 4	3		
2 - 6	1		
2 - 7	3		
3 - 5	4		
4 - 8	1		
5 - 9	1		
5 - 10	5		
5 - 12	3		
7 - 11	2		
8 - 16	1		
10 - 13	1		
11 - 14	4		
12 - 15	2		
13 - 17	1		
14 - 18	1		
15 - 19	2		
17 - 20	1		
18 - 21	1		
19 - 22	2		
20 - 23	1		
22 - 24	1		
23 - 25	5		
24 - 26	1		
25 - 27	1		
25 - 28	2		
26 - 29	1		
28 - 30	1		
29 - 31	1		
29 - 32	1		
29 - 33	1		
30 - 36	1		
32 - 34	1		
33 - 35	1		
35 - 38	1		
36 - 37	1		
37 - 39	1		

O balanceamento de carga é sugerido, deixando o desequilíbrio de carga nas fases na ordem de 8,48% e o carregamento térmico do transformador em 120,57%, conforme tabela 4.24.

**Tabela 4.24 - Distribuição de cargas feita pelo AG.**

Poste	Cargas por Fase (kVA)		
	Fases		
	A	B	C
1	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00
3	1,59	0,71	0,77
4	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,07
7	2,86	3,32	0,00
8	0,00	0,00	0,74
9	0,00	0,00	1,62
10	0,88	0,95	0,88
11	1,24	0,26	1,29
12	0,07	0,00	0,00
13	1,18	1,09	0,58
14	1,47	0,68	2,67
15	9,33	1,36	3,97
16	0,00	0,00	0,00
17	0,07	1,77	0,00
18	0,00	0,00	0,07
19	0,09	0,91	0,67
20	2,01	0,07	1,40
21	0,00	3,51	1,05
22	1,03	1,24	1,28
23	0,07	0,00	0,00
24	0,61	1,31	1,00
25	0,00	1,07	0,00
26	0,00	0,00	0,00
27	0,00	0,00	0,00
28	1,96	0,00	2,08
29	0,00	0,00	0,00
30	0,17	0,17	0,17
31	0,00	0,00	0,06
32	0,00	0,00	1,06
33	0,00	0,65	0,61
34	0,00	0,00	0,02
35	0,00	1,08	0,00
36	1,08	0,02	1,04
37	0,18	3,30	0,18
38	1,06	0,00	0,00
39	3,19	3,19	3,28
TOTAL	30,143	26,663	26,556



Os níveis de tensão, obtidos na configuração final, são apresentados na tabela

4.25:

**Tabela 4.25 - Níveis de tensão – circuito 3.**

Poste	Tensão (pu)		
	VA	VB	VC
1	0,998	1,001	1,002
2	0,998	1,000	1,001
3	1,000	1,003	1,003
4	0,998	1,000	1,000
5	0,996	1,001	1,000
6	0,998	1,000	1,001
7	0,996	0,999	1,000
8	0,998	1,000	1,000
9	0,996	1,001	0,999
10	0,994	0,999	0,998
11	0,994	0,994	0,995
12	0,995	1,001	1,000
13	0,994	0,998	0,997
14	0,992	0,990	0,991
15	0,987	0,997	0,994
16	0,998	1,000	1,000
17	0,992	0,996	0,994
18	0,992	0,987	0,990
19	0,985	0,993	0,991
20	0,988	0,993	0,990
21	0,992	0,983	0,989
22	0,982	0,989	0,987
23	0,986	0,990	0,986
24	0,980	0,986	0,984
25	0,986	0,989	0,985
26	0,979	0,985	0,983
27	0,986	0,989	0,985
28	0,983	0,987	0,981
29	0,979	0,983	0,981
30	0,982	0,984	0,977
31	0,979	0,983	0,981
32	0,979	0,983	0,980
33	0,978	0,982	0,981
34	0,979	0,983	0,980
35	0,977	0,981	0,981
36	0,981	0,980	0,974
37	0,981	0,977	0,971
38	0,976	0,981	0,981
39	0,981	0,977	0,969

Os níveis de tensão ficam dentro da faixa adequada, muito próximos do ideal.

Os custos totais indicados pelo *PlanRSec* são de R\$ 8.036,58, sendo que o custo operacional anual (perda Joule) cai para R\$ 2.562,89.

O AG proposto sugere alterações que reduzem os custos com perdas operacionais de R\$ 10.896,18 para R\$ 2.562,89 (aproximadamente 76% de redução), deixando todas as barras com tensão superior a 0,95 pu. A configuração proposta também reduz o desequilíbrio de cargas do transformador, de 33,34% para 8,48%, e o carregamento térmico de 137,24% para 120,57%, valor este que alerta para necessidade de alteração de potência ou divisão do circuito.

Os custos totais, investimentos e perdas operacionais perfazem R\$ 8.036,58, valor inferior ao limite estipulado, além de demonstrar que há uma redução significativa em perda, o que indica, que em médio prazo, os investimentos financeiros serão recuperados.

O processamento evoluiu conforme ilustra o gráfico da figura 4.6, onde pode-se observar uma diminuição contínua da aptidão da melhor solução e a convergência da aptidão média da população para aquela da melhor solução.

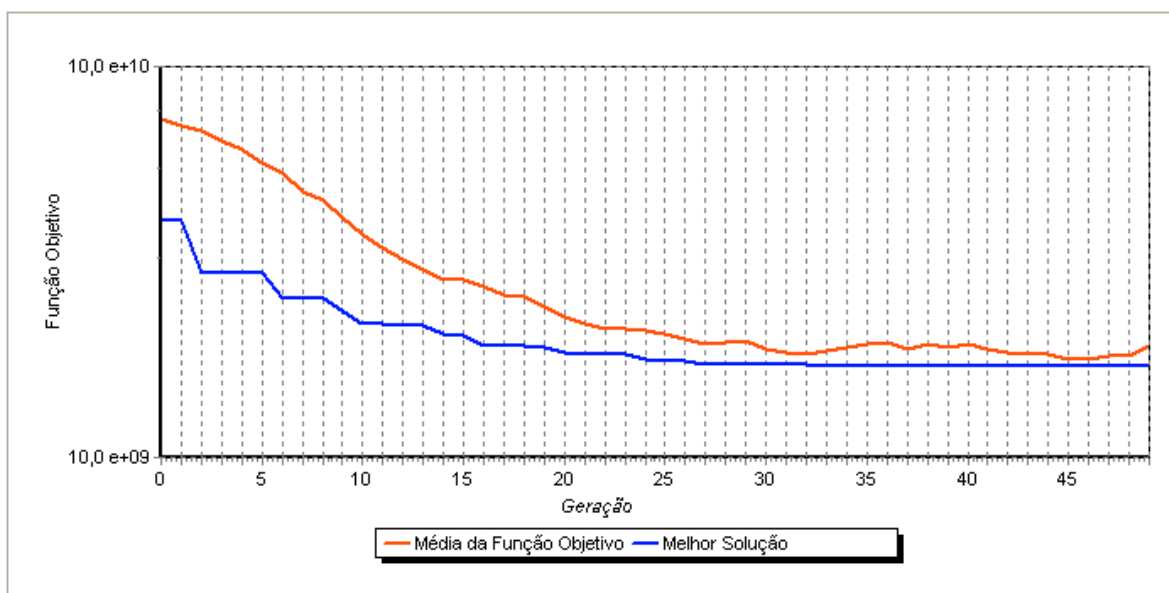


Figura 4.6 - Gráfico de evolução das iterações – Circuito 3.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, o planejamento de circuitos secundários foi abordado como um problema de otimização, em que as restrições dos recursos financeiros e a obrigatoriedade do atendimento de requisitos mínimos de qualidade devem ser atendidos simultaneamente. Tendo como referência principal o trabalho de Cossi [6], buscou-se, a partir de suas conclusões, ampliar o algoritmo genético proposto, de modo a minimizar os custos, melhorando ainda mais a qualidade dos níveis de tensão e reduzindo a perda de energia. Para isto, foi implementada a instalação de banco de capacitores na rede secundária e a busca por melhorias nos níveis de tensão, mesmo que esta se encontre dentro da faixa adequada [1].

Para melhor utilização do trabalho proposto, foi desenvolvida uma *interface* amigável para facilitar a utilização dos recursos que o algoritmo genético desenvolvido permite. O programa foi chamado de *PlanRSec*, e pode ser conferido no Apêndice A, que traz detalhes das telas e suas funcionalidades.

Como forma de avaliação das configurações propostas para os circuitos secundários, foi implementado um algoritmo de fluxo de potência trifásico a quatro fios, obtido de trabalhos correlatos [4] [21], e que é utilizado pelo programa *PlanRSec* de forma transparente ao usuário.

O êxito da proposta pode ser verificado nas simulações executadas, primeiramente sendo validado o algoritmo proposto com os resultados da principal referência, onde o genético proposto indica a mesma solução proposta em [6]. Foi observado ainda que o algoritmo proposto tem um desempenho superior no que se refere ao equilíbrio de carga nas fases. Isto fica evidente no circuito 1, em que o algoritmo genético desenvolvido apresenta

equilíbrio de cargas na linha no valor de 3,45% contra 29,31% e, conseqüentemente, carregamento térmico do transformador de 80% contra 100%. Para o circuito 2, fica clara a vantagem de utilizarmos banco de capacitores na baixa tensão, tendo uma redução de 12,65% nos gastos em perda contra um acréscimo de 3,70% nos investimentos, além da melhora evidente nos níveis de tensão. Com o circuito 3, uma rede real em operação na Certaja, buscou-se aplicar o algoritmo em uma situação prática, tendo sido obtido um resultado muito bom, onde o algoritmo genético desenvolvido sugere alterações que reduzem os custos com perdas operacionais de R\$ 10.896,18 para R\$ 2.562,89, deixando todas as barras com tensão superior a 0,95 pu. A configuração proposta também reduz o desequilíbrio de cargas do transformador, de 33,34% para 8,48%, e o carregamento térmico de 137,24% para 120,57%. Como se pode observar, com um planejamento adequado os custos de investimento são cobertos pelos valores obtidos com a redução de perda.

Como pontos positivos do trabalho desenvolvido, se deve ressaltar a rápida convergência do algoritmo genético proposto e a robustez do fluxo de carga implementado, o que garante a agilidade no processo de planejamento. Como dificuldades inerentes ao método, ressalta-se a necessidade de sintonia dos valores dos parâmetros genéticos, isto compete ao usuário, que deve possuir o mínimo conhecimento, para que o processamento convirja para resultados factíveis dentro de um tempo adequado.

Os testes realizados revelam que o algoritmo implementado possui um grande potencial, e abre perspectivas de evolução deste trabalho de pesquisa, com vistas a outras aplicações práticas, por isso, sugere-se:

- Fazer o planejamento integrado da rede primária e dos circuitos secundários;
- Incluir no modelo de planejamento de circuitos secundários o remanejamento de cargas entre os circuitos adjacentes;
- Discriminar as cargas das barras, balanceando-as independentemente;
- Alocar  $n$  capacitores conforme disponibilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica – Resolução 505 de 16 de novembro de 2001. – Citado em: p. 45, 85 e 91.
- [2] BELATI, EDMARCIO A.; Costa, Geraldo R. M. - **Alocação de Perdas Ativas na Transmissão: Estudos e Análises** – XVI Congresso Brasileiro de Automática – Salvador/BA – 2006. – Citado em: p. 10.
- [3] CHANG, RUNG-FANG; Rong-Ceng Leou; Chan-Nan Lu - **Distribution Transformer Load Modeling Using Load Research Data**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, Nº 2, 2002. – Citado em: p. 16.
- [4] CHENG, C.S.; Shirmohammadi, D.- **A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, Nº 2, 1995. – Citado em: p. 17, 54 e 91.
- [5] CIPOLI, JOSÉ ADOLFO - **Engenharia de Distribuição**. Editora Qualitymark, 1993. – Citado em: p. 15.
- [6] COSSI, ANTÔNIO MARCOS - **Planejamento de Circuitos Secundários de Distribuição Usando Algoritmo Evolutivo Especializado**, Dissertação de Mestrado, UNESP, 2003. – Citado em: p. 17, 41, 67, 68, 71, 72, 73, 74, 76, 77, 91, 94 e 105.
- [7] COSTA, ALYSSON M. - **Otimização do planejamento da rede secundária de distribuição de energia elétrica** – Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2002. – Citado em: p. 17.
- [8] DAVIS, L. - **Handbook of Genetic Algorithms**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. – Citado em: p. 21 e 29.

- [9] DAWKINS, R.- **O gene egoísta**, Editora Italiana/Edusp, 1979. – Citado em: p. 22.
- [10] DÍAZ-DORADO, E. - **Application of Evolutionary Algorithms for the Planning of urban Distribution Networks of Medium Voltage**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, Nº 3, 2002. – Citado em: p. 17.
- [11] DÍAZ-DORADO, E.; Miguez, Edelmiro; Cidras, José - **Design of Large Rural Low-Voltage Networks Using Dynamic Programming Optimization**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 16, Nº 4, 2001. – Citado em: p. 17.
- [12] DOBZHANSKY, T. - **Genética do processo evolutivo**. USP, 1973. – Citado em: p. 21.
- [13] ELETROBRÁS. - **Planejamento de Sistemas de Distribuição Volume 1**. Editora Campus, 1982. – Citado em: p. 15.
- [14] FREIRE-MAIA, N. - **Genética de populações Humanas**. USP, 1974. – Citado em: p. 21.
- [15] FUTUYAMA, D.J. - **Biologia Evolutiva**, tradução Fábio de Melo Sene, Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética. 1992. – Citado em: p. 21.
- [16] GALLEGO, RAMON A.; Monticelli, Alcir José; Romero, Rubén - **Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 16, Nº 4, 2001. – Citado em: p. 18.
- [17] GOLDBERG, David E. - **Genetic Algorithms in search, optimization, and machine learning**. Addison Wesley Longman Inc. 1989. – Citado em: p. 29, 30, 32, 36 e 38.
- [18] JINXIANG ZHU - **Phase Balancing using Simulated Annealing**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, Nº 4, 1999. – Citado em: p.18.

[19] KAGAN, NELSON; Oliveira, Carlos Cear B.; Robba, Ernesto João - **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**, Editora Edgard Blücher, 2005. – Citado em: p. 10,14 e 45.

[20] LEVITIN, G.; Kalyuzhny, A.; Shenkman, A.; Chertkov, M. - **Optimal Capacitor Allocation in Distribution Systems Using a Genetic Algorithm and a Fast Energy Loss Computation Technique**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, Nº 2, 2000. – Citado em: p. 17.

[21] LUO, G. X.; Semlyen, A. - **Efficient Load Flow For Large Weakly Meshed Networks**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, Nº 4, 1990. – Citado em: p. 17 e 91.

[22] MANDAL, SUJIT; Pahwa, Anil - **Optimal Selection of Conductors for Distribution Feeders**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, Nº 1, 2002. – Citado em: p. 19.

[23] MEDAWAR, P; Medawar, J. - **Ciência da Vida**. Zahar Editores, 1978. – Citado em: p. 20.

[24] MITCHELL, MELAINE - **An introduction to genetic algorithms**, Cambridge 1996. – Citado em: p. 32, 36 e 38.

[25] MOHAMMAD, A. S.; Masoum, M. L.; Akbar J.; Ewald, F. Fuchs. - **Optimal Placement, Replacement and Sizing of Capacitor Banks in Distorted Distribution Networks by Genetic Algorithms**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, Nº 4, 2004. – Citado em: p. 18.

[26] NONATO, L.V. - **Exame de qualificação: Utilização de algoritmos genéticos no desenho de levantamentos oceanográficos**. EpuSP, 1995. – Citado em: p. 30.



- [27] PAIVA, P. AC.; Khodr, H. M.; Domínguez-Navarro, J. A.; Yusta, J. M.; Urdaneta., A. **J. Integral Planning of Primary–Secondary Distribution Systems Using Mixed Integer Linear Programming.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, N° 2, 2005. – Citado em: p. 17.
- [28] RIBEIRO, F.J.L.; Treleanven, P. C.; Alipi C. **Genetic-Algorithm Programming Environments.** Computer. 1994. – Citado em: p. 25.
- [29] SANTOS, J. RIQUELME; Expedito, A. Gomez; Ramos, J.L. Martinez - **A Reduced-Size Genetic Algorithm for Optimal Capacitor Placement on Distribution Feeders.** IEEE Transactions on Power Systems, 2004. – Citado em: p. 18.
- [30] SHIRMOHARMNADI, D.; Hong, H. W.; Semlyen, A.; Luo, G. X.- **A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, N° 2, 1988. – Citado em: p. 17, 49 e 52.
- [31] SOUCEK, B. - **Dynamic Genetic and Chaotic Programming, the sixth generation.** New York-Toronto-Singapore-Brisbane: Jonh Wiley & Sons Inc., 1992. – Citado em: p. 28.
- [32] SOUZA, FLÁVIO J.; Vellasco, Marley M. R.; Pacheco, Marco A. C.; Bosaipo, Cláudia R. – **Previsão de Carga em Sistemas Elétricos de Potência com o Modelo Neuro-Fuzzy NFHB - puC/RJ.** – Citado em: p. 16.
- [33] SUNDHARARAJAN, SRINIVASAN; Pahwa, Anil - **Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, N° 3, 1994. – Citado em: p. 17.
- [34] VARGAS, PATRICIA A.; Filho, Christiano L.; Zuben, Fernando J. V. – **Redução de Perdas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Através de Sistemas Classificadores.** Revista Controle & Automação – Vol. 14 – N° 3 – 2003. – Citado em: p. 18.

## APÊNDICE: A

O Algoritmo Evolutivo e a interface gráfica foram implementadas em linguagem Delphi® e o fluxo de carga em Borland® C++ Builder.

Neste apêndice será feita uma breve explicação das telas e funcionalidades do *PlanRSec*.

Durante a inicialização do programa é exibida uma tela de abertura contendo as informações do *software*.

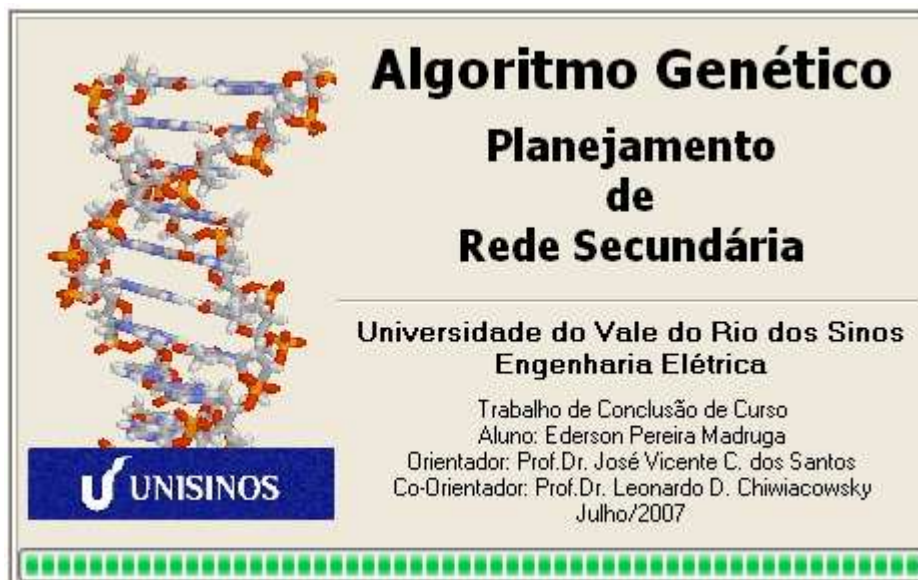
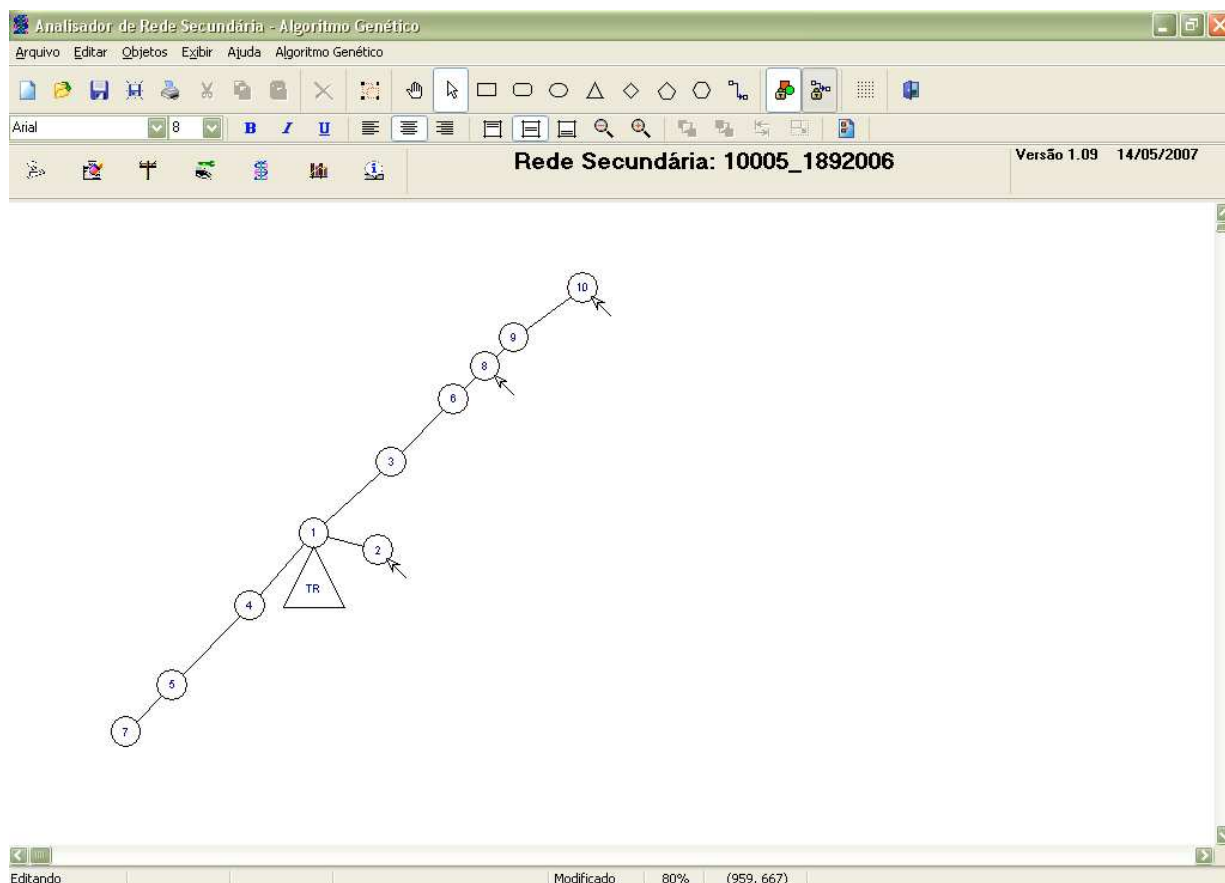


Figura A.1 - Tela informativa do *PlanRSec*.

A tela principal do programa é exibida na figura A.2. Esta tela apresenta a informação visual do circuito e contém os botões de atalho para todas as funções do *PlanRSec*.



**Figura A.2 - Tela Principal do *PlanRSec*.**

Ainda nesta tela é possível chamar as configurações do AG, o cadastro de condutores, a importação de arquivos do GIS, a exportação e impressão dos gráficos.

A figura A.3 mostra a tela de configuração dos arquivos de saída do programa. Aqui é definido onde serão salvos os arquivos gerados pelo algoritmo genético e do fluxo de carga.



**Figura A.3 - Tela de configurações de diretórios e arquivos de saída.**

A configuração do AG é feita nesta tela, figura A.4. É nela onde são informados os parâmetros genéticos como tamanho da população, tamanho da população de elite, taxa de recombinação, taxa de mutação, número máximo de gerações, etc. Aqui também são informados os custos e os módulos de otimização do circuito (troca de condutores, posicionamento de transformador, balanceamento de carga, instalação de banco de capacitores e melhoria de tensão dentro da faixa adequada).

**Analisador de Rede Secundária - Algoritmo Genético**

### Configurações:

**Parâmetros**

**Cálculo:**

Tamanho da População:	População de Elite (%):	Recombinação (%):	Mutação (%):	Máximo de Gerações:
120	20,00	70,00	3,00	150
Período de Planej. (dias):	Horas de IP Mês:	Número de Soluções:	Potência Base (MVA):	Fator de Potência:
365	360	1	1,00	0,95

Considerar como Manutenção  
 Trocar Condutores  
 Posicionar Transformador  
 Balancear Cargas  
 Instalar Capacitor  
 Buscar melhora de tensão dentro da faixa adequada  
 Opções sem Cap.

Forçar iterações até o máximo permitido

Inst. Cabo em (R\$/Km):	Transformador (R\$):	Realocação TR (R\$):	Balanc. RS (R\$):	Capacitor (R\$):
580,00	1200,00	675,00	50,00	128,30
Valor do kWh (R\$):	Recurso Disponível (R\$):	Reat. Capacitiva (kVar):	Fases do Capacitor:	
0,25	15000,00	10,00000000	3	

**Penalizações:**

Rest. Transformador:	Rest. Lim. Tensão:	Rest. Financeira:	Rest. Fluxo de Potência:
20	100	40	30

Figura A.4 - Tela de Parametrização do AG.

A figura A.5 traz as informações sobre os condutores cadastrados no programa.

**Cadastro de Condutores:**

Dados do Cabo:

Tipo: 1 Fases (nº): 3 Corrente (A): 140 R\$/Km: 20,00

R+ 0,00755 X+ 0,0100645

Dados da Estrutura:

HA:	HB:	HC:	HN:	DAB:	DAC:	DAN:	DBC:	DBN:	DCN:
5,3	4,9	4,5	4,5	0,4	0,8	0,4	0,4	0,8	1,2

Impedâncias Calculadas:

RAA:	XAA:	RBB:	XBB:	RCC:	XCC:	RNN:	XNN:	RAB:	XAB:
0,024409	0,0222508	0,024409	0,0222508	0,024409	0,0222508	0,024409	0,0222508	0,0013024	0,01386
RAC:	XAC:	RBC:	XBC:	RAN:	XAN:	RBN:	XBN:	RCN:	XCN:
0,0013024	0,0127116	0,0013024	0,01386	0,0013024	0,01386	0,0013024	0,0127116	0,0013024	0,0120384

Buttons: << >> Cancela Ok

Figura A.5 – Tela de visualização das características dos cabos.

A figura A.6 demonstra o gráfico de evolução do AG, gerado durante o processamento.

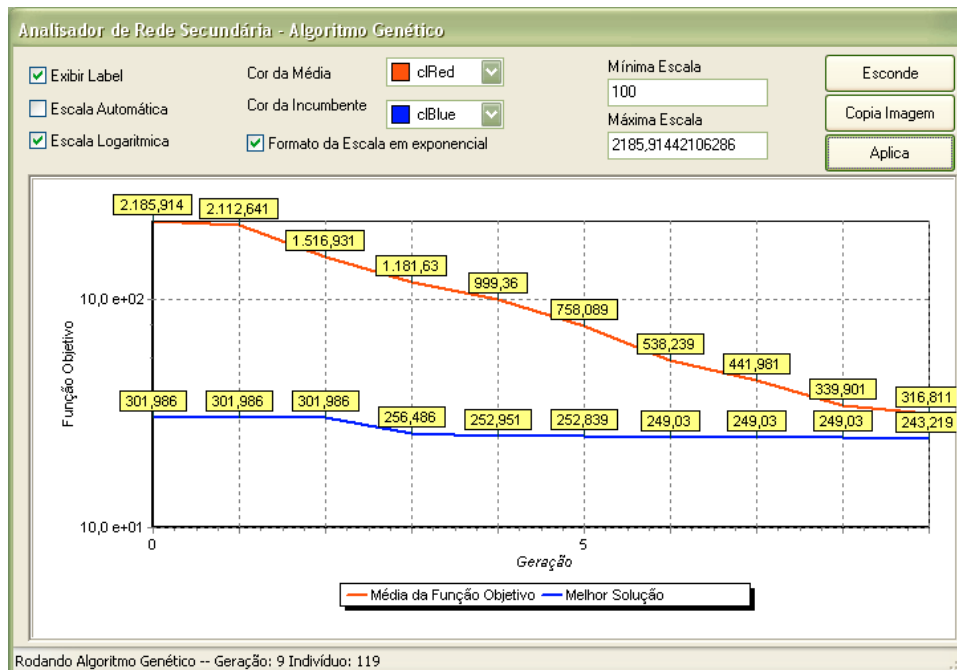


Figura A.6 – Gráfico gerado durante o processamento.

As figuras A.7 e A.8 são, respectivamente, as telas de importação de circuitos secundários do sistema GIS e a tela de conexão com o banco Oracle® do GIS.



**Figura A.7 – Tela de importação do sistema GIS.**



**Figura A.8 - Tela de conexão com o banco de dados Oracle® do GIS.**

A figura A.9 é um exemplo de arquivo de dados gerado a partir do sistema GIS.

```

TextPad - [C:\Documents and Settings\Usuário do Windows\Meus documentos\Madruga\Unisinos\TCC\Desenho\Demo\Data\10005_1892006.txt *]
Arquivo Editar Pesquisar Exibir Ferramentas Macros Configurar Janela Ajuda

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS      18/9/2006 13:47:25
ENGENHARIA ELETRICA
ARQUIVO DE REDE SECUNDARIA
EDERSON MADRUGA
VERSÃO 1.0

NOS
  NOD      X      Y      TAM      TAM      TIPO      SERIAL      MT      CLASSE      kWh_A      kVA_A      kWh_B      kVA_B      kWh_C      kVA_C V
  1      396      456      32      32      DT10250      10050      B      15 kV      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
  2      463      474      32      32      DT9150      10051      B      15 kV      87.00      1.63      0.00      0.00      0.00      0.00
  3      477      382      32      32      DT11150      10052      B      15 kV      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
  4      329      532      32      32      DT9150      10049      B      15 kV      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
  5      248      615      32      32      DT11150      10048      B      15 kV      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
  6      542      316      32      32      11ME      10053      B      15 kV      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
  7      200      664      32      32      DT10250      10046      B      15 kV      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
  8      575      282      32      32      DT11150      10054      B      15 kV      29.00      0.54      29.00      0.54      0.00      0.00
  9      605      252      32      32      11ME      10055      B      15 kV      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
  10     677      200      32      32      11ME      10056      B      15 kV      1.00      0.02      0.00      0.00      0.00      0.00
END.

LINHA
  NOD      X-DE      Y-DE      X-PARA      Y-PARA      FASES      TIPO      REFDIST (Km)      DE      PARA
  11     396      456      463      474      AN      VS4SN4SN11      1 0.0699      1      2
  12     396      456      477      382      ABN      VS4SN4SN12      1 0.1097      1      3
  13     396      456      329      532      BN      VS4SN4SN11      1 0.1010      1      4
  14     329      532      248      615      BN      VS4SN4SN11      1 0.1157      4      5
  15     477      382      542      316      ABN      VS4SN4SN12      1 0.0929      3      6
  16     248      615      200      664      BN      VS4SN4SN11      1 0.0690      5      7
  17     542      316      575      282      ABN      VS4SN4SN12      1 0.0476      6      8
  18     575      282      605      252      AN      VS4SN4SN11      1 0.0421      8      9
  19     605      252      677      200      AN      VS4SN4SN11      1 0.0892      9      10
END.

TRANSFORMADOR
  NOD      X      Y      TAM      TAM      PT      KVAN      TAP_PRI      TAP_SEC      ELO      FASESQTDFASES
  20     396      456      64      64      10005      5,00      13800      380      3H      B      1
END.

CLIENTES
  CODIGO      MEDIDOR      CLASSE      FASES      kWh      kVAS
  8303      423905      B      AN      87      1.63
  20691      0      B      AN      1      0.02
  20552      3621964      B      ABN      58      1.08
END.
  
```

Figura A.9- Tela de conexão com o banco de dados Oracle® do GIS.



## APÊNDICE: B

Tabela de Condutores utilizadas em [6]:

**Tabela B.1 – Dados dos condutores utilizados por [6].**

Código	R ( $\Omega$ )	R ( $\Omega$ )	U\$/Km
1	0,00755	0,01006	20,00
2	0,00615	0,00996	25,00
3	0,00427	0,00961	30,00
4	0,01084	0,01011	35,00

Tabela de Resistência dos Condutores

**Tabela B.2 - Dados dos condutores utilizados no circuito 3.**

Código	AWG/MCM	Material	In (A)	R1 ( $\Omega$ )	R0 ( $\Omega$ )
1	4	CAA	140	1,3527	1,7119
2	2	CAA	185	0,8499	1,1023
3	1/0	CAA	240	0,5340	0,7090
4	2/0	CAA	275	0,4242	0,5773
5	4/0	CAA	365	0,2667	0,3797
6	336,4	CAA	515	0,1686	0,2051

Tabelas de Afastamentos adotados:

**Tabela B.3 – Distância adotada entre os condutores secundários.**

	Dist. (m)
HA	5,3
HB	4,9
HC	4,5
HN	4,5
DAB	0,4
DAC	0,8
DAN	0,4
DBC	0,4
DBN	0,8
DCN	1,2

Sendo:

- HA : Distância da Fase A ao solo;
- HB : Distância da Fase B ao solo;
- HC : Distância da Fase C ao solo;
- HN : Distância da Fase N ao solo;
- DAB: Distância entre as fases A e B;
- DAC: Distância entre as fases A e C;
- DAN: Distância entre a fases A e o Neutro;
- DBC: Distância entre as fases B e C;
- DBN: Distância entre a fases B e o Neutro;
- DCN: Distância entre a fases C e o Neutro.