

 <p>18º SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA</p>	<p>06 a 10 de Outubro de 2008 Olinda - PE</p>
---	---

Planejamento de redes secundárias de distribuição de energia elétrica com auxílio de algoritmo genético		
Ederson P. Madruga	José V. Canto dos Santos	Leonardo D. Chiwiacowsky
Certaja	Unisinos	Unisinos
madruga@certaja.com.br	jvcanto@unisinos.br	ldchiwiacowsky@unisinos.br

PALAVRAS CHAVE:

Algoritmo genético, baixa tensão, perda de energia, planejamento da distribuição, projetos de redes de distribuição.

DADOS DA EMPRESA:

Nome: Certaja Ltda.
Endereço: R. Albino Pinto, 292 Taquari-RS
Telefone/fax: 51-3653 66 00
E-mail: certaja@certaja.com.br

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. Com o algoritmo desenvolvido, são obtidos a configuração ótima para os cabos, o balanceamento entre as fases e o posicionamento de transformadores e de bancos de capacitores.

1. OBJETIVOS

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, 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 eficazes 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 aos transformadores rebaixadores de distribuição, ou seja, a rede primária de distribuição. O outro inicia no

transformador abaixador de distribuição indo até a entrada das unidades consumidoras, ou seja, a rede secundária [5]. 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, evitando o surgimento de desbalanceamentos 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 a que pode apresentar melhor relação custo x benefício, uma vez que o custo para realocar um transformador é 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 (ou de Bancos de Capacitores):** 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 desenvolvido está baseado no emprego de 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.

2. METODOLOGIA

A formulação matemática empregada teve como base a adotada por Cossi [4], 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 por:

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

Onde:

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

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

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

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

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

Sujeito a:

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

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

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

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

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

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

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

Sendo:

W	Função objetivo em R\$;	P	Conjunto dos números que representam as posições das cargas nas fases;
W_{TC}	Parcela da função objetivo relativo à Troca de Condutores;	Di	Variável de decisão para troca ou não de condutores (0=não, 1=sim);
W_{TT}	Parcela da função objetivo relativo à Troca do local do Transformador;	Ti	Variável de decisão para mudança ou não da posição do transformador (0=não, 1=sim);
W_{BS}	Parcela da função objetivo relativo à Balanceamento da rede Secundária;	Fi	Variável de decisão para o balanceamento ou não das cargas (0=não, 1=sim);
W_{PO}	Parcela da função objetivo relativo as Perdas Operacionais;	Ic	Variável de decisão para a inclusão de Banco de Capacitores (0=não, 1=sim);
W_{BC}	Parcela da função objetivo relativo aos custos da implementação de Banco de Capacitores na rede secundária;	ct_j	Variável que indica se o cabo da linha j foi substituído;
$CFC_{ij_{abcn}}$	Custo da troca de cabos das fases a, b, c e do neutro (material e mão-de-obra);	$P_{k_{abcn}}^{in}$	Potências ativa injetada na barra k;
CFT_i	Custo da troca de local do transformador;	$Q_{k_{abcn}}^{in}$	Potências reativa injetada na barra k;
CFB_i	Custo do balanceamento das cargas nas fases;	$P_{k_{abcn}}^c$	Potências ativa consumida pela barra k;
C_{BC}	Custo do banco de capacitores;	$Q_{k_{abcn}}^c$	Potência reativa consumida pela barra k;
C_{kwh}	Custo do kWh em R\$;	$S_{i_{abcn}}^T$	Potência aparente do transformador;
C	Conjunto formado pelos tipos de cabos disponíveis;	$R_{ij_{abcn}}$	Resistência dos condutores;
T	Período de planejamento em dias;	$X_{ij_{abcn}}$	Reatância dos condutores;
L	Conjunto formado pelos ramais do circuito;	$\theta_{km_{abcn}}$	Abertura angular da linha k-m;
N	Conjunto formado pelos possíveis locais para instalação do transformador;	$V_{k_{abcn}}^{\text{lim}}$	Tensão limiar no nó k;
NB	Conjunto formado pelas barras do circuito;	$V_{k_{abcn}}$	Tensão calculada no nó k;
NT	Conjunto formado pelos transformadores existentes;	$I_{j_{abcn}}$	Corrente do ramo j;
		$\frac{f_{km_{abcn}}}{f_{km_{abcn}}}$	Fluxo no ramo k-m;
		RF_{\max}	Máximo fluxo no ramo k-m;
			Recurso financeiro disponível.

Para um melhor entendimento da formulação descrita, são relevantes os pontos listados a seguir:

- **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 troca de 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) - (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” [5], 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.

A codificação (estrutura cromossômica) em base decimal inteira mostra-se adequada para mapear possíveis soluções para o problema de planejamento dos circuitos secundários, uma vez que desta forma, possibilita um desempenho computacional satisfatório. Outra vantagem desta forma de codificação é a de armazenar uma maior quantidade de informações, para cromossomos de mesmo tamanho, se comparado à codificação binária, sendo uma representação real das variáveis do problema.

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 1: Codificação do problema de planejamento.

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.
- **Função de Aptidão:** Cada indivíduo da população é avaliado de acordo com a função de aptidão a qual implicará diretamente na permanência do mesmo nas gerações futuras. No modelo de função de aptidão proposta considera-se que as restrições do suprimento da demanda (Equações (2)-(3)), são atendidas através da solução de um programa de cálculo de fluxo de potência trifásico a quatro fios [7] 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)-(7)), dada à natureza não linear do problema, são introduzidas na função de aptidão através do uso de funções de penalização, conforme demonstrado na Equação (8) a seguir:

$$\begin{aligned}
fa = & W + \sum_{i \in C} \sum_{j \in L} \sqrt{\left(R_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2 \right)^2 + \left(X_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2 \right)^2} + \\
& + f_{pv} \sum_{k \in NB} \left\{ \begin{array}{l} \left(V_{k_{abcn}}^{\text{lim}} - V_{k_{abcn}}^{\text{cal}} \right) \\ 1 - V_{k_{abcn}}^{\text{cal}} \end{array} \right\} + \\
& + f_{pt} \sum_{k \in NB} \sum_{c \in C} \sum_{l \in L} \left\{ \begin{array}{l} S_{i_{abc}}^T - \left(\sqrt{\left(P_{k_{abcn}}^c \right)^2 + \left(Q_{k_{abcn}}^c \right)^2} + \sqrt{\left(R_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2 \right)^2 + \left(X_{ij_{abcn}} |I_{j_{abcn}}|^2 \right)^2} \right) \\ 0 \end{array} \right\} + \\
& + \left\{ \begin{array}{l} \text{Máx}(S^T_a, S^T_b, S^T_c) - \frac{S_{i_{abc}}^T}{NFT} \\ 0 \end{array} \right\} + \\
& + f_{pf} \sum_{j \in L} \left\{ \begin{array}{l} |f_{j_{abcn}}| \\ 0 \end{array} \right\} + \\
& + f_{prf} \sum_{j \in L} \left\{ \begin{array}{l} W \\ 0 \end{array} \right\}.
\end{aligned} \tag{8}$$

Sendo:

W	Função objetivo em R\$;	C	Conjunto formado pelos tipos de cabos disponíveis;
$R_{ij_{abcn}}$	Resistência dos condutores;	L	Conjunto formado pelos ramais do circuito;
$X_{ij_{abcn}}$	Reatância dos condutores;	NB	Conjunto formado pelas barras do circuito;
$I_{j_{abcn}}$	Corrente de ramo;	NT	Conjunto formado pelos transformadores existentes;
$R_{ij_{abcn}} I_{j_{abcn}} ^2$	Perda ativa do sistema;	RF_{max}	Recurso financeiro disponível;
$X_{ij_{abcn}} I_{j_{abcn}} ^2$	Perda reativa do sistema;	NFT	Quantidade de fases secundárias do transformador;
$V_{k_{abcn}}^{\text{lim}}$	Tensão limiar;	f_{pt}	Penalização da restrição do transformador;
$V_{k_{abcn}}$	Tensão calculada;	f_{pv}	Penalização da restrição dos limites de tensão;
$f_{j_{abcn}}$	Fluxo no ramo j;	f_{pf}	Penalização da restrição do fluxo de potência;
$f_{j_{abcn}}$	Máximo fluxo no ramo j;	f_{prf}	Penalização da restrição financeira.
$P_{k_{abcn}}^c$	Potências ativa e reativa consumidas pela barra k;		
$Q_{k_{abcn}}^c$	Potência aparente do transformador;		
$S_{i_{abcn}}^T$	Máxima potência aparente das fases A, B e C do transformador;		
$\text{Máx}(S^T_a, S^T_b, S^T_c)$	Média das potências aparente das fases A, B e C do transformador;		

Por fim, a avaliação de 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.

- **Seleção:** Para a seleção das configurações que irão participar do processo de recombinação, utilizou-se a técnica de torneio juntamente com Elitismo, onde são realizados n jogos, sendo n o tamanho da população das configurações que não são de elite e que posteriormente irão se recombinar com as configurações de elite.
- **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.
- **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:
 - **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.
 - **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.
 - **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.
 - **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).
- **Critério de Convergência:** O critério de parada adotado compara a melhor solução, se esta não apresenta melhoria durante um número especificado de gerações ou o número máximo de gerações é atingido, o processo é considerado convergido.

A Figura 2 ilustra o diagrama de blocos do algoritmo implementado.

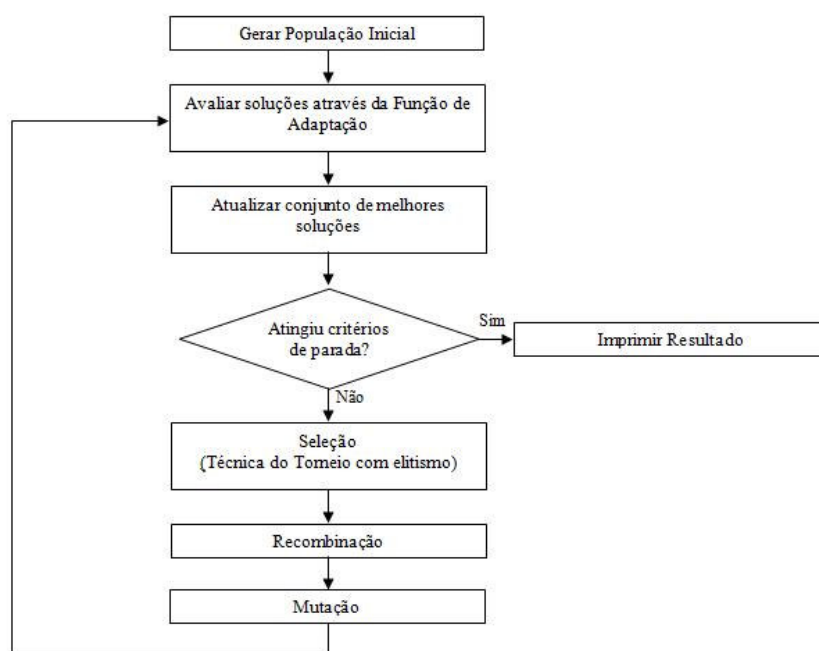


Figura 2: Diagrama de blocos do algoritmo implementado.

3. RESULTADOS

O Algoritmo Evolutivo proposto foi implementado e testado utilizando-se circuitos hipotéticos e reais.

A seguir é apresentada a análise de um circuito real, em operação na Cooperativa Certaja (Cooperativa Permissionária de Serviço Público de Energia e Desenvolvimento Rural Taquari-Jacuí Ltda.), na cidade de Taquari-RS. A configuração inicial do circuito está ilustrada na Figura 3.

Os parâmetros utilizados nos testes encontram-se na Tabela 1. Os custos de investimento e de operação utilizados encontram-se na Tabela 2. Trata-se de custos fictícios que foram especificados para mostrar a robustez e eficiência da metodologia proposta. Os dados dos cabos disponíveis encontram-se na Tabela 3. Os dados do circuito (cabos e cargas instaladas nas fases *abc*) estão ilustrados na Tabela 4. Os resultados referentes aos dados da nova configuração encontrada como solução e dos custos totais encontram-se nas Tabelas 5 - 6, respectivamente.

A Figura abaixo representa o circuito secundário em estudo.

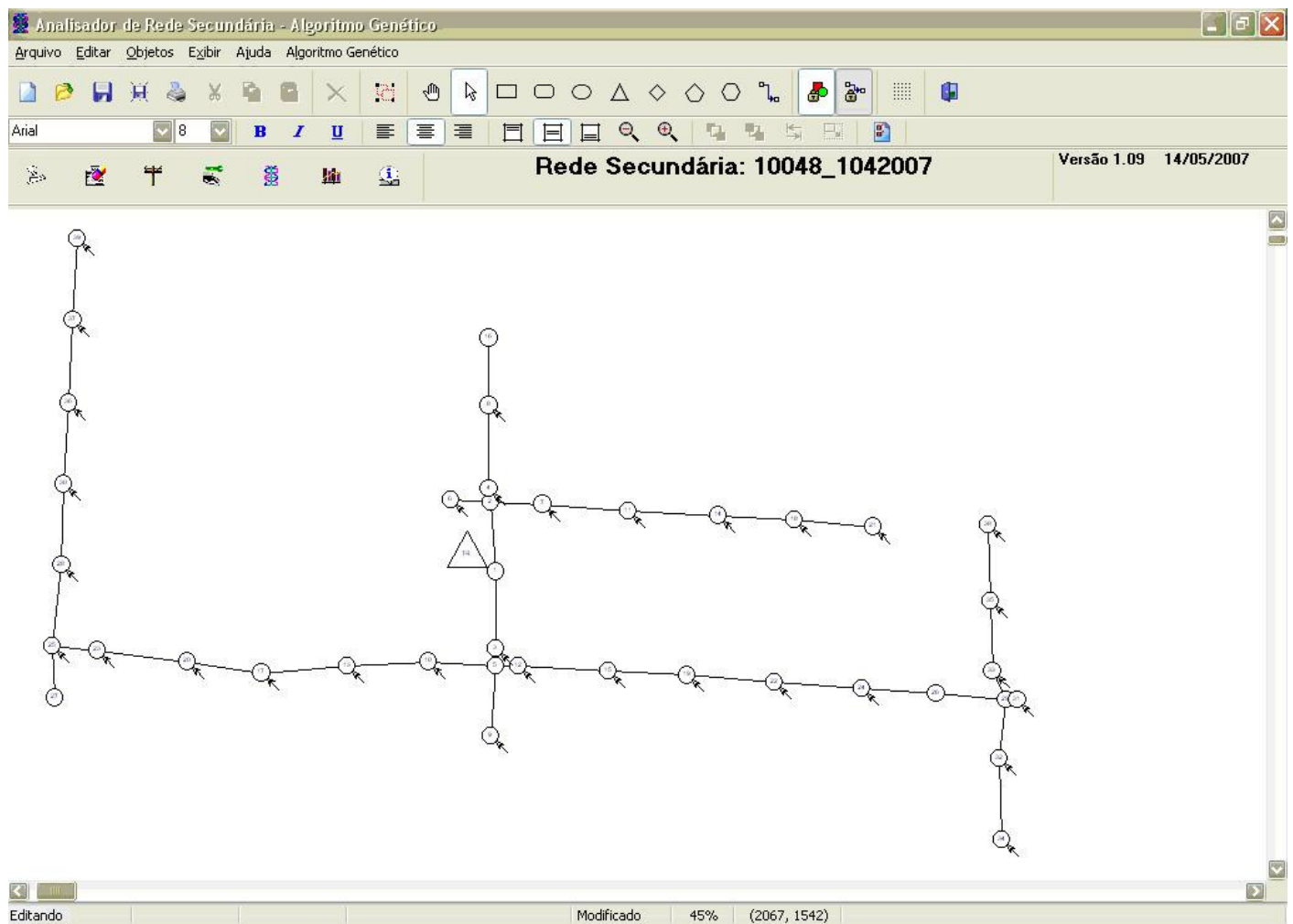


Figura 3: Ramal secundário.

A Tabela 1 representa os parâmetros utilizados no algoritmo genético para otimização do circuito mostrado na Figura 3.

Tabela 1: Parâmetros de controle do AE.

Parâmetros do AG	
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

A Tabela 2 representa os custos dos condutores disponíveis e dos equipamentos utilizados no circuito em estudo.

Tabela 2: Custos de investimentos e de operação.

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

A Tabela 3 demonstra os dados elétricos dos condutores disponíveis utilizados no estudo.

Tabela 3: Tipos de cabos disponíveis.

Código	AWG/MCM	Material	In (A)	R1 (Ω)	R0 (Ω)
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

A Tabela 4 traz a configuração original do circuito em estudo e seus respectivos carregamentos e níveis de tensão. A Tabela 5 mostra a configuração indicada pelo Algoritmo Genético para o circuito.

Tabela 4: Cabos e cargas instaladas nas fases *abc*.

Cabos nos Ramais		Cargas por Fase (kVA)				Tensão (PU)		
Ramais	Cabos (Tipos)	Barra	Fases			Va	Vb	Vc
			a	b	c			
			1	2	3			
1 - 2	1	2	0,00	0,00	0,00	1,000	1,003	1,003
1 - 3	1	3	0,71	1,59	0,77	0,973	0,991	0,993
2 - 4	1	4	0,00	0,00	0,00	0,995	0,995	1,001
2 - 6	1	5	0,00	0,00	0,07	0,995	0,995	1,001
2 - 7	1	6	3,32	2,86	0,00	0,992	0,988	0,999
3 - 5	1	7	0,00	0,00	0,00	0,967	0,988	0,991
4 - 8	1	8	0,74	0,00	0,00	0,994	0,995	1,001
5 - 9	1	9	0,26	1,24	1,29	0,990	0,982	0,996
5 - 10	1	10	1,62	0,00	0,00	0,966	0,988	0,991
5 - 12	1	11	0,88	0,88	0,95	0,964	0,986	0,990
7 - 11	1	12	0,00	0,00	0,07	0,953	0,984	0,986
8 - 16	1	13	0,00	0,00	0,00	0,994	0,995	1,001
10 - 13	1	14	1,47	2,67	0,68	0,989	0,976	0,994
11 - 14	1	15	1,09	0,58	1,18	0,950	0,979	0,985
12 - 15	1	16	9,33	3,97	1,36	0,939	0,979	0,981
13 - 17	1	17	0,00	0,00	0,07	0,989	0,972	0,993
14 - 18	1	18	0,00	1,77	0,07	0,940	0,974	0,982
15 - 19	1	19	0,67	0,91	0,09	0,936	0,975	0,976
17 - 20	1	20	0,00	3,51	1,05	0,989	0,969	0,992
18 - 21	1	21	2,01	1,40	0,07	0,929	0,969	0,980
19 - 22	1	22	1,28	1,03	1,24	0,933	0,971	0,971
20 - 23	1	23	0,00	0,00	0,07	0,918	0,966	0,976
22 - 24	1	24	1,00	1,31	0,61	0,931	0,968	0,967
23 - 25	1	25	0,00	1,07	0,00	0,913	0,965	0,975
24 - 26	1	26	0,00	0,00	0,00	0,930	0,967	0,965
25 - 27	1	27	0,00	0,00	0,00	0,913	0,965	0,975
25 - 28	1	28	1,96	0,00	2,08	0,904	0,963	0,972
26 - 29	1	29	0,00	0,00	0,00	0,930	0,967	0,962
28 - 30	1	30	0,17	0,17	0,17	0,897	0,961	0,971
29 - 31	1	31	0,00	0,00	0,06	0,930	0,967	0,962
29 - 32	1	32	0,00	0,00	1,06	0,930	0,967	0,962
29 - 33	1	33	0,65	0,00	0,61	0,929	0,966	0,962
30 - 36	1	34	1,08	1,04	0,02	0,890	0,960	0,971
32 - 34	1	35	0,00	0,00	0,02	0,930	0,967	0,962
33 - 35	1	36	0,00	1,08	0,00	0,929	0,965	0,961
35 - 38	1	37	3,30	0,18	0,18	0,884	0,959	0,970
36 - 37	1	38	0,00	0,00	1,06	0,929	0,965	0,960
37 - 39	1	39	2,77	0,36	0,36	0,882	0,959	0,970
TOTAL			34,31	27,62	15,26			
Poste Selecionado para Instalação do Transformador						Poste 1		
Poste Selecionado para Instalação do Banco de Capacitores						Não Instalado		

Tabela 5: Resultados da nova configuração para o circuito.

Cabos nos Ramais		Cargas por Fase (kVA)				Tensão (PU)		
Ramais	Cabos (Tipos)	Barra	Fases			Va	Vb	Vc
			a	b	c			
			1	2	3			
1 - 2	4	2	0,00	0,00	0,00	0,998	1,001	1,002
1 - 3	6	3	1,59	0,71	0,77	1,000	1,003	1,003
2 - 4	3	4	0,00	0,00	0,00	0,998	1,000	1,000
2 - 6	1	5	0,00	0,00	0,00	0,996	1,001	1,000
2 - 7	3	6	0,00	0,00	0,07	0,998	1,000	1,001
3 - 5	4	7	2,86	3,32	0,00	0,996	0,999	1,000
4 - 8	1	8	0,00	0,00	0,74	0,998	1,000	1,000
5 - 9	1	9	0,00	0,00	1,62	0,996	1,001	0,999
5 - 10	5	10	0,88	0,95	0,88	0,994	0,999	0,998
5 - 12	3	11	1,24	0,26	1,29	0,994	0,994	0,995
7 - 11	2	12	0,07	0,00	0,00	0,995	1,001	1,000
8 - 16	1	13	1,18	1,09	0,58	0,994	0,998	0,997
10 - 13	1	14	1,47	0,68	2,67	0,992	0,990	0,991
11 - 14	4	15	9,33	1,36	3,97	0,987	0,997	0,994
12 - 15	2	16	0,00	0,00	0,00	0,998	1,000	1,000
13 - 17	1	17	0,07	1,77	0,00	0,992	0,996	0,994
14 - 18	1	18	0,00	0,00	0,07	0,992	0,987	0,990
15 - 19	2	19	0,09	0,91	0,67	0,985	0,993	0,991
17 - 20	1	20	2,01	0,07	1,40	0,988	0,993	0,990
18 - 21	1	21	0,00	3,51	1,05	0,992	0,983	0,989
19 - 22	2	22	1,03	1,24	1,28	0,982	0,989	0,987
20 - 23	1	23	0,07	0,00	0,00	0,986	0,990	0,986
22 - 24	1	24	0,61	1,31	1,00	0,980	0,986	0,984
23 - 25	5	25	0,00	1,07	0,00	0,986	0,989	0,985
24 - 26	1	26	0,00	0,00	0,00	0,979	0,985	0,983
25 - 27	1	27	0,00	0,00	0,00	0,986	0,989	0,985
25 - 28	2	28	1,96	0,00	2,08	0,983	0,987	0,981
26 - 29	1	29	0,00	0,00	0,00	0,979	0,983	0,981
28 - 30	1	30	0,17	0,17	0,17	0,982	0,984	0,977
29 - 31	1	31	0,00	0,00	0,06	0,979	0,983	0,981
29 - 32	1	32	0,00	0,00	1,06	0,979	0,983	0,980
29 - 33	1	33	0,00	0,65	0,61	0,978	0,982	0,981
30 - 36	1	34	0,00	0,00	0,02	0,979	0,983	0,980
32 - 34	1	35	0,00	1,08	0,00	0,977	0,981	0,981
33 - 35	1	36	1,08	0,02	1,04	0,981	0,980	0,974
35 - 38	1	37	0,18	3,30	0,18	0,981	0,977	0,971
36 - 37	1	38	1,06	0,00	0,00	0,976	0,981	0,981
37 - 39	1	39	3,19	3,19	3,28	0,981	0,977	0,969
TOTAL			30,14	26,66	26,55			
Poste Selecionado para Instalação do Transformador						Poste 3		
Poste Selecionado para Instalação do Banco de Capacitores						Poste 39		

Tabela 6: Custos totais para a solução.

Indicadores	Configuração Atual	Configuração Proposta
Operação (R\$)	10.896,18	2.562,89
Desequilíbrio (%)	33,34	8,48
Carregamento do Transformador (%)	137,24	120,57
Investimento no Circuito (R\$)	---	5.473,69

Os resultados indicam que a melhor solução encontrada foi através do equilíbrio adequado das cargas entre as fases *abc* em alguns pontos de carga, a realocação do transformador, o recondutoramento em alguns trechos do circuito e a instalação de um banco de capacitores no circuito secundário, com uma redução significativa das perdas e dentro dos recursos financeiros disponíveis para novos investimentos.

3.1 – Comentários dos Testes

Os custos totais indicados pelo PlanRSec (sistema desenvolvido neste trabalho) 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 a 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.

4. 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 a requisitos mínimos de qualidade devem ser satisfeitos simultaneamente. Tendo como referência principal o trabalho de Cossi [4], 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 implementado permite. O programa foi chamado de PlanRSec, e a tela principal pode ser vista na Figura 3.

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 [3] [6], e que é utilizado pelo programa PlanRSec de forma transparente ao usuário.

No teste apresentado, 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, deve-se 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.

5. Referências Bibliográficas

- [1] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica – Resolução 505 de 16 de novembro de 2001.
- [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.
- [3] CHENG, C.S.; Shirmohammadi, D.- A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, N° 2, 1995.
- [4] COSSI, ANTÔNIO MARCOS - Planejamento de Circuitos Secundários de Distribuição Usando Algoritmo Evolutivo Especializado, Dissertação de Mestrado, UNESP, 2003.
- [5] KAGAN, NELSON; Oliveira, Carlos Cear B.; Robba, Ernesto João - Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, Editora Edgard Blücher, 2005.
- [6] LUO, G. X.; Semlyen, A. - Efficient Load Flow For Large Weakly Meshed Networks. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, N° 4, 1990.
- [7] 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.