

# Sistema de Avaliação da Rede Secundária de Distribuição utilizando Algoritmos Genéticos

Secondary network distribution evaluation system using genetic algorithms

Alexandre Augusto Angelo de Souza<sup>1,2</sup>  
Flávio Neves Jr.<sup>2</sup>  
Heitor Silvério Lopes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Copel – Companhia Paranaense de Energia

Alexandre.souza@copel.com

<sup>2</sup>UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

neves@cpgei.cefetpr.br

hslopes@cpgei.cefetpr.br

**Abstract:** This work aims at evaluating the performance of an evolutionary approach of Pareto's Optimization for a multiobjective optimization problem. The purpose of the method is to generate a solution not dominated to determine an appropriate configuration for a circuit of the secondary network. The method considers values of supply voltage evaluated through the simulation of a power flow, as well as cost criteria for the proposed solution. For the determination of the best configuration of the circuit, replacement of cables and changes of the phases of consumers are evaluated, aiming at an improvement of voltage level of the circuit in analysis.

**Keywords:** Distribution secondary network, optimization, genetic algorithms.

**Resumo:** Neste trabalho é avaliado o desempenho de uma abordagem evolucionária baseada na otimização de Pareto para um problema de otimização multiobjetivo. O propósito do método é gerar uma solução não dominada para determinar uma configuração adequada para um circuito da rede de distribuição. O método considera valores de tensão de fornecimento avaliados através da simulação de um fluxo de potência, bem como critérios de custo para a solução proposta. É avaliada, para a determinação da melhor configuração do circuito, a troca de

bitola de cabos e a mudança de faseamento de cargas, com vistas a uma melhora no nível de tensão do circuito em análise.

**Palavras-Chave:** Rede secundária de distribuição, otimização, algoritmos genéticos.

## 1 Introdução

O objetivo deste trabalho é apresentar uma abordagem evolucionária para a determinação de uma configuração adequada para circuitos da rede de distribuição. Através da informação de uma possível solução encontrada, o sistema deverá determinar sua viabilidade, de acordo com parâmetros elétricos e de custo. Essa determinação a ser realizada analisa as possíveis manipulações da rede que podem ser efetuadas. A análise da configuração da rede, que comporta a simulação requerida, baseia-se na topologia atual do circuito em análise, procurando efetuar ações de troca no que efetivamente existe construído. As soluções freqüentes nesse tipo de sistema referem-se basicamente à mudança de faseamento das cargas de consumidores e à alteração da bitola de cabos nos pontos que ultrapassam os valores dos critérios técnicos adotados.

Um sistema elétrico de potência é constituído por usinas, subestações, linhas de transmissão e redes de distribuição. Normalmente, para efeito de análise e estudos, os sistemas elétricos de potência são subdivididos em três grandes blocos, que são geração, transmissão e distribuição [1]. O aplicativo proposto terá aplicação voltada à distribuição. Os investimentos praticados no segmento de distribuição de energia elétrica constituem-se num percentual significativo dos orçamentos das concessionárias de distribuição. Muitos fatores revelam a importância dessa parte do sistema elétrico, entre eles: a rede secundária é a parte do sistema responsável pelo atendimento a clientes; opera em um nível de tensão menor, tendo a maior concentração de consumidores; os custos envolvidos para a operação, construção e manutenção são muito altos.

Devido às baixas tensões, é no sistema de distribuição onde ocorre a maior parcela de perdas. No Brasil, os valores mais freqüentes para as perdas técnicas nas redes de distribuição estão entre 7 e 15% [2]. Esses números indicam a existência de oportunidades de projetos que possam auxiliar na redução de perdas. A expansão do sistema de distribuição é necessária sempre que a demanda de uma determinada região apresenta um crescimento significativo, aproximando-se dos limites de operação dos

equipamentos. A expansão pode envolver a construção ou a ampliação de subestações, instalação de postes, instalação e ou recondução de trechos de alimentadores e de trechos de circuitos secundários. Além desses custos de investimento e operação, é necessário considerar o custo de operação da rede.

Deve-se ressaltar que esse sistema está diretamente ligado com o geoprocessamento, de forma que as situações analisadas se utilizam não só de informações elétricas relevantes de elementos pertencentes à rede elétrica, mas também de suas coordenadas de posicionamento global. Essas informações, que são georreferenciadas, podem auxiliar o sistema no fornecimento de informações úteis para os usuários da localização das anomalias encontradas.

## 2 Fundamentação Teórica

A seguir serão descritas as técnicas envolvidas neste trabalho, a saber, algoritmos evolutivos e otimização de pareto, além da questão do planejamento da rede secundária.

### 2.1 Algoritmos Evolutivos

Os Algoritmos Evolutivos (AE) são a forma de implementação dos modelos computacionais de processos evolutivos na área da Computação Evolucionária (CE). Esses algoritmos possuem o propósito de direcionar uma busca estocástica, fazendo evoluir um conjunto de estruturas e selecionando de modo iterativo as mais aptas.

Ao executar um AE, as soluções de um problema são representadas por uma população de indivíduos que sofrem uma série de transformações para atualizar a busca e depois por um processo de seleção que favorece os melhores indivíduos. As transformações ocorrem devido à adaptação de cada indivíduo ao ambiente exposto. Toda vez que ocorre um ciclo de transformação associado à seleção constitui-se uma geração. São criadas tantas gerações quantas forem necessárias para obter o melhor indivíduo, o qual estará mais próximo da solução desejada.

Para um AE poder emular devidamente o processo evolutivo, deve conter uma população de possíveis soluções devidamente representadas através de indivíduos. Um procedimento de seleção é baseado em sua aptidão e outro na transformação, isto é, na geração de novas soluções a partir de soluções já existentes.

Dentro dessa estrutura, existem diversas variantes dos AEs e muitos sistemas híbridos incorporam várias características desse paradigma. Entretanto, todas as estruturas dessas variantes possuem métodos evolutivos muito semelhantes. Os cinco principais paradigmas dos AEs estão brevemente comentados abaixo:

- **Algoritmos Genéticos (AG):** Técnica de busca baseada na teoria de evolução de Darwin. Desenvolvida originalmente por Holland [3], modela a seleção natural e o processo da evolução das espécies. Eles podem ser considerados um processo de pesquisa, ao determinar os melhores indivíduos no espaço de busca de todos os possíveis indivíduos. Resumidamente, compreende a evolução de uma população de inteiros binários, os quais são submetidos a transformações unitárias e binárias genéricas e a um processo de seleção.
- **Programação Evolutiva:** Consiste na evolução de população com máquinas de estados finitos submetendo-as a transformações unitárias.
- **Estratégias de Evolução:** Trata-se de evoluir uma população de números reais que codificam as possíveis soluções de um problema numérico, onde a seleção está implícita.
- **Sistemas de Classificadores:** São sistemas capazes de perceber e classificar os acontecimentos em seu ambiente e reagir a eles apropriadamente.
- **Programação Genética:** Técnica que utiliza a metodologia da computação evolucionária não para solucionar o problema, mas sim para obter os melhores procedimentos possíveis para sua resolução.

### 2.2 Otimização de Pareto

Vilfredo Pareto [4] em 1896 estabeleceu que existe uma ordenação parcial no espaço de busca de um problema multiobjetivo. O critério de Pareto simplesmente estabelece que uma solução A é melhor do que uma solução B se A é tão boa quanto B em todos os atributos e melhor do que B em pelo menos um dos atributos. Mais formalmente, para um problema de otimização n-objetivos, o espaço de busca pode ser visto como um espaço n-dimensional e, portanto, cada solução é um n-vetor dos atributos.

Em um problema de maximização, dadas duas soluções

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ e } y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$$

o critério de Pareto diz que  $x$  domina  $y$  se:

$$x_i \geq y_i \quad \forall i \text{ e } \exists j \text{ tal que } x_j > y_j$$

A abordagem baseada em Pareto foi proposta por Goldberg [5] em 1989, e tornou-se o principal foco de pesquisa para AGS multiobjetivo.

### 2.3 Planejamento da Rede Secundária

Existem na literatura poucos artigos que tratam de projeto de rede secundária de distribuição por meio de programação matemática, em contraposição à grande quantidade de artigos que tratam do planejamento de redes primárias. Embora os sistemas sejam similares, existem características pertinentes à rede secundária que exigem uma modelagem de impedâncias e de demandas diferente da rede primária.

Um artigo que trata especificamente do planejamento da rede secundária foi proposto por Baklund e Bubenko [6], porém apresenta limitações no sentido de desconsiderar problemas de perdas na rede e limites de queda de tensão nos circuitos estudados. A metodologia apresentada consiste em se obter uma rede inicial por meio de um algoritmo de construção de "árvore de peso mínimo" [7]. A partir da solução inicial, melhorias são obtidas por troca de arcos da árvore. Essa metodologia tem algumas limitações importantes, principalmente em relação à otimalidade da solução obtida, uma vez que a solução inicial ignora aspectos fundamentais tais como custos de perdas.

No trabalho de Carson e Cornfield [8], foi desenvolvido um trabalho aplicando técnicas heurísticas para a solução e dimensionamento de redes de baixa tensão. Modelos mais recentes [9] [10] [11] têm tipicamente considerado o problema como uma programação inteira mista de larga escala que pode ser resolvida usando *solvers* comerciais existentes. Por causa da complexidade da formulação que cresce exponencialmente com o número de pontos de demanda e tipos de cabos a serem utilizados, esses modelos incorporam adaptações significativas para conseguir um tempo de resposta adequado.

No trabalho de Aoki et al [12], a programação inteira mista foi combinada com uma das mais eficientes técnicas heurísticas de otimização de redes radiais chamada de "Método de Mudança de Ramos". Esse algoritmo híbrido é menos sensível

ao rápido crescimento em complexidade comparado com o crescimento dos números de pontos de demanda a serem supridos, mas não consegue garantir o ponto ótimo de acordo com a natureza de aproximação do método adotado.

No trabalho de Ter-Gazarian e Kagan [13], foi desenvolvido um algoritmo de programação linear para otimizar uma combinação de fontes de energia convencional e renovável. Entretanto, o modelo proposto não considera a possibilidade de pontos isolados de geração.

Lambert e Hittle [14] apresentam um trabalho que considera técnicas de otimização combinatorial para o dimensionamento de uma rede secundária de acordo com um conjunto de pontos de demanda a serem atendidos. De acordo com essa metodologia, determina-se a topologia do circuito e o posicionamento do transformador. As limitações desse método referem-se ao fato de se assumir que os transformadores sejam de mesma capacidade, e que todos os cabos da rede secundária sejam de mesma bitola.

Uma abordagem utilizando técnicas heurísticas foi mostrada por Chandrashekara et al [15], a qual é aplicada ao planejamento de subestações, tratando de seu posicionamento baseado no momento elétrico. O momento elétrico é definido como o produto do total de carga em um ponto pela sua distância a um determinado ponto considerado para o cálculo.

O trabalho de Kauhaniem et al [16] apresenta um modelo matemático para o dimensionamento de redes que engloba a rede primária e secundária. Esse modelo difere dos modelos baseados em grafos que são normalmente encontrados em outros trabalhos tais como o de Cruz et al [17]. O modelo de otimização determina a quantidade de subestações, a capacidade nominal dos transformadores e a bitola de condutores.

No trabalho de Gonen e Ramirez-Rosado [18], foram avaliadas diversas publicações, sendo que muitas delas referenciam de maneira independente a alocação de subestações e roteamento de alimentadores para o planejamento da rede primária. Nesse artigo também é realizada uma classificação dos trabalhos de acordo com a metodologia de solução: programação dinâmica, programação matemática e métodos heurísticos.

No artigo de Khator e Leung [19], foram analisados e classificados cerca de trinta e oito trabalhos, vinte e quatro dos quais posteriores à revisão feita por Gonen e Ramirez-Rosado [17]. A classificação principal foi em planejamento sob condições de emergência (quinze trabalhos) e planejamento sob condições normais (vinte e três trabalhos).

Chen e Wu [20] apresentam uma formulação de programação dinâmica para a alocação de transformadores de acordo com a carga de consumidores para o aumento do ciclo de vida do equipamento. Nesse trabalho, o faseamento de consumidores foi formulado através de programação dinâmica.

Silva et al [21] apresentam modelos matemáticos para a resolução de posicionamento de transformadores, topologia da rede secundária e topologia da rede primária. O trabalho considera o custo para a construção da rede, bem como o critério técnico de queda de tensão.

No trabalho de Islam e Ghani [22], foi desenvolvida uma solução empregando técnicas heurísticas para a determinação do material e bitola dos cabos do alimentador considerando critérios técnicos e financeiros. A metodologia apresentada avalia a capacidade de condução de corrente dos condutores, queda de tensão em cada trecho do alimentador, além das perdas técnicas.

### 3 Metodologia

Nesta seção será apresentada a formulação do problema, bem como a codificação e penalidades utilizadas na avaliação das soluções.

#### 3.1 Formulação do Problema

Para a determinação de valores aceitáveis de tensão em um circuito da rede de distribuição, as alternativas avaliadas neste trabalho foram as seguintes:

1. troca de cabos nos trechos que estão com uma queda de tensão muito acima da aceitável;
2. troca de faseamento dos consumidores, fazendo com que o circuito fique mais equilibrado, e conseqüentemente, com uma tensão de neutro menor.

Para encontrar a melhor opção tanto do ponto de vista econômico quanto técnico, deve-se procurar simular várias situações para determinar a mais viável. Quando da realização deste estudo, já é prevista uma determinada taxa de crescimento de cargas. Esse procedimento é realizado para que as alterações realizadas possam ter uma maior suportabilidade de crescimento de cargas, evitando alterações freqüentes nos circuitos. A troca de faseamento dos consumidores no circuito é a situação mais barata e mais viável, porém é adequada apenas em situações em que o circuito está com um grande desequilíbrio. A solução geralmente adotada é a troca de cabos que acaba provocando uma melhora significativa das

restrições de queda de tensão e carregamento de cabos. A combinação dessas duas situações possibilita encontrar variações de alterações que possam significar uma boa melhora a um custo mais baixo para a concessionária.

Para determinar a configuração de rede a ser escolhida, foram avaliadas a Equação 1, referente à queda de tensão, e a Equação 2, referente ao custo de troca de cabos e faseamento de unidades consumidoras.

$$f1 = \frac{127 - menor\_tensao}{127} \quad (1)$$

$$f2 = \frac{cabo * 15 + uc * 1.5}{num\_cabo * 15 + num\_uc * 1.5} \quad (2)$$

O valor *menor\_tensao* na função *f1* refere-se ao menor valor da tensão do circuito após a simulação deste através do fluxo de potência. Esse valor reflete a qualidade técnica da solução encontrada.

Os valores *cabo* e *uc* na função *f2* referem-se ao total de cabos e faseamento de unidades consumidoras trocados respectivamente. Os valores *num\_cabo* e *num\_uc* referem-se ao total de cabos e de unidades consumidoras existentes no circuito.

O problema foi considerado como sendo de minimização, e as faixas de *f1* e *f2* estão definidas entre [ 0, 1].

Uma restrição passada para o algoritmo refere-se ao fato do usuário poder determinar um valor de tensão mínimo aceitável, neste estudo considerado 117 V. Quando da ocorrência de um valor de tensão inferior a esse especificado, é atribuído à função *f1* o valor 1, penalizando essa solução encontrada.

#### 3.2 Codificação

O cromossomo é composto por um número de genes iguais ao número de cabos e unidades consumidoras. Foi utilizada uma codificação binária para representar os cabos e o faseamento das unidades consumidoras. A representação dos cabos no sistema é feita através da relação mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Valores de Cabos.

Identificação do cabo	Cabo Comercial
1	Alumínio 06 AWG
2	Alumínio 04 AWG
3	Alumínio 02 AWG
4	Alumínio 1/0AWG
5	Alumínio 2/0 AWG
6	Alumínio 3/0 AWG
7	Alumínio 4/0 AWG

A representação do faseamento dos consumidores é feita através da relação mostrada na Tabela 2.

Tabela 2: Representação de Fases.

Identificação das fases	Faseamento Correspondente
1	A – monofásico
2	B – monofásico
3	C – monofásico
4	AB - bifásico
5	BC - bifásico
6	AC- bifásico
7	ABC - trifásico

O cromossomo de um estudo da aplicação pode ser visualizado na Figura 1. Na situação mostrada, o problema possui quatro cabos e cinco unidades consumidoras, os cabos estão representados através da codificação binária (101) e o faseamento através da codificação binária (001).

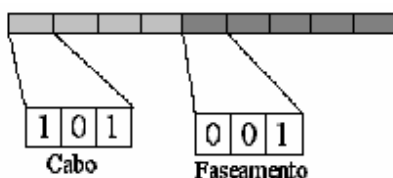


Figura 1: Representação Cromossômica

O cromossomo é inicializado com os valores aleatórios de carga e tipo de cabo. Para garantir a geração de soluções válidas, é necessário o uso de um decodificador do cromossomo que produza sempre soluções válidas. Este critério de correção de soluções geradas é importante devido ao fato de que um consumidor monofásico nunca poderá ser bifásico ou trifásico. Cada categoria de faseamento, seja monofásica, bifásica ou trifásica, não poderá ser alterada. A atitude a ser tomada nessa situação é apenas permitir a troca de fase utilizada no atendimento, porém mantendo a categoria de atendimento do cliente.

### 3.3 Avaliação das Soluções

O cromossomo é composto por informações dos cabos e o faseamento das unidades

consumidoras, o operador genético aplicado ao problema foi apenas a mutação. O processo de avaliação do algoritmo está representado na Figura 2, mostrando um pseudo-código da aplicação.

```

1 Gera solução inicial C
2 Repete até condição de parada
3 Aplica mutação em C para produzir M
4 Avalia M através do fluxo de potência
5 Se M domina C
6   Torna M como solução corrente e descarta C
7 Caso contrário
8   Descarta M
9 Volta para linha 2
    
```

Figura 2: Pseudo-Código da Solução

A avaliação das soluções consiste em verificar os valores das Equações 1 e 2, citadas anteriormente. A essas soluções encontradas é aplicado o critério de Pareto, para a determinação da solução dominante para o problema.

### 3.4 Penalidades Aplicadas

Para a resolução de um determinado circuito, o usuário pode especificar um valor mínimo de tensão a ser fornecido. Quando da não obtenção de fornecimento na tensão mínima, é aplicada uma penalidade na solução proposta, fazendo com que as Equações 1 e 2 assumam o valor máximo, ou seja, unitário. Como o problema sendo analisado tem a natureza de um problema de minimização, a solução proposta ao ser avaliada através de Pareto não será uma solução dominante e será descartada. A análise da aplicação das penalidades é mostrada na Figura 3.

```

1 Avalia solução proposta através do fluxo de potência
2 Verifica o valor da tensão mínima do circuito
3 Se tensão mínima abaixo da tensão exigida
4   f1 = 1 e f2 = 1
5 Se tensão mínima acima da tensão exigida
6   Calcula-se f1
7   Determinam-se as trocas para calcular f2
    
```

Figura 3: Pseudo-Código das Penalidades

### 3.5 Ponderação das Variáveis

O algoritmo procura determinar uma solução técnico-econômica adequada para um circuito da rede de distribuição. Para tanto realiza trocas de cabos e faseamento de consumidores. Nessas situações, para a avaliação da função  $f2$ , relativa ao custo da troca proposta, é considerado um preço fixo para cada troca de cabos e faseamento



dos consumidores. Para privilegiar a troca de faseamento de consumidores, é considerada a relação de 1:10 com relação ao preço da troca de cabos. Ou seja, sendo a troca de cabos dez vezes maior, a tendência é que o algoritmo favoreça a troca de faseamento dos consumidores em relação à troca de cabos.

#### 4 Resultados Obtidos

Para a validação do algoritmo foi montada a situação mostrada na Figura 4, que representa uma situação real instalada na rede de distribuição. O problema do circuito refere-se à queda de tensão elevada no poste de índice 17. Trata-se basicamente de um circuito com uma grande concentração de unidades consumidoras do tipo residencial, composto de um total de 62 consumidores.

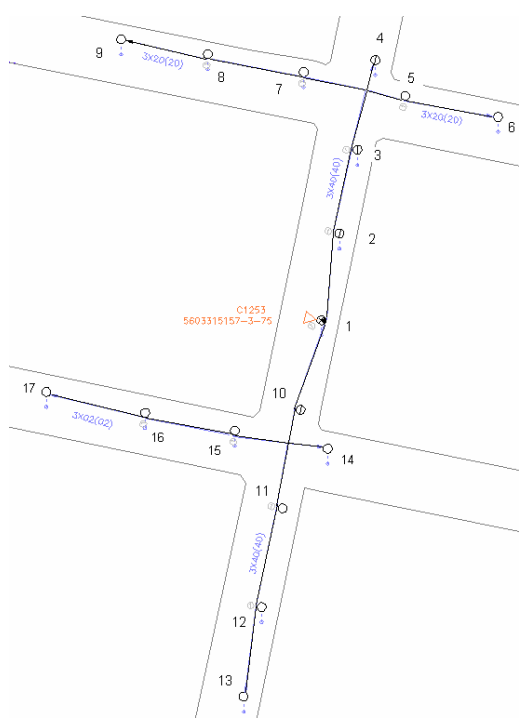


Figura 4: Topologia do Circuito

As configurações do circuito com relação a cabos condutores e cargas podem ser observados através das Tabelas 3 e 4 respectivamente.

Após a aplicação do algoritmo, foi sugerida uma nova situação de carga, porém a bitola dos cabos permaneceu a mesma. A configuração final do

circuito com relação a cabos e cargas pode ser observada através das Tabelas 5 e 6 respectivamente.

Tabela 3: Configuração de Cabos do Circuito.

Trecho entre postes	Cabo Comercial
1-2	4/0 AWG
2-3	4/0 AWG
3-4	4/0 AWG
5-6	2/0 AWG
5-7	2/0 AWG
7-8	2/0 AWG
8-9	2/0 AWG
1-10	4/0 AWG
10-11	4/0 AWG
11-12	4/0 AWG
12-13	4/0 AWG
14-15	02 AWG
15-16	02 AWG
16-17	02 AWG

Tabela 4: Cargas e valor de tensão por poste.

Poste	Carga por Fase ( kVA )			Tensão
	A	B	C	
1	0,90	0,95	1,66	127
2	0,95	1,49	0,00	125
3	0,00	0,00	0,00	124
4	0,54	1,10	0,56	123
5	0,00	0,00	0,00	123
6	2,16	0,57	0,58	122
7	2,09	2,07	0,58	122
8	4,38	3,72	3,38	121
9	1,44	0,91	1,92	121
10	0,00	0,00	0,00	123
11	0,00	0,00	0,00	120
12	8,97	12,22	12,02	119
13	0,79	0,79	1,32	118
14	0,38	0,38	0,38	120
15	0,61	0,97	2,54	119
16	3,81	1,48	2,79	117
*17	0,03	1,22	4,38	115

Tabela 5: Nova Configuração de Cabos do Circuito.

Trecho entre postes	Cabo Comercial
1-2	4/0 AWG
2-3	4/0 AWG
3-4	4/0 AWG
5-6	2/0 AWG
5-7	2/0 AWG
7-8	2/0 AWG
8-9	2/0 AWG
1-10	4/0 AWG
10-11	4/0 AWG
11-12	4/0 AWG
12-13	4/0 AWG
14-15	02 AWG
15-16	02 AWG
16-17	02 AWG

Observa-se na Tabela 5 que a configuração de cabos do circuito não sofreu alteração, ou seja, nenhuma alteração de bitola de cabos foi sugerida. Com a alteração de cargas, obtém-se uma melhora no nível de tensão do circuito principalmente nos postes de índice 16 e 17, obtendo-se, portanto, uma solução para o circuito somente com a alteração de faseamento de cargas instaladas nesses postes. A Tabela 6 relaciona as alterações sugeridas pelo método.

Tabela 6: Nova Configuração de Cargas e valor de tensão por poste.

Poste	Carga por Fase ( kVA )			Tensão
	A	B	C	
1	0,90	0,95	1,66	127
2	0,95	1,49	0,00	125
3	0,00	0,00	0,00	124
4	0,54	1,10	0,56	123
5	0,00	0,00	0,00	123
6	2,16	0,57	0,58	122
7	2,09	2,07	0,58	122
8	4,38	3,72	3,38	121
9	1,44	0,91	1,92	121
10	0,00	0,00	0,00	123
11	0,00	0,00	0,00	120
12	8,97	12,22	12,02	119
13	0,79	0,79	1,32	118
14	0,38	0,38	0,38	120
15	0,61	0,97	2,54	119
*16	4,03	1,48	2,57	119
*17	1,23	1,51	2,89	118

## 5 Conclusões

O algoritmo genético utilizado para resolver o problema forneceu uma boa solução para a determinação da configuração de cargas e cabos de um circuito. A análise de um sistema elétrico se faz por meio de simulações através de modelos matemáticos que o representam adequadamente por meio de equações. Uma vez fornecidos os elementos conhecidos das equações e uma vez que elas estejam resolvidas, tem-se o resultado para uma condição considerada de operação. A simulação da rede elétrica representa a principal atividade para o planejamento da expansão e operação a serem realizados. Com a utilização de algoritmos genéticos, procura-se diminuir a complexidade dos métodos relacionados para resolver problemas dessa natureza, podendo suprir boas soluções técnicas com um tempo de análise e desenvolvimento menor para a sua implementação.

Com a utilização desta metodologia proposta e dos produtos obtidos através dela, pode-se prover uma solução referente à necessidade de simplificar a apresentação dos dados e a análise dos resultados, tendo em vista que os métodos de análise de sistemas de potência têm sido utilizados por uma grande variedade de pessoas

que possuem pouco tempo para a preparação e análise dos dados. Uma melhor estruturação dos produtos de saída gerados pelo sistema constitui um ponto forte do sistema proposto. Deve-se ressaltar que este sistema terá como uma de suas metas a determinação adequada da configuração de cabos e faseamento de consumidores, de uma forma clara e precisa para o usuário da parte técnica.

Outra meta a ser atingida se refere à inteligência a ser incorporada ao sistema, que pode se tornar um diferencial nas soluções providas pelo sistema. A análise criteriosa das possíveis alternativas de operação da rede possibilita a determinação da melhor utilização dos equipamentos envolvidos. A existência desse "ponto ótimo" de operação de equipamentos indica que, em muitas situações, pode-se minimizar os custos relacionados à manutenção e construção da rede. Este aplicativo também pode ter uma utilização direta para o treinamento de novos projetistas de redes, que poderão simular vários estudos e realizar uma análise dos relatórios.

## 6 Referências

- [1] STEVENSON, W. D. **Elements of Power System Analysis**. McGrawHill Fourth Edition, 1987.
- [2] CARNEIRO, M. S.; FRANCA P.; SILVEIRA P. D. Long-range planning of power distribution systems: primary networks. **Electrical Power & Energy Systems**, v. 1, p.139-149, 1993.
- [3] HOLLAND., J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. Michigan Press, 1975
- [4] PARETO, Vilfredo. Cours d'Economie Politique. Lausanne: Rouge, 1896.
- [5] GOLDBERG, David E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Addison Wesley, 1989.
- [6] BAKLUND, Y.; BUBENKO, J. A. Computer-aided distribution system planning. **Electrical Power & Energy Systems**, v. 121, p. 35-45, 1979.
- [7] AHUJA, R.; MAGNANTI, T.; ORLIN, J. **Network Flows: Theory and Applications**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.
- [8] CARSON, M. J.; CORNFIELD, G. Design of Low-voltage Distribution Networks: interactive computer method based on the calculus of variations. In: IEE Proceedings 120, p. 585-589, 1973.

- [9] HINDI, K. S.; BRAMELLER, A. Design of low-voltage distribution networks: a mathematical programming method. In: IEE Proceedings 1977 - 124, p. 54-58., 1977.
- [10] EL-KADY, M. A. Computer-aided planning of distribution substation and primary feeders. **IEE Transactions Power Apparatus System**, v. 103, p. 1183-1189, 1984.
- [11] HAMAN, Y.; HINDI, K. Optimized design of low-voltage distribution networks: a comprehensive algorithm. **IEEE Transactions System Man Cybernetics**, v. 17, p. 502, 1987.
- [12] AOKI, K.; NARA, N.; SATOH, T.; KITAGAWA, M.; YAMANAKA, K. New approximate optimization method for distribution system planning. **IEEE Transactions Power Systems**, v. 5, p. 126-132, 1990.
- [13] TER-GAZARIAN, A.; KAGAN, N. Design model for electrical distribution systems, considering renewable, conventional and energy storage units. In: IEEE Proceedings Part C. Generation Transmiss. Distrib., p. 449-455, 1992.
- [14] LAMBERT, T. W.; HITTLE, D. C. Optimization of autonomous village eletrification systems by simulated annealing. **Solar Energy**, v. 68, p. 12-132, 1999.
- [15] CHANDRASHEKARA, A. S.; ANANTHAPADMANABHA, T. KULHARNI A. D. A neuro-expert system for planning and load forecasting of distribution systems. **Electrical Power & Energy Systems**, v. 21, p. 309-314, 1999.
- [16] KAUHANIEMI, K.; MÄKINEM, A.; LAKERVI, E. Mathematical modeling of eletrical distribution system with several voltage levels. In: IEEE Proceedings Int. Symp. on Circuits and Systems, p. 425-428, 1988.
- [17] CRUZ, F. R.B.; SMITH, J. M.; MATHEUS, G. R. Algorithms for a multi-level network optimization problem. **European Journal of Operations Research**, 118, p.164-180, 1999.
- [18] GONEN, T.; RAMIREZ-ROSADO, I. Review of distribution system planning models: a model for optimal multi-stage planning. In: IEEE Proceedings Part C 133, p. 397-408, 1986.
- [19] KHATOR, S.; LEUNG, L. C. Power distribution planning: A review of models and issues. **IEE Transactions on Power Systems**, p.1151-1157, 1997
- [20] CHEN, C.; WU T. Optimal distribution transformer sizing by dinamic programming. **Electrical Power & Energy Systems**, v. 20, p. 161-167, 1998.
- [21] SILVA, M. C.; FRANÇA, M. P.; SILVEIRA, P. D. (1996). Long-range planning of power distribution systems: Secondary networks. **Computers Elect. Eng.**, v. 22, p. 179-191, 1996.
- [22] ISLAM, S. J.; GHANI, M. R. A. Economical optimization of conductor selection in planning radial distribution networks. **IEE Transactions on Power Systems**, p.858-863, 1999.