

Algoritmo Evolutivo Dedicado À Solução Do Problema De Reconfiguração De Sistemas De Distribuição Radiais

J. C. Cebrian – J. R. S. Mantovani – R. Romero : DEE/FEIS/UNESP

E-mails: cebrian@dee.feis.unesp.br, mant@dee.feis.unesp.br, ruben@dee.feis.unesp.br

Palavras Chaves - Sistemas de Distribuição, Otimização de Perdas, Técnicas de Busca Ótima, Otimização Combinatorial.

Resumo - Os sistemas aéreos de distribuição de energia são em sua grande maioria radiais, possuindo chaves de manobras localizadas em pontos estratégicos da rede com o objetivo de reconfigurar o sistema. A reconfiguração em sistemas de distribuição é realizada através das operações de fechamento/abertura de chaves seccionadoras, sendo aplicada no planejamento da operação com vista a redução de perdas e balanceamento de cargas. Neste trabalho apresenta-se um algoritmo evolutivo para resolução de problemas de reconfiguração, que consiste da geração de uma população inicial de topologia radiais, esquemas de codificação, recombinação e mutação que permitem identificar e preservar a radialidade da rede. A metodologia proposta envolve a obtenção do estado da rede para cada configuração, para o qual foi implementado um algoritmo de fluxo de carga radial eficiente, preciso e rápido no auxílio à busca de soluções para o problema.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica são, na maioria, configurados radialmente com o propósito de facilitar fatores inerentes à proteção, tais como: coordenação e atenuação de correntes de curto-circuito visando reduzir custos com equipamentos. Em geral, estes sistemas apresentam possibilidades de alteração da topologia, através da abertura/fechamento de chaves seccionadoras localizadas em pontos estratégicos. Assim, estas chaves seccionadoras são utilizadas para ambos objetivos: proteção (isolamento de faltas) e reconfiguração, que apresenta um problema de formulação matemática complexa, em que a exigência de radialidade é uma dificuldade adicional, e dada sua natureza combinatorial é de difícil tratamento. Em consequência dessas dificuldades para resolução de problemas com essas características, como é o caso do problema da reconfiguração, além das técnicas de otimização clássica e combinatorial são propostas por alguns pesquisadores os algoritmos heurísticos.

Com o objetivo de reduzir o espaço de busca, as técnicas heurísticas consistem em um conjunto de regras simples, muitas vezes baseadas em procedimentos práticos retirados da experiência dos operadores, que encontram soluções de boa qualidade para problemas complexos com esforço computacional relativamente pequeno. Entretanto, não garantem encontrar a solução ótima.

Geralmente são usadas quando não existe método exato de resolução, existe a dificuldade na formulação matemática ou a metodologia existente necessita de elevado esforço computacional para resolver um problema dessa natureza. [5] propõem uma metodologia heurística para reconfiguração de redes com vistas a reduzir o número de reconfigurações candidatas, utilizando como critério uma fórmula interessante e de uso simples que exclui opções indesejadas de chaveamento sem a necessidade de se efetuar numerosos cálculos de fluxos de potência, reduzindo significativamente o esforço computacional [1] utilizam a aproximação proposta em [5], para a abertura dos laços gerados no processo de reconfiguração da rede. Entretanto, introduzem dois diferentes métodos de cálculo de fluxo de carga para redes radiais, com vários graus de precisão, para calcular o estado da rede depois da transferência de uma carga entre duas subestações, alimentadores ou ramos. Esses métodos de fluxo de carga usam um novo conjunto de equações que foram desenvolvidos especialmente para alimentadores radiais de distribuição e foram usados no problema de alocação de capacitores em redes de distribuição [2]. Em [3] apresenta-se um enfoque na ordenação e numeração dos nós da rede, sendo que isto é de grande importância para a eficiência da maioria dos métodos para cálculo de fluxo de carga em redes radiais. Um método heurístico simples é proposto em [7], onde utilizam uma técnica de busca em árvores do tipo branch and bound para encontrar o conjunto das melhores configurações para redes radiais. Apresentam um método de cálculo de fluxo de carga radial rápido e eficiente, além de um critério de corte para reduzir o espaço de busca de configurações baseado no limite máximo de queda de tensão.

Em [4] apresenta-se um algoritmo genético refinado (RGA) junto com um conjunto de equações de fluxo simplificado que são aplicados para a reconfiguração e minimização de perdas. Apresentam também propostas de uma estrutura de cadeia genética, técnicas de recombinação e mutação, com o objetivo de se obter um procedimento eficiente na reconfiguração de uma rede de distribuição. A mutação combina técnicas de *simulated annealing* que modifica a taxa de mutação de uma forma eficiente.

Neste trabalho o problema de reconfiguração de redes de distribuição é tratado como um problema de programação não linear de grande porte com variáveis reais e inteiras. Para solução desse problema utiliza-se um algoritmo evolutivo que considera um esquema de codificação em

base decimal e efetua os operadores recombinação e mutação com vistas a manter a radialidade da rede de distribuição através das gerações. Para efetuar os cálculos referentes a função adaptação e calcular o estado das diferentes topologias de rede foi implementado um algoritmo de cálculo de fluxo de carga rápido e eficiente. Foram simulados e obtidos resultados de excelente qualidade para sistemas com 14, 69 e 135 barras, com 3, 5, e 21 chaves de interconexão disponíveis, respectivamente.

2. FORMULAÇÃO GERAL DO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO

Os sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica por sua característica radial apresentam possibilidades de alteração da topologia através da abertura/fechamento de chaves seccionadoras localizadas em pontos estratégicos. A alteração da topologia, mantendo-se a radialidade, é realizada de modo a reduzir as perdas ativas nos alimentadores, melhorar o perfil de tensão para os consumidores, aumentar os níveis de confiabilidade e eliminar e/ou isolar faltas restaurando o fornecimento de energia.

Seja uma configuração base de uma rede com um conjunto de circuitos que estão energizados, formando a configuração radial chamada de *Ramo de Árvore*, da teoria dos grafos. Por outro lado, os circuitos que não estão energizados são chamados de *Ramos de Ligação* como mostra a Figura-1.

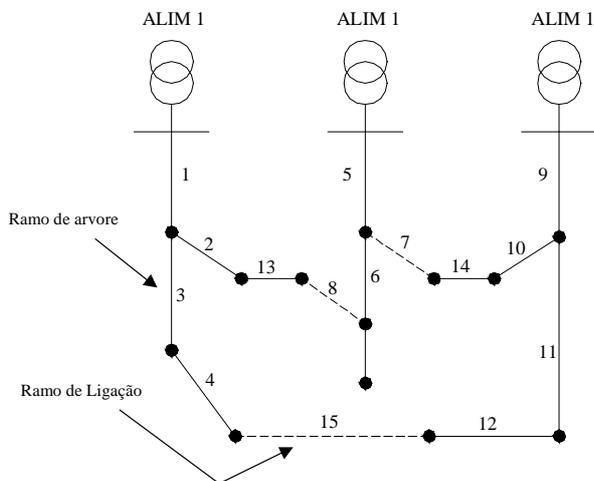


Fig.- 1: Diagrama unifilar de um sistema mostrando os ramos da árvore e os ramos de ligação.

Uma troca adequada de um ramo de ligação com um ramo de árvore leva a outra configuração radial. Portanto o problema de reconfiguração ótima de um sistema de distribuição consiste em encontrar aquela configuração radial, do espaço de configurações radiais possíveis, que produza perdas mínimas de potência e atenda as restrições de confiabilidade e qualidade de serviço. Este processo de busca ótima implica analisar implícita ou explicitamente todas as configurações radiais possíveis.

Dessa forma, o problema da reconfiguração de redes de distribuição pode ser formulado, genericamente, como

um problema de otimização não linear com variáveis inteiras e reais, cuja solução envolve a seleção dentre todas as configurações possíveis, daquelas que têm as menores perdas e que satisfaçam a um conjunto de restrições: Radialidade, Restrições de Níveis de tensão, Confiabilidade do Sistema, Balanço de Carga entre os alimentadores.

3. TÉCNICA DE SOLUÇÃO

Neste trabalho o problema de reconfiguração é resolvido usando um algoritmo genético do tipo evolutivo [4] que é um processo de otimização combinatória e se inicia com a geração aleatória de uma população, isto é, um conjunto de soluções (configurações) candidatas. Cada configuração é qualificada pelo valor da função objetivo que apresenta. Todos os elementos da população são classificados pela qualidade de sua correspondente função objetivo. Assim, cada elemento recebe uma determinada probabilidade para gerar os elementos (configurações) na geração seguinte. Os elementos melhores qualificados neste processo têm, no sentido probabilístico, maior probabilidade de participar na geração dos elementos da nova população. Essa nova geração é obtida com as operações de recombinação e mutação. A recombinação leva a uma transferência de material genético entre as melhores configurações. Eventualmente devem aparecer elementos da nova geração com melhor material genético das configurações melhores qualificadas, produzindo novas configurações de excelente qualidade. Na natureza, a mutação produz a regeneração da perda de material genético. Nos algoritmos evolutivos a mutação produz uma modificação esporádica e aleatória de alguns genes de um elemento (configuração) da população. De forma geral, os algoritmos evolutivos são técnicas de otimização combinatória que iniciam o processo de otimização com uma população inicial, fazem um ordenamento seletivo dos elementos da população avaliando a qualidade da função objetivo e geram uma nova população num processo de três etapas: **seleção, recombinação e mutação.**

3.1. Geração da Configuração Inicial e o Esquema de Codificação

Um conjunto de configurações iniciais geradas de forma aleatória e infactíveis pode impor um esforço computacional excessivo, gerando propostas de investimentos pouco atraentes. Esta é uma das diferenças básicas entre os algoritmos genéticos que utilizam uma geração aleatória da população inicial e codificação binária, e os algoritmos do tipo evolucionários em que a população inicial é gerada através de técnicas heurísticas, e utilizam uma codificação em que é levada em consideração as características específicas do problema sob estudo.

Uma dificuldade específica do problema de reconfiguração de redes de distribuição está relacionada em atender à restrição de radialidade. Para contornar este problema, trabalhou-se com a estrutura de representação

dos cromossomos e um algoritmo heurístico referenciado como *teste de subsistemas radiais* para identificar inicialmente topologia radiais. Define-se subsistema radial como o conjunto de linhas de todo o sistema de distribuição que possuem apenas uma fonte de alimentação. Este conjunto de linhas não participam na busca de configurações radiais porque já são parte do conjunto de ramos que formam o sistema distribuição radial. Dessa forma, é necessário numerar cada ramo (incluindo ramos de árvore e ramos de ligação), e armazenar o número de chaves que correspondem ao ramo de ligação. A representação dos ramos de ligação na cadeia genética está ilustrada na Figura-2, onde “N” é o número total de ramos de ligação que o sistema necessita para manter a condição de radialidade. Como o número dos ramos de ligação é apenas uma pequena parcela do total de ramos do sistema, a representação de uma estrutura da cadeia genética para o problema de reconfiguração como da Figura-3 que representa o sistema de 14 barras na Figura-4, se mostra eficiente.

Ramos de ligação Número(1)	Ramos de ligação Número(2)	Ramos de ligação Número(N)
-------------------------------	-------------------------------	-------	-------------------------------

Fig.- 2 Cadeia Genética



Fig.- 3 Exemplo da representação de um cromossomo (cadeia genética)

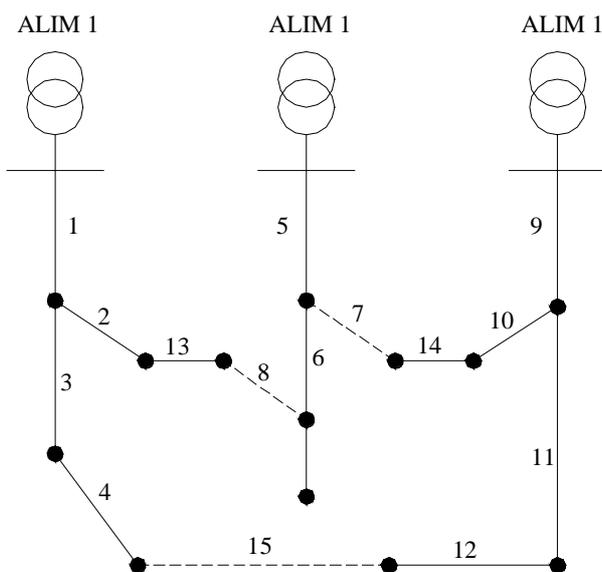


Fig.-4 Diagrama Sistema de 14 barras

3.2. Avaliação da Função de Adaptação

Para avaliar a qualidade de cada configuração são considerados aspectos relativos às perdas de energia nos alimentadores e qualidade do perfil de tensão. Para proceder essa análise processa-se um programa para cálculo de fluxo de carga para cada configuração e através dos resultados obtidos (as perdas ativas e a magnitude das tensões), avalia-se a qualidade da reconfiguração através da Equação 1, que representa a função de adaptação (*fitness*) que deve ser minimizada:

$$F_{\text{adaptação}} = \sum \text{Perdas Ativas Alimentadores} + \text{Penalização das Magnitudes das Tensões Violadas} + \text{Penalização da Violação dos fluxos de potência nas linhas} \quad (1)$$

3.2.1. Fluxo de Carga.

Para reduzir o esforço computacional do algoritmo evolutivo que necessita para simulação de sistemas reais o processamento de milhares de programas de fluxo de carga, foi implementado um método aproximado de fluxo de carga semelhante ao encontrado em [1], referenciando na literatura como de *Forward Update DistFlow*. Este método utiliza um modelo de potência constante, em que as potências são corrigidas em função da variação da tensão.

O algoritmo de fluxo de carga implementado consiste basicamente dos seguintes passos:

- i. Leitura dos dados do sistema: nó inicial, nó final, resistência, reatância, potência ativa, potência reativa e a tensão no nó fonte (*source voltage*).
- ii. Calcular os valores das injeções de potência ativa, reativa e tensão (Equações 2-4) nas barras do sistema partindo do nó raiz (S/E) até as barras finais – operação *Forward* (para a primeira iteração: assumir a tensão da barra fonte e a soma total das perdas ativa e reativa iguais a zero).

$$P_{i+1} = P_i - r_i \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) - P_{i+1} \quad (2)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_i \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) - Q_{i+1} \quad (3)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + \frac{(r_i^2 + x_i^2)}{V_i^2} (P_i^2 + Q_i^2) \quad (4)$$

- i : Número da barra do sistema;
- V_i : Magnitude de tensão na barra i ;
- P_i, Q_i : Injeção de potência Ativa e Reativa, respectivamente, na barra i ;
- r_i, x_i : Resistência e Reatância do ramo i (entre as barras $i+1$ e i), respectivamente.

- iii. Calcular e armazenar os valor das perdas ativas e reativas de cada uma das linhas (Equações 5-6).

$$Pativa_i = r_i \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) \quad (5)$$

$$Preativa_i = x_i \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) \quad (6)$$

- iv. Teste de convergência: se os valores de $|P_{i+1}|$ e $|Q_{i+1}|$ em todas as barras finais são menores que uma tolerância estabelecida e fixada (≈ 0), vá para o passo v. Caso contrário acrescentar o valor das perdas ativas e reativas a P_0 e Q_0 , respectivamente, e ir para passo *ii*.
- v. Fim. Imprimir os valores das tensões em cada barra, assim como as perdas ativas e reativas do sistema radial, e os fluxos ativo e reativo nas linhas.

3.3. Seleção das Melhores Configurações.

As configurações são escolhidas mediante jogos (torneios) e a quantidade de torneios é equivalente ao tamanho da população, tornando essa proposta significativamente diferente da seleção proporcional [8]. A cada jogo são escolhidos aleatoriamente um conjunto de k configurações e a configuração ganhadora é aquela com melhor função objetivo. O valor de k geralmente é pequeno, tipicamente $k \in \{2, 3, 4, 5\}$. Realizam-se n jogos.

3.4. Processo de Recombinação

Para que as configurações selecionadas sejam submetidas a recombinação, deve-se gerar um número aleatório $p \in [0,1]$. Se p é menor que a taxa de recombinação ρ_c então, deve-se proceder a recombinação. Caso contrário, as duas configurações selecionadas não são recombinadas.

Para ilustrar a forma como esse operador foi tratado seja Figura-6(a) em que as duas configurações factíveis são candidatas para a recombinação. A codificação está implementada segundo os ramos de ligação, e com esta codificação são verificados dois quesitos nos cromossomos candidatos para implementar a recombinação:

1. As configurações geradas pela recombinação devem possuir os genes comuns dos pais ;
2. Os genes diferentes dos pais são trocados um a um dependendo de sua posição com a condição de manter-se a radialidade da rede na cadeia genética. Se a cadeia genética depois de cada troca é infactível então os genes trocados retornariam às suas posições originais. Considerando n como número de genes diferentes, considera-se o número de possíveis trocas igual a $(n-1)$ para evitar retornar à configuração inicial dos pais. Se depois de testar $(n-1)$ possíveis trocas não é possível encontrar uma codificação factível na cadeia genética os pais selecionados não realizam recombinação.

Nesta técnica de recombinação se faz aplicação da cadeia genética ilustrada na Figura-4. Na Figura-6 o processo de

recombinação com variáveis inteiras está ilustrado. Comparando a codificação do pai 1 e a codificação do pai 2, em que 14 é o gene comum, ambos filhos herdam o gene 14 de seus pais. Os genes 13, 15, 4 e 8 são aleatoriamente distribuídos ao filho 1 e ao filho 2. Na Figura-6(b), o filho 1 herda os genes 8 e 15, e o filho 2 herda os genes 4 e 13.

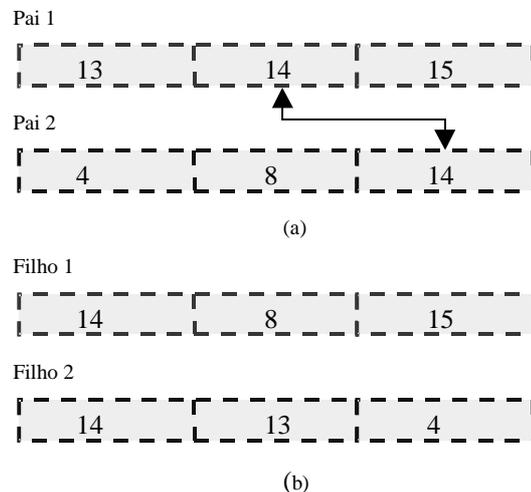


Fig.- 6 Processo de recombinação ((a) antes e (b)depois da mutação)

3.5. Mutação

O processo de mutação consiste em modificar a estrutura genética dos indivíduos de forma aleatória. Considerando o cromossomo como uma cadeia de bits, só precisa trocar um deles para obter um cromossomo com uma nova informação genética que não se encontra na população base. Este efeito, permite uma diversificação da população, e que as soluções não converjam prematuramente para um ótimo local. A necessidade da mutação aumenta na fase final do procedimento quando a população torna-se mais homogênea e dominada pelos genes mais eficientes. A mutação introduz mudança em torno das variáveis, explorando novas zonas no campo da otimização.

A taxa de mutação ρ_m fornece a probabilidade de que um gene será mutado. Assim, supor que seja escolhida uma taxa de mutação de (ρ_m) então cada cromossomo é submetido a mutação com esta probabilidade. Desta forma, é gerado um numero aleatório $p \in [0,1]$. Se esse número é menor que a taxa de mutação (ρ_m) preestabelecida, então, é realizada a mutação. A mutação acontece com os ramos de árvore que pertencem a um mesmo laço. Na implementação de mutação também existe necessidade de gerar um número aleatório que identifica a posição do gene para realizar a mutação.

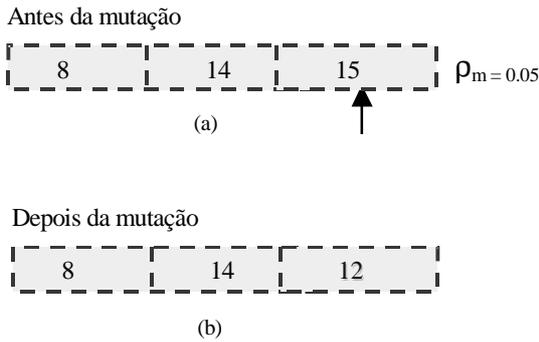


Fig - 7 Representação dos Cromossomos ((a) antes e (b)depois da mutação)

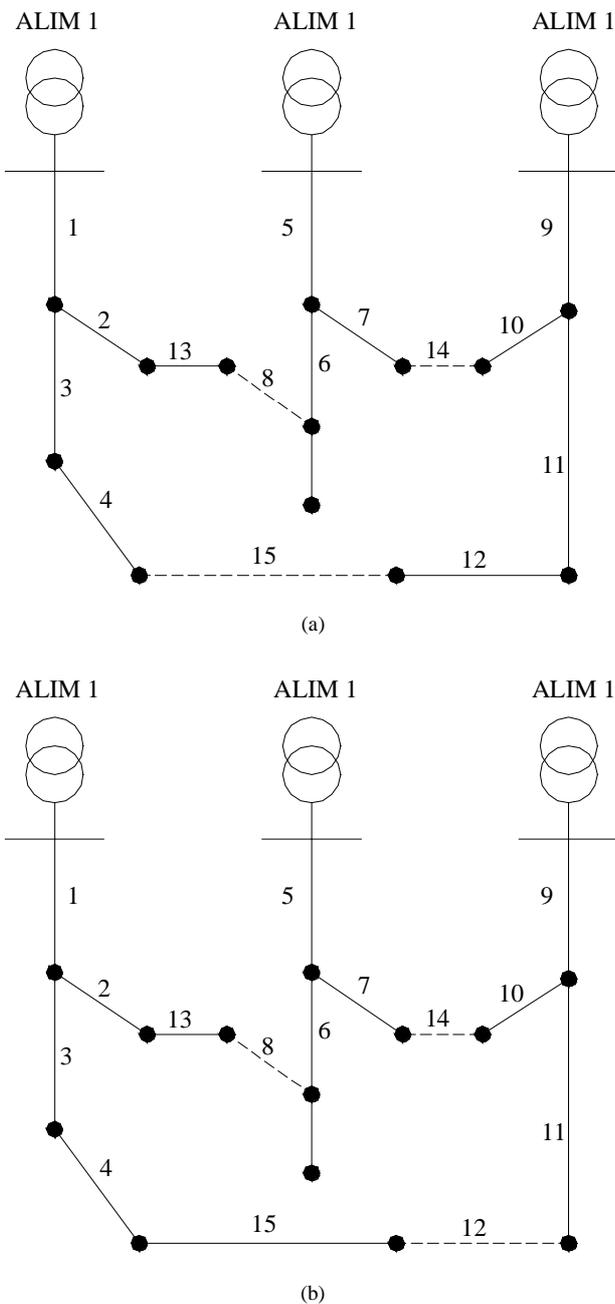


Fig.- 8 Representação do Sistema ((a) antes e (b)depois da mutação)

A técnica de mutação mantém a radialidade da rede de distribuição. Primeiro, seleciona-se aleatoriamente um ramo de ligação da cadeia genética, depois o ramo de ligação é fechado. O sistema apresenta um laço com duas fontes de alimentação que são interligadas pelo ramo de ligação. Segundo, escolhe-se um dos ramos da árvore que pertence ao laço que é aberto como novo ramo de ligação. A Figura-7 ilustra o processo de mutação, em que o ramo de ligação 15 é escolhido aleatoriamente para realizar a mutação. O ramo de ligação escolhido forma parte do laço 3, 4, 15, 12 e 11 gerado. Novamente é escolhida aleatoriamente uma das chaves como o novo ramo de ligação. Por exemplo a chave 12 é escolhida então a estrutura depois da mutação é mostrada na Figura-8(b).

3.6. Critério de parada

O critério de parada compara a solução incumbente, se esta não apresenta melhoria durante um número especificado de iterações, o processo é considerado convergido.

4. RESULTADOS

Foi realizado a implementação computacional da metodologia detalhada na seção 3, em linguagem de programação FORTRAN. São apresentados testes experimentais com os sistemas de 14, 69 barras conhecidos na literatura [5,6], e um sistema real de 135 barras [7].

4.1. Sistema de 14 barras [5]

O primeiro sistema testado apresenta 3 alimentadores, 13 ramos de árvore, 3 ramos de ligação, tensão de 23 kV, potência base 100 MVA e cargas ativa total de 28,9 MW. A topologia do sistema é mostrada na Figura-4. A Tabela I mostra as melhores configurações encontradas. Para a melhor configuração da Tabela I, O valor da mínima tensão é de 0,971 pu com um valor de perdas ativa de 466,12 kW.

TABELA I
MELHORES CONFIGURAÇÕES OBTIDAS (14 BARRAS)

Número da Configuração	Chaves Abertas	Valor da Perda (kW)
01	7-8-15	466,12
02	7-8-4	479,29
03	7-13-15	483,87
04	7-8-12	492,83

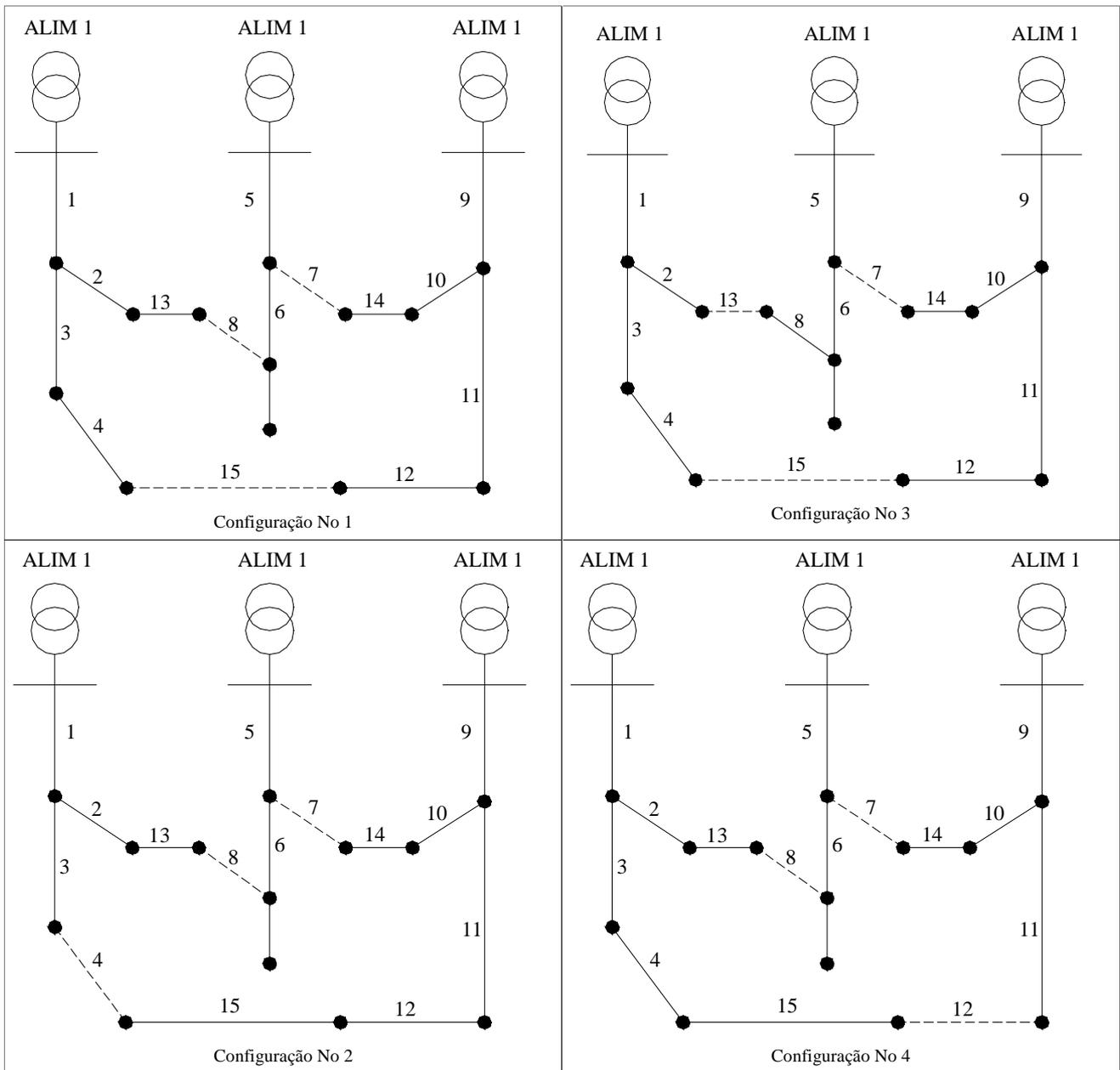


Fig.- 9 Topologia das Melhores Configurações – Sistema de 14 barras

4.2. Sistema de 69 barras [6]

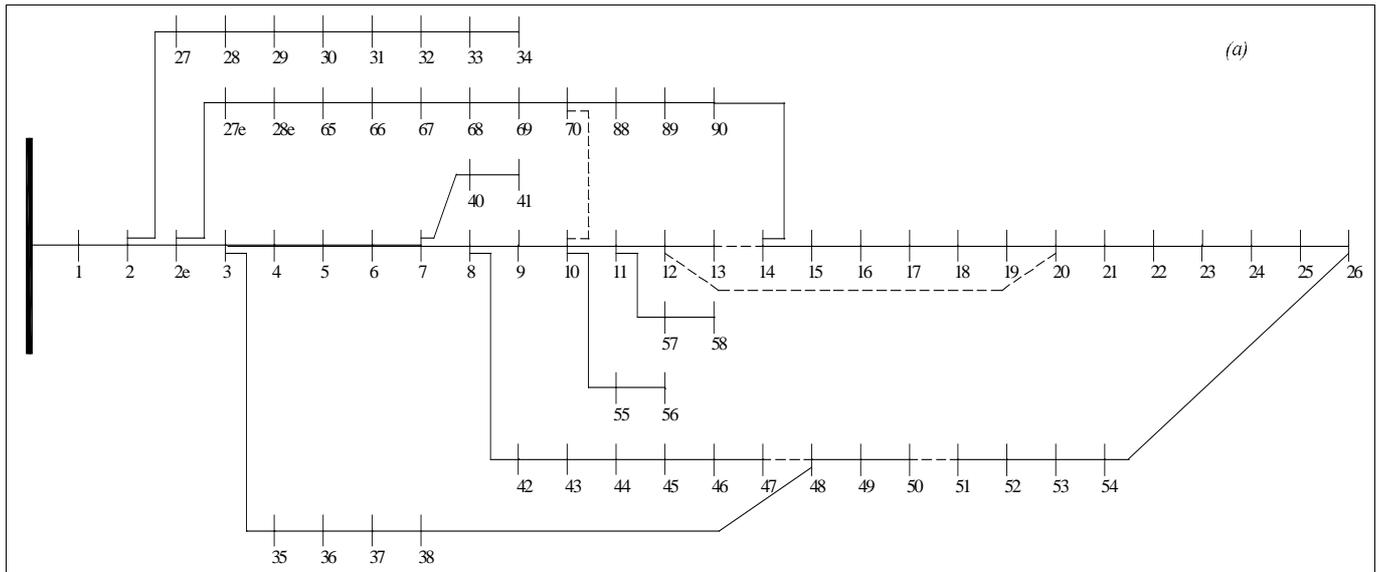
O Segundo sistemas tem 69 barras, 5 ramos de ligação, tensão 12,66 kV, potência base de 100 MVA.

Na Tabela II estão as chaves que devem operar abertas para as 5 melhores configurações encontradas para este sistema, com os respectivos valores de perdas ativas.

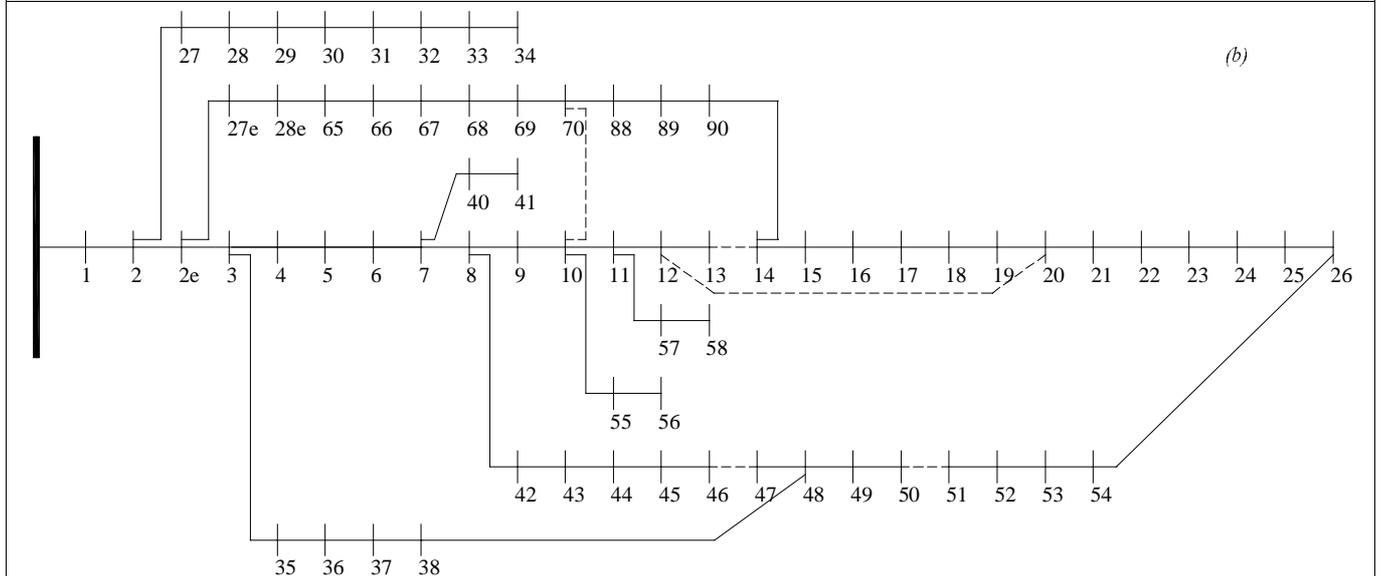
Para o sistema de 69 barras encontra-se a melhor configuração com uma codificação de 15-58-62-70-71(chaves abertas) e uma perda ativa de 9,423kW, com um mínimo de tensão de 0,982 pu. para a melhor configuração. As topologias para as quatro melhores configurações estão representadas na Figura-10(a, b, c, d).

TABELA II
MELHORES CONFIGURAÇÕES OBTIDAS (69 BARRAS)

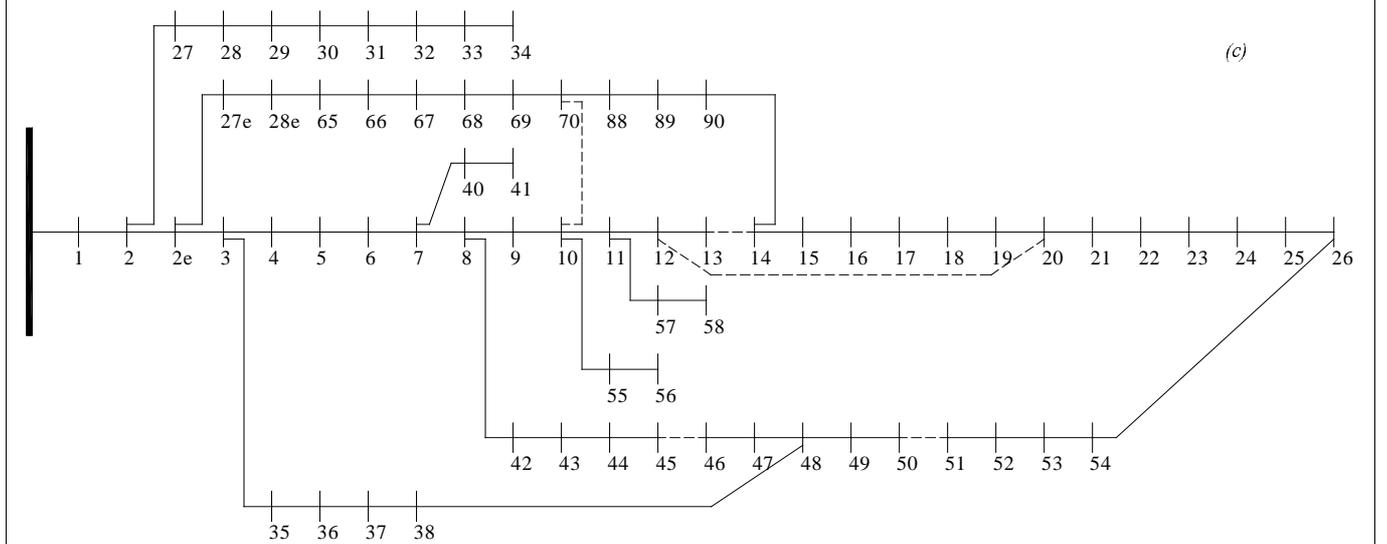
Número da Configuração	Chaves Abertas	Valor da Perda (kW)
01	15-59-62-70-71	9,423297
02	15-58-62-70-71	9,423430
03	15-57-62-70-71	9,423430
04	14-59-62-70-71	9,430975



Configuração No 1



Configuração No 2



Configuração No 3

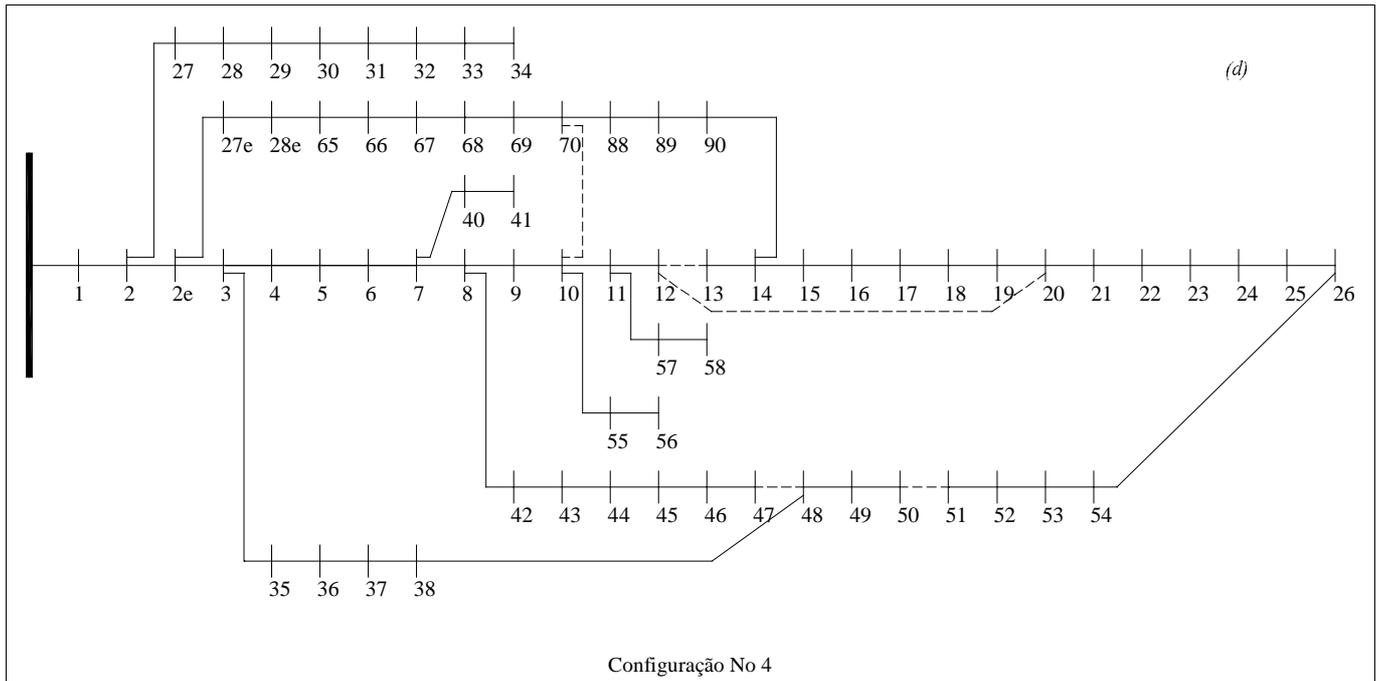


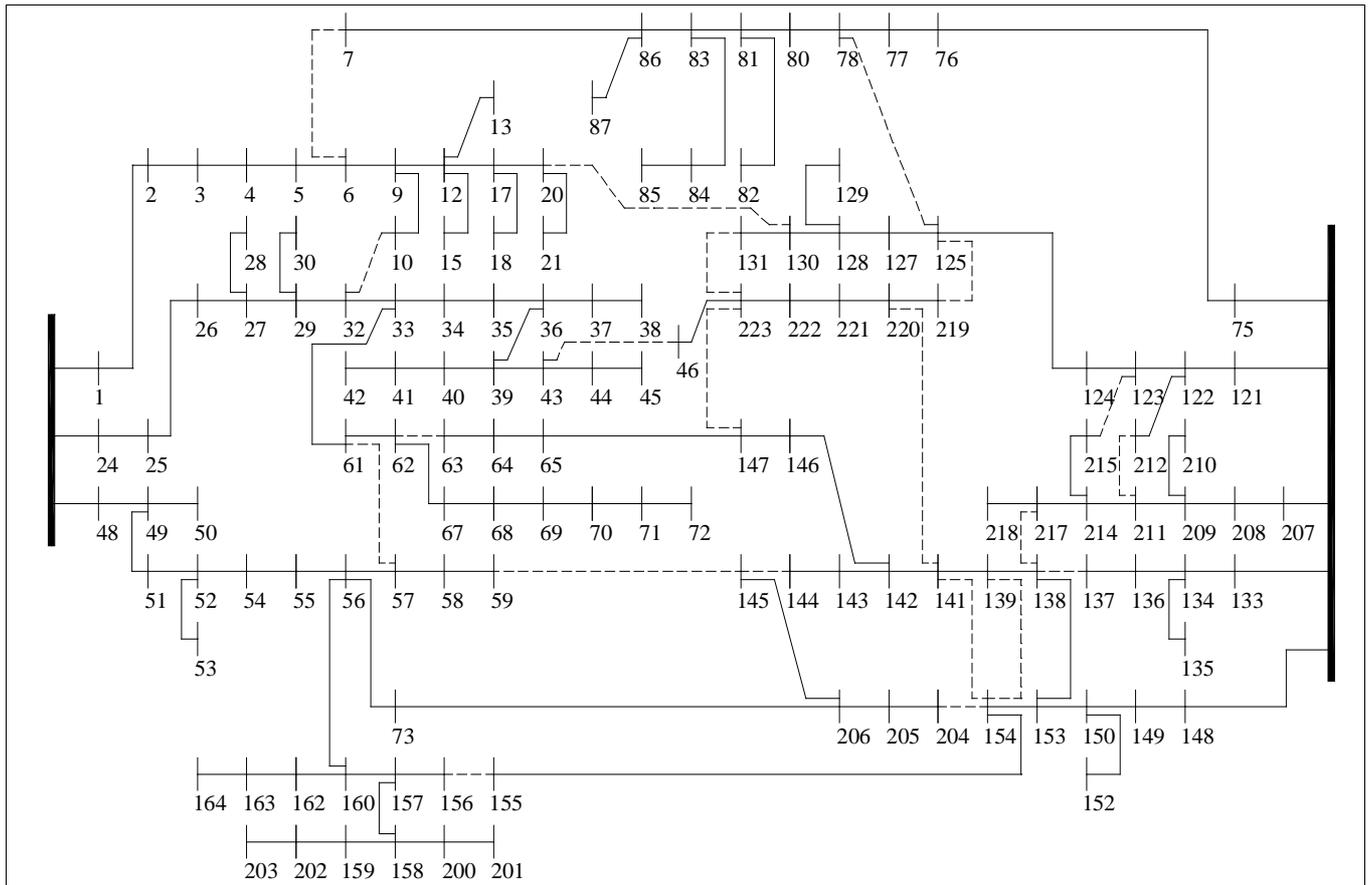
Fig.- 10 Topologia das Melhores Configurações – Sistema de 69 barras

4.2. Sistema Real de 135 barras [7]

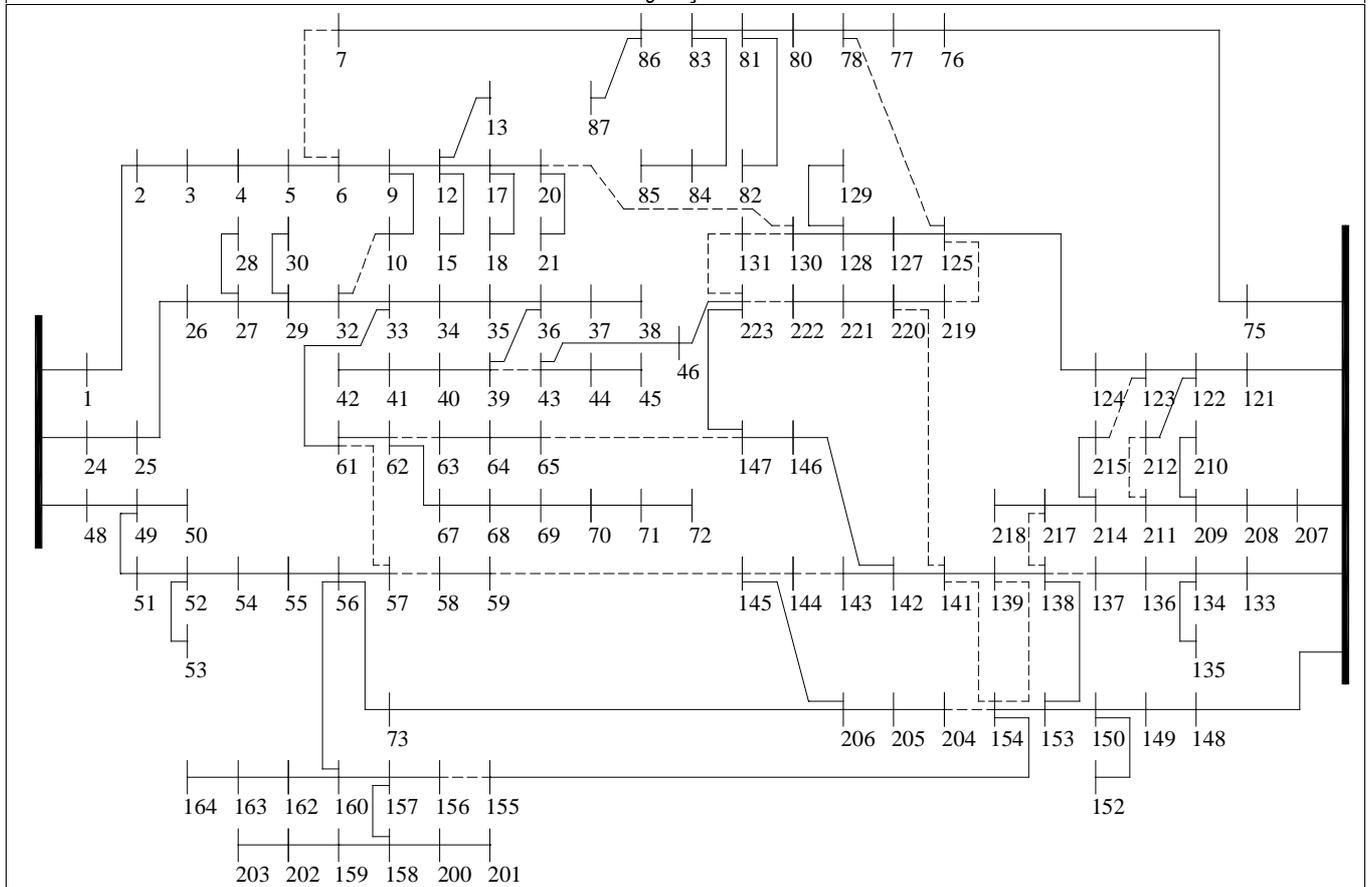
O outro sistema estudado neste trabalho é um sistemas real de 135 barras com 21 ramos de ligação, tensão 13,8 kV, potência base de 100 MVA. Este sistema apresenta um valor de perdas ativas de 282,091 kW, com a menor magnitude de tensão de 0,963 pu para a melhor configuração encontrada, como se mostra na Tabela III. A topologia de cada uma das configurações encontradas está representada na Figura-11.

TABELA III
MELHORES CONFIGURAÇÕES OBTIDAS(135 BARRAS)

No. da Conf.	Chaves Abertas	Valor da Perda (kW)
01	7-38-51-53-90-96-106-118-126-137-138-141-144-145-146-147-148-150-151-155-156	282,0908
02	7-49-51-53-84-90-96-106-118-126-128-137-138-139-144-145-147-148-150-151-156	282,1514
03	7-35-51-90-95-106-118-126-135-137-138-141-142-144-145-146-147-148-150-151-155	282,1521
04	7-38-51-53-90-96-106-118-126-137-138-144-145-146-147-148-150-151-152-155-156	282,2212



Configuração No 1



Configuração No 2

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado, com base na literatura, uma proposta de um algoritmo evolutivo para resolução do problema da reconfiguração de redes de sistemas de distribuição. Como parte da metodologia está envolvida a obtenção do estado da rede para cada configuração radial, necessitando-se de um programa para cálculo de fluxo de carga para redes radiais, rápido e eficiente, dado o elevado número de vezes que o mesmo tem de ser processado durante o processo de solução. Baseado nesse aspecto, foi implementado um programa de fluxo de carga radial que se mostrou adequadamente preciso e rápido no auxílio à busca da solução para o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. O programa computacional, desenvolvido a partir da metodologia proposta, fornece como resultado um conjunto de configurações com os menores valores de perdas. Estes valores de perdas, são muito próximos, mostrando que, às vezes, não há alterações significativas nos valores das perdas quando se passa de uma configuração para outra, ficando a cargo do operador efetuar aquelas que se apresentem mais viáveis sob os aspectos operacionais.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPESP pelo apoio financeiro através de bolsa de mestrado – Processo 01/00730-1.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Baran, M.E.; Wu, F.F., “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing “. **IEEE**. 1989.
- [2] Baran, M.; Wu, F.F. “Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system”. **IEEE**, 1989.
- [3] Borozan, V.; Rajcic, D.; Ackovski, R. “Improved method for loss minimization in distribution networks”. **IEEE**. 1995.
- [4] Cheng – Chien Kuo, Hong – Chan Chang. “Applying a refined genetic algorithm to network reconfiguration for loss reduction”. **IEE**. 1994.
- [5] Civanlar, S.; Grainger, J.J.; Yin, H.; Lee, S.S.H., “Distribution feeder reconfiguration for loss reduction”. **IEEE**. 1988
- [6] Hsiao-Dong Chiang, René Jean-Jumeau. “Optimal Network Reconfiguration in Distribution Systems: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results”. **IEEE**. 1990.
- [7] Mantovani, J.R.S., Casari F., Romero, R.A.. “Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão”. **Revista Controle & Automação**, Sociedade Brasileira de Automática – SBA. 2000.
- [8] Michalewicz, Z. “Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs”. Springer 3^{ra} ed. 1996.