
RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS UTILIZANDO O CRITÉRIO DE QUEDA DE TENSÃO

José R. S. Mantovani¹ Fernando Casari² Rubén A. Romero¹

⁽¹⁾Departamento de Engenharia Elétrica
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS/UNESP
Av. Brasil, 56, 15385-000 Ilha Solteira, SP, BRASIL
E-mail: mant@dee.feis.unesp.br

⁽²⁾MECS- Manutenção de Subestação e Usinas
Caiuá Serviços de Eletricidade S.A.
19001-970 Presidente Prudente, SP, BRASIL
E-mail: fernando_casari@uol.com.br

Resumo A reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica é realizada através da abertura/fechamento de chaves de interconexão, mantendo-se a topologia radial dos alimentadores, visando a minimização de perdas e balanceamento de carga. No presente artigo é apresentado um algoritmo heurístico que realiza a reconfiguração de redes de distribuição para planejamento da operação com vistas a obter um conjunto de configurações que apresentem as menores perdas ativas nos alimentadores. Para obter as configurações de menores perdas é usado um procedimento heurístico baseado no limite máximo de queda de tensão nos alimentadores. Adicionalmente, é usado um algoritmo de fluxo de carga aproximado rápido e robusto que permite diminuir o esforço computacional do algoritmo proposto. São apresentados resultados considerando-se três sistemas hipotéticos amplamente divulgados na literatura e um sistema real de 135 barras.

Palavras Chaves: sistemas de distribuição, reconfiguração, minimização de perdas, planejamento da operação, algoritmos heurísticos.

Abstract Network reconfiguration in distribution systems can be carried out by changing the status of sectionalizing switches and it is usually done for loss minimization and load balancing. In this paper it is presented an heuristic algorithm that accomplishes network reconfiguration for operation planning in order to obtain a configuration set whose configurations have the smallest active losses on its feeders. To obtain the configurations, it is used an approached radial load flow method and an heuristic proceeding based on maximum limit of voltage drop on feeders. Results are presented for three hypothetical systems largely known whose data are available in literature and a real system with 135 busses. In addition, it is used a fast and robust load flow which decreases the

computational effort.

Keywords: distribution systems; reconfiguration; loss minimization; planning operation; heuristic algorithm.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica são, na grande maioria, configurados radialmente com o propósito de facilitar fatores inerentes à proteção, tais como: coordenação e atenuação de correntes de curto-circuito visando diminuir custos com equipamentos. Em geral, esses sistemas 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. Assim, estas chaves seccionadoras são utilizadas para ambos os objetivos: proteção (isolamento de faltas) e reconfiguração (gerenciamento da configuração).

A reconfiguração de redes de distribuição pode ser usada como uma ferramenta de planejamento e/ou de controle em tempo real da operação do sistema. A operação "on-line" requer respostas rápidas para que possam ser tomadas as devidas ações de controle no comando automático dos sistemas. Visa-se a restauração dos serviços pelo isolamento de zonas de fornecimento com defeitos do tipo curto-circuito ou mesmo um balanceamento de carga com o propósito de reduzir as perdas. Já no planejamento da operação o tempo de obtenção das respostas não assume um papel tão importante quanto no caso anterior. No planejamento da operação buscam-se configurações com vistas a obter uma estratégia ótima de operação com minimização de perdas, atendimento da demanda diária com boa qualidade de serviço (perfil adequado

Artigo Submetido em 17/03/1999

1a. Revisão em 25/08/1999; 2a. Revisão em 27/04/2000

Aceito sob recomendação do Ed. Consultor Prof. Dr. Jorge Coelho

da magnitude das tensões, confiabilidade, etc.), além da redução dos custos de operação.

Em geral, pode-se dizer que o problema da reconfiguração de redes de distribuição consiste em buscar uma estratégia ótima de operação de modo a minimizar as perdas nos alimentadores e propiciar um balanceamento adequado das cargas no sistema trifásico, considerando-se aspectos de confiabilidade da proteção e da qualidade de fornecimento de energia aos consumidores. Na literatura são encontradas duas abordagens para o problema de reconfiguração de redes de distribuição:

1. utilização de técnicas de buscas baseadas em heurísticas;
2. utilização de técnicas de otimização, onde inicialmente considera-se o sistema malhado, adotando-se a condição em que todas as chaves seccionadoras estão fechadas. As chaves são abertas sucessivamente para obter a configuração radial. A técnica de otimização normalmente empregada para resolver o problema, são algoritmos do tipo "branch-and-bound".

A solução exata para o problema da reconfiguração envolve a seleção, entre todas as configurações possíveis, daquela que tenha a menor perda. A busca, examinando-se todas as configurações possíveis, encontrará a solução exata do problema. Mas, isso é impossível, pois o número de configurações factíveis geradas pelo chaveamento cresce exponencialmente com o número e a disposição das chaves no sistema, tornando o processo de busca oneroso para sistemas reais. O fato do crescimento exponencial do número de possibilidades é denominado explosão combinatorial.

Por causa da razão descrita acima, algoritmos heurísticos aproximados têm sido sugeridos para resolver o problema de reconfiguração, não garantindo a otimalidade da solução encontrada, mas apenas que a solução seja boa ou quase ótima. Os algoritmos heurísticos procuram estabelecer critérios que possam ser usados para eliminar opções indesejáveis de chaveamento no sentido de diminuir a dimensão do problema. Civanlar et al. (1988) sugerem um algoritmo que com uma fórmula simples tem a capacidade de estimar, com reduzido esforço computacional, a variação nas perdas, resultante da transferência de um grupo de cargas de um alimentador para outro devido a reconfiguração. Através dessa fórmula, verifica-se que a redução de perdas pode ser obtida apenas se existe uma diferença de tensão significativa através das chaves de interconexão e se as cargas são transferidas para outro alimentador, desenvolvendo assim um critério para eliminar operações de chaveamento indesejáveis e reduzir o número de configurações candidatas. Um critério semelhante foi utilizado por Baran & Wu (1989) para determinar o ramo a ser trocado na reconfiguração, introduzindo dois diferentes métodos para um cálculo de fluxo de carga aproximados, processados depois da troca de cada ramo. Morelato e Monticelli (1989) também apresentam uma estratégia de busca equipada com regras práticas (baseadas na experiência do operador) para resolver problemas como serviço de restauração e reconfiguração de sistemas. Para resolver tais problemas, os autores usam um processo de busca heurística em árvore de decisão binária que permite percorrer o espaço de possibilidades do estado do sistema, enquanto que o conhecimento de domínio específico é essencial para limitar o tamanho da árvore de decisão. Isto evita uma explosão combinatorial mantendo o problema dentro de um tamanho gerenciável.

Neste trabalho, propõe-se um algoritmo heurístico para a solução do problema de reconfiguração de redes de

distribuição, apresentando como resultado final uma configuração ou um conjunto de configurações que permitam a operação da rede com perdas mínimas nos alimentadores. Na metodologia proposta utiliza-se um limite de queda de tensão como mecanismo de filtragem para eliminar as configurações menos promissoras efetuando-se a poda na árvore de configurações, de modo a reduzir o número de configurações candidatas. Na poda das configurações menos promissoras, efetuada com base no critério de queda de tensão, definem-se os conceitos de famílias e descendentes baseados na definição de blocos construtivos utilizados para provar a convergência dos algoritmos genéticos, (Srinivas e Patnaik, 1994), (Goldberg, 1989). Para diminuir o esforço computacional do algoritmo proposto, foi implementado e testado um método de cálculo de fluxo de carga aproximado cujas características são baixo tempo de processamento e precisão adequada, para ser usado como ferramenta auxiliar em algoritmos de reconfiguração de redes.

Apresentam-se resultados para três sistemas hipotéticos de 14 barras, (Civanlar et al., 1988), 32 barras, (Goswani e Basu, 1992), 69 barras, (Chiang e Jean-Jumeau, 1990), e um sistema real com 135 barras cujos dados estão apresentados no Apêndice A.

2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema da reconfiguração de redes de distribuição pode ser formulado como um problema de programação não-linear com variáveis inteiras, cuja solução envolve a seleção, dentre todas as configurações possíveis, daquela que apresenta a menor perda e que satisfaça a um conjunto de restrições tais como: radialidade do sistema, níveis aceitáveis de tensão, confiabilidade, etc. O problema pode ser formulado como:

$$\text{Min } P_k = \sum_{i=1}^{NR} R_i * I_i^2 \quad (1)$$

s.a.

- radialidade;
- restrições de níveis de tensão;
- restrições de confiabilidade;
- restrições de balanço de carga; entre os alimentadores;
- variáveis inteiras e reais;

Sendo:

- $k \in K$; K conjunto de todas as configurações radiais factíveis para o sistema;
- P_k : perdas ativas em todos os ramos da configuração k ;
- NR : número de ramos da configuração k ;
- R_i : resistência do i -ésimo ramo da configuração k ;
- I_i : corrente no i -ésimo ramo da configuração k .

Este tipo de problema é de difícil tratamento devido a sua natureza combinatorial, além da dificuldade na formulação matemática de certas restrições como a radialidade. Tem-se também o problema das variáveis inteiras e contínuas, o que o

torna um problema de programação inteira misto e de tratamento ainda mais difícil.

3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Para a resolução do problema de reconfiguração foi desenvolvida uma metodologia heurística que contempla as restrições na formulação (1) e possui um critério para eliminar configurações que não deverão ser analisadas. O critério é baseado na máxima queda de tensão permitida nos alimentadores e nas definições de *famílias* e *descendentes* para identificar configurações promissoras, considerando o aspecto de perdas mínimas no sistema e que atendam ao conjunto de restrições (1), mantendo-as dentro do espaço de busca. As definições de famílias e descendentes apresentadas neste trabalho são baseadas no conceito de blocos construtivos utilizados para provar a convergência dos Algoritmos Genéticos, (Srinivas e Patnaik, 1994), (Goldberg, 1989). Essas definições, a exemplo do que foi desenvolvido para os algoritmos genéticos, são utilizadas para mostrar através de técnica da indução finita que apenas as configurações menos promissoras serão descartadas. É possível encontrar não uma configuração ótima, mas um conjunto de configurações com os menores valores de perdas possíveis.

A restrição de radialidade envolvida no problema (1) é de difícil representação matemática e foi tratada com sucesso no algoritmo desenvolvido nesse trabalho, utilizando-se regras de programação baseadas nos conceitos de inteligência artificial (*If,Then*) e busca em árvores de decisão.

3.1 Algoritmo de busca de configurações radiais

De forma genérica, no processo para a obtenção de todas as configurações possíveis para qualquer sistema, deve-se fazer combinações com as chaves abertas da configuração inicial para fechá-las. A combinação das chaves abertas deve iniciar uma a uma, depois duas a duas, até n_a a n_a , em que n_a é o número total de chaves abertas no sistema. Combinar as chaves abertas da configuração inicial uma a uma significa fechar cada uma delas por vez. Pela técnica de troca de ramos, para gerar novas configurações cada chave aberta que for fechada, forma um laço e abrindo cada uma das chaves do laço obtém-se as novas configurações. Quando a combinação das chaves abertas for feita duas a duas, fecham-se duas chaves abertas, formam-se dois laços devendo-se abrir uma chave de cada laço para gerar as novas configurações. Dessa forma, o processo de busca deve ser feito até que as chaves sejam combinadas n_a a n_a , de modo que sejam obtidas todas as combinações possíveis.

Neste tipo de técnica, identifica-se, a partir de um conjunto de chaves fechadas e outro de chaves abertas, a configuração inicial do sistema. A configuração inicial (CI) está representada no nível n_0 da árvore de configurações representada genericamente na Figura 1. O conjunto de configurações geradas com o fechamento de cada uma das chaves abertas formará um outro nível. Desse modo, ao ser fechada a primeira chave aberta, formar-se-á o nível n_1 da árvore que é composto pelo conjunto de configurações que são geradas a partir das configurações dos níveis anteriores, neste caso, apenas o nível n_0 . Quando for fechada a segunda chave aberta, para gerar as configurações do nível n_2 , serão tomadas todas as configurações dos níveis anteriores para serem chaveadas, isto é, as configurações dos níveis n_0 e n_1 . Do mesmo modo, para gerar as configurações do nível n_3 devem ser tomadas para

efetuar o chaveamento, as configurações dos níveis n_0, n_1 e n_2 . E assim é feito até que todas as chaves abertas na configuração inicial sejam fechadas.

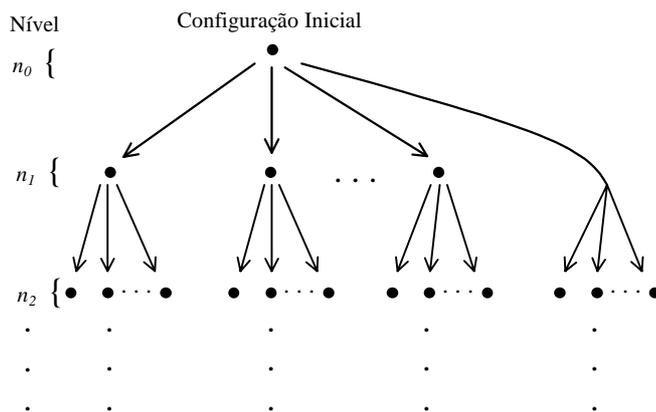


Figura 1 - Níveis da árvore de configurações.

Na árvore de configurações o número de níveis será igual ao número de chaves de interconexão que existirem no sistema. Em cada nível existirão as configurações mais promissoras que permanecerão ativas e gerarão outras configurações nos níveis subsequentes e, também, existirão as configurações que não são atrativas, mas, de acordo com os conceitos de família e descendentes que serão definidos adiante, serão colocadas em um lista para serem analisadas pela parte do algoritmo referenciada como processo de refinamento da solução.

A partir da técnica descrita anteriormente, desenvolveu-se um algoritmo que, a partir da configuração radial inicial e do conjunto de chaves de manobras, geram-se, praticamente, todas as configurações radiais possíveis para o sistema em estudo. Dependendo das características do sistema sob análise, ou seja, um número elevado de chaves de manobra que permitem diversificar a topologia da rede, a quantidade de configurações possíveis pode chegar a um número praticamente infinito. Dessa forma, juntamente com este algoritmo de busca de configurações radiais, a exemplo de alguns autores, propõe-se uma técnica heurística para reduzir o conjunto de configurações a serem estudadas.

Os passos seguidos pelo algoritmo para estudo de reconfiguração de sistemas radiais de distribuição de energia elétrica estão descritos abaixo:

- Passo (i) - Identificar a configuração inicial;
- Passo (ii) - Fechar a chave de interconexão inicialmente aberta;
- Passo (iii) - Identificar, nos níveis anteriores, a configuração a ser chaveada.
- Passo (iv) - Examinar as configurações geradas pelo chaveamento. Para cada configuração gerada:
 - (a)- Verificar a sua singularidade;
 - (b)- Processar o fluxo de carga radial para a configuração;
 - (c)- Verificar o limite de queda de tensão para cada alimentador;
 - (d)- Se a maior queda de tensão da configuração está dentro do limite predeterminado, adicionar a configuração encontrada na listagem do nível n_i e calcular a perda da mesma. Caso contrário aplicar refinamento;

(e)- O refinamento consiste em efetuar o chaveamento com as chaves de interconexão ainda não fechadas para gerar outros membros da família que está sendo analisada. Se alguma dessas configurações tiverem queda de tensão abaixo do limite predeterminado, adicionar estas configuração em lista separada para cálculo das perdas e eventual inclusão na lista das melhores configurações encontradas.

Passo (v) - Foram tomadas todas as configurações encontradas nos níveis anteriores? Se *sim*, ir ao *passo (vi)*. Se *não*, voltar ao *passo (iii)*;

Passo (vi) - Foram fechadas todas as chaves de interconexão inicialmente abertas? Se *sim*, ir ao *passo (vii)*. Se *não*, voltar ao *passo (ii)*;

Passo(vii) - Escolher dentre as configurações encontradas um conjunto de tamanho também pré-determinado das melhores configurações, isto é, as que têm as menores perdas.

Passo (viii) - Imprimir as melhores configurações encontradas com seus respectivos valores de perdas.

Como a queda de tensão está diretamente ligada às perdas do sistema, a poda do número de configurações está sendo realizada com base nesse valor de queda de tensão, ou seja, se uma configuração tem uma certa queda de tensão que está acima do limite predeterminado, as configurações que se originarem daquela serão descartadas.

3.2. Técnica de corte das configurações

A técnica de corte das configurações visa estabelecer um critério que reduza o conjunto de configurações a serem examinadas – espaço de busca. O critério de corte das configurações, adotado nesse trabalho, é baseado no máximo limite de queda de tensão permitido no sistema e é aplicado no passo (iv) do algoritmo, que gera configurações radiais, para o sistema em estudo. Em termos práticos, isso quer dizer que a configuração de uma família e todas as suas descendentes serão excluídas quando a tensão em algum alimentador do sistema tiver uma queda de tensão maior que o limite preestabelecido. Esse limite de queda de tensão não é aquele normalmente utilizado como restrição na operação, mas sim um que mantenha o espaço de busca de tamanho gerenciável. O limite de queda de tensão, para cada sistema, pode ser diferente em consequência das características próprias dos mesmos, como por exemplo: dimensão, topologia e também densidade de cargas (carregamento do sistema).

Para mostrar a eficiência da técnica de corte implementada será utilizado o método de indução finita, juntamente com o sistema hipotético, (Goswani e Basu, 1992), com cinco chaves de interconexão da Figura 2. A seguir serão definidos e exemplificados os conceitos de famílias e descendentes de configurações no contexto da árvore de decisão do tipo branch-and-bound.

Família: Conjunto de configurações que possui n_a-1 número de chaves abertas comuns, em que n_a é o número total de chaves abertas do sistema. A noção de família deve ser tida como sendo aquelas configurações que têm como descendentes um conjunto de configurações com topologia semelhante e com características ou propriedades análogas. Em outras palavras as famílias representam um subespaço de busca de configurações.

Descendente: É cada configuração que pertence a uma mesma família. Portanto, tem características semelhantes em consequência do grau de parentesco próximo. Os descendentes de cada família, quando as chaves são combinadas uma a uma na configuração inicial, serão as famílias quando as chaves abertas forem combinadas duas a duas, que por sua vez gerarão outros descendentes, que serão famílias para a combinação três a três e assim por diante, até a combinação n_a a n_a das chaves abertas da configuração inicial. O grau de parentesco entre as famílias vai diminuindo ao passo que o número de chaves abertas comuns vai diminuindo, de modo que as configurações tenham cada vez menos características semelhantes.

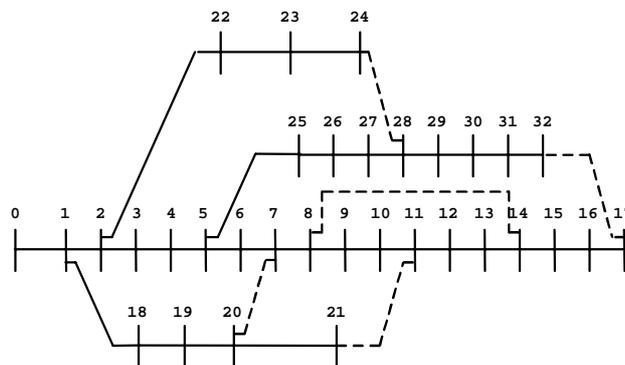
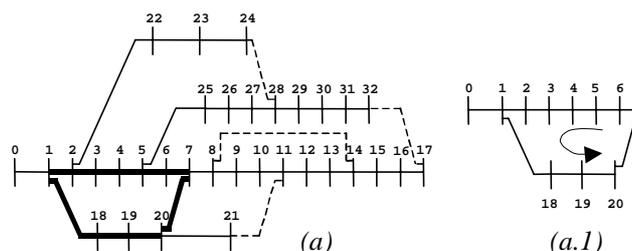


Figura 2 - Sistema hipotético de 32 barras.

Considere a configuração inicial para o sistema de 32 barras mostrado na Figura 2. Esta configuração apresenta 5 chaves abertas que, ao longo do processo de busca, serão combinadas para serem fechadas uma a uma, duas a duas, três a três, quatro a quatro até cinco a cinco, objetivando obter as configurações possíveis para o sistema. Ao serem fechadas, na configuração inicial, as chaves abertas uma a uma, será obtido um número de famílias igual ao número de chaves abertas.

Estas famílias estão representadas na Figura 3(a), (b), (c), (d) e (e), em que cada uma delas tem 4 chaves abertas comuns e seus descendentes serão gerados com a abertura de cada uma das chaves dos laços indicados na Figura 3(a.1), (b.1), (c.1), (d.1) e (e.1). O conjunto de descendentes está relacionado com a abertura de um laço com vistas a restabelecer a radialidade do sistema. Isto significa que o grau de parentesco dos descendentes é próximo, havendo muito pouca diferença entre eles. Considerando a Figura 3 (a.1) que mostra o laço formado pelas chaves 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-20, 20-19, 19-18 e 18-1, a abertura de cada uma das chaves desse laço de modo a restaurar a radialidade da rede, dará origem a um conjunto de descendentes ilustrado pela Figura 4(a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h) e (i).



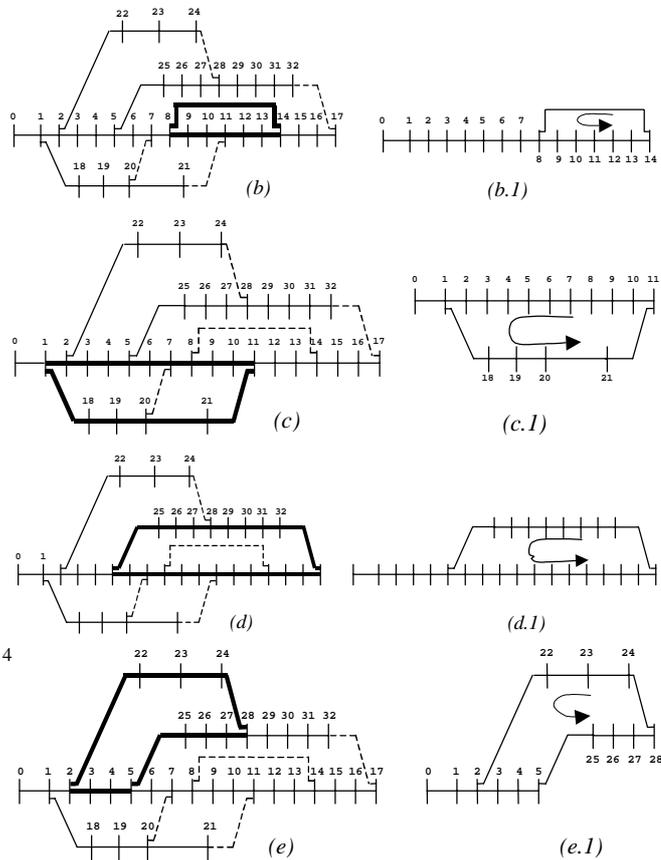


Figura 3 – Famílias geradas com as chaves abertas da configuração inicial no sistema de 32 barras combinadas uma a uma e os respectivos laços.

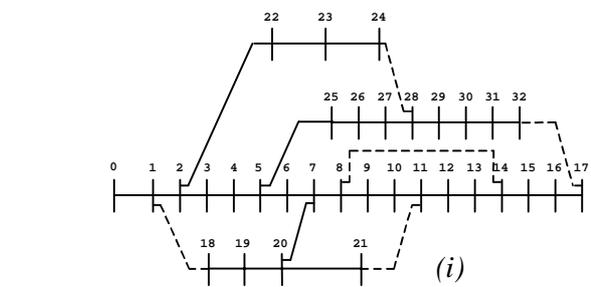
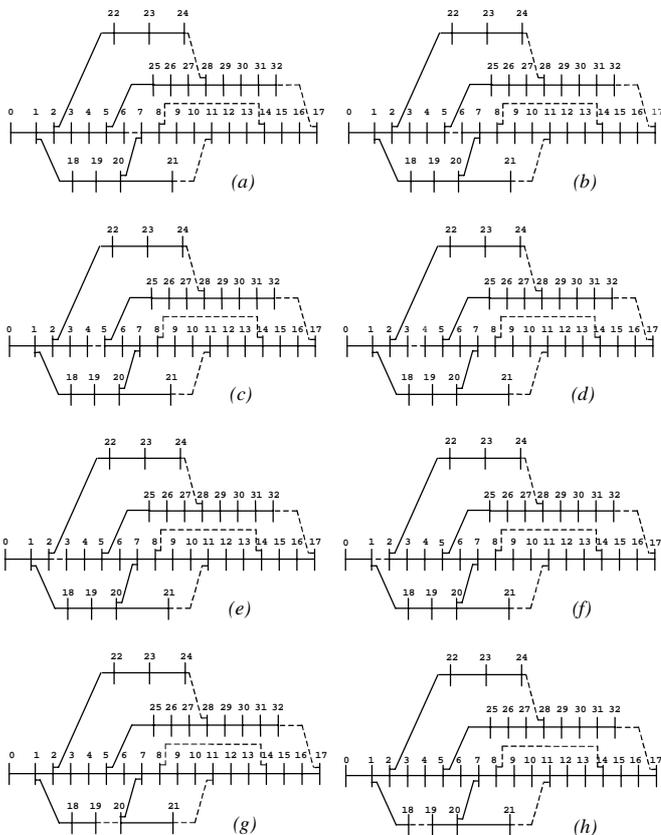
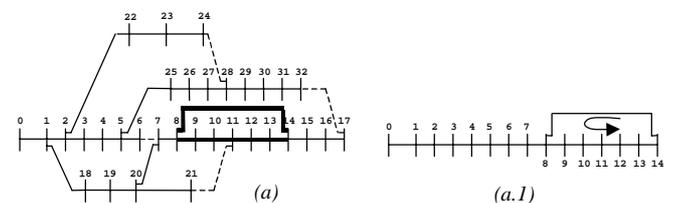


Figura 4 - Configurações descendentes da configuração da Figura 3(a).

A metodologia proposta para analisar as configurações e reduzir o espaço de busca, conforme já ressaltado, consiste da avaliação do máximo limite de queda de tensão nos alimentadores. De acordo com essa metodologia, analisam-se as famílias possíveis de ser geradas para um sistema qualquer. Considere o conjunto de descendentes gerados a partir da família da Figura 3(a), mostrado na Figura 4. Se todos esses descendentes apresentarem um limite de queda de tensão superior ao permitido pela heurística, eles serão descartados e não será permitido que gerem novos descendentes. Pelos conceitos de família e de corte de configurações apresentados neste trabalho, antes de concluir pelo corte nesta fase do processo de busca, deve-se analisar o comportamento das famílias a que estes descendentes estão relacionados e que ainda não foram sondadas. Considere por exemplo o descendente da Figura 4(a). As famílias relacionadas a este descendente estão apresentadas na Figura 5. De acordo com a metodologia proposta deverão ser analisadas através do critério da máxima queda de tensão. Através desta análise, se nenhuma configuração descendente destas famílias apresentar limites aceitáveis de queda de tensão, então, com boa margem de segurança, pode-se eliminar todos os descendentes e as novas famílias possíveis de ser geradas. Da mesma forma que as famílias de configurações da Figuras 5, associadas à configuração da Figura 4(a), as famílias associadas às configurações da Figura 4(b)-(i) são geradas, ou seja, fechando as chaves de interconexão que não foram acionadas, e têm a mesma estrutura que o conjunto de configurações da Figura 5, sendo que a diferença entre cada uma dessas famílias é a chave de interconexão que estará aberta no laço representado na Figura 3(a1). Desse raciocínio, verifica-se que existe uma semelhança ou parentesco entre as configurações da Figura 4 e todas as famílias de configurações que são geradas a partir de cada uma dessas configurações, como por exemplo, as configurações descendentes da Figura 4(a) representadas na Figura 5(a)-(d). Em consequência desse *parentesco* entre as configurações em uma mesma *família-descendentes* e o *parentesco* entre as *famílias*, chega-se à conclusão de que, usando o critério de queda de tensão, em que o carregamento nos alimentadores é considerado explicitamente, não há a necessidade de visitar todas as configurações possíveis que constituem o conjunto de descendentes durante a busca das melhores configurações, mas sim as principais famílias.



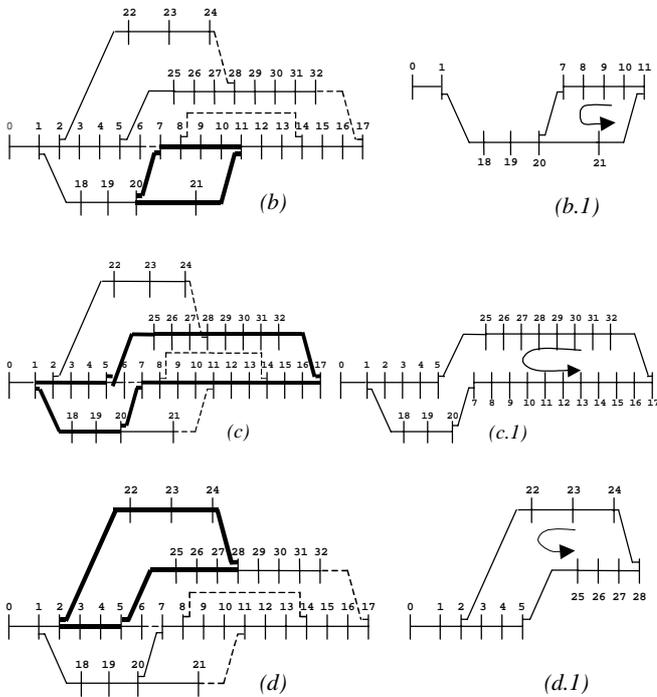


Figura 5 – Famílias geradas pela configuração da Figura 4(a).

3.3 Método aproximado de fluxo de carga

Para diminuir o esforço computacional do algoritmo foi implementado um método aproximado de fluxo de carga semelhante ao encontrado em Baran e Wu (1989), referenciado na literatura como de *Forward Update DistFlow*. Este método utiliza um modelo de potência constante em que as correntes são corrigidas em função da variação da tensão. A diferença está nas equações utilizadas que são mais simples, tornando-o rápido e, através do critério de convergência adotado, foi possível obter uma precisão adequada para ser utilizado como ferramenta auxiliar na solução problema de reconfiguração de redes de distribuição. O método é descrito a seguir.

Supondo que o alimentador-I, de acordo com a Figura 6, tenha a tensão V_0 determinada e que as cargas concentradas nos pontos são dadas por S_1, S_2, \dots, S_k , em que a impedância de cada ramo é dada por $z_i = r_i + jx_i$.

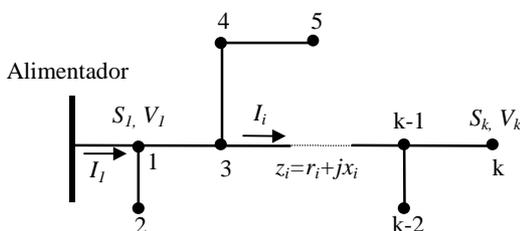


Figura 6 – Estrutura de um alimentador radial

O processo parte da concentração de carga em todos os nós do sistema. A concentração de carga em cada nó é feita somando-se todas as cargas ligadas ao mesmo, direta ou indiretamente, caminhando-se na direção contrária ao alimentador ou subestação, considerando-se que todas as cargas têm o mesmo fator de potência. Para isso, é feita uma busca na listagem dos ramos onde é verificado se existem ramificações em cada nó do alimentador, o que torna a busca um pouco trabalhosa e

depende da ordenação feita previamente. Assim define-se a relação:

$$S_{conc}_i = \sum_{j=i+1}^k S_j \quad (2)$$

em que S_{conc} é vetor carga acumulada.

Depois de feita esta concentração de cargas é calculada a corrente I_i no ramo i pela seguinte equação:

$$I_i^{*(p)} = \frac{S_{conc}_i}{V_{i-1}^{(p)}} \quad (3)$$

Sendo que p indica a iteração em que está o processo.

A tensão utilizada para calcular a corrente no ramo i é aquela do nó emissor do ramo. Com a corrente I_i é calculada a queda de tensão no ramo i .

$$\Delta V_i^{(p)} = Z_i * I_i^{(p)} \quad (4)$$

A tensão no nó receptor do ramo é calculada pela subtração da queda da tensão do nó emissor.

$$V_i^{(p)} = V_{i-1}^{(p)} - \Delta V_i^{(p)} \quad (5)$$

Tem-se então, a tensão aproximada em todos os nós do sistema. Isto é feito para cada alimentador do sistema, se houver mais de um.

O teste de convergência do algoritmo consiste da comparação entre as tensões da iteração corrente com a iteração anterior, ou seja:

$$\Delta V_{Tot} = V_i^{(p)} - V_i^{(p-1)} \quad (6)$$

Se $|\Delta V_{Tot}|$ de algum nó do sistema for maior que uma tolerância especificada o processo é repetido até atingir a convergência desejada.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizados testes com um sistema real de 135 barras e 3 sistemas hipotéticos conhecidos na literatura especializada visando analisar o desempenho do algoritmo. Os três sistemas possuem 14 barras (Cinvalar et al., 1988), 32 barras (Goswami e Basu, 1992) e 69 barras (Chiang e Jean-Jumeau, 1990), respectivamente.

4.1 Sistema de 14 barras

O primeiro sistema possui 14 barras, 3 chaves de interconexão, tensão 23 kV, potência base 100 MVA e seus dados completos encontram-se em Cinvalar et al. (1988). As chaves de interconexão para a configuração inicial do sistema de 14 barras são 15-21-26 e para a configuração ótima são 17-19-26. Na Tabela 1 são mostradas as 10 melhores topologias encontradas pelo algoritmo proposto. Para a obtenção deste conjunto de configurações adotou-se, na heurística de cortes, um limite mínimo de tensão de 0,9 pu em cada ramo, sendo necessária a análise de 255 configurações, ou seja, o programa do cálculo de fluxo de carga foi acionado 255 vezes. Para mostrar o desempenho do algoritmo de fluxo de carga utilizado, na Tabela 2, são mostradas as perdas das 10 melhores topologia encontradas, assim como da configuração inicial, usando o algoritmo de fluxo de carga aproximado e o algoritmo de fluxo de carga de Newton. Pode-se observar um desempenho aceitável do fluxo de carga usado e, mais importante ainda, o desvio entre as perdas consideradas exatas

e aproximadas das diferentes topologia são do mesmo tipo e ordem de grandeza. Embora não tenham sido apresentadas as magnitudes das tensões obtidas pelo método aproximado e pelo método de Newton, seus valores são muito próximos, e as diferenças entre as mesmas apresentam ordem de grandeza menores que as encontradas para as perdas calculadas pelo método aproximado e o método de Newton, para todos os sistemas simulados neste trabalho.

4.2 Sistema de 32 barras

O segundo sistema possui 32 barras, 5 chaves de interconexão, tensão de 12,66 kV, potência base de 10 MVA e seus dados completos encontram-se em Goswami e Basu (1992) e a topologia do sistema na configuração inicial é mostrada na Figura 2. Para o sistema de 32 barras as chaves de interconexão são 33-34-35-36-37 para a configuração inicial e 07-09-14-32-37 para a configuração ótima. Na Tabela 3 encontra-se o conjunto das 10 melhores configurações encontradas para esse sistema. O limite mínimo de tensão permitido nos alimentadores para a heurística de corte de configurações foi de 0,92 pu. O número de configurações analisadas para obtenção desses resultados foi de 5633, ou seja, o programa para cálculo de fluxo de carga foi acionado 5633 vezes.

4.3 Sistema de 69 barras

O terceiro sistema é composto por 69 barras, 5 chaves de interconexão, tensão 12,66 kV, potência base de 100 MVA. Seus dados completos encontram-se em Chiang e Jean-Jumeau (1990). Para o sistema de 69 barras as chaves de interconexão são 70-71-72-73-74 para a configuração inicial, e 15-57-62-70-71, 15-59-62-70-71 e 15-56-62-70-71 para as três melhores configurações encontradas. Deve-se mencionar que, neste caso, as 10 melhores configurações encontradas apresentam valores de perdas muito próximos e, neste caso, a decisão de qual configuração a ser adotada deve levar em consideração outros aspectos práticos, tais como: coordenação da proteção, confiabilidade do sistema e outros critério técnicos. O limite mínimo de tensão permitido nos alimentadores para a heurística de corte de configurações foi de 0,95 pu. O número de configurações analisadas para obtenção desses resultados foi de 1145, ou seja, o programa para cálculo de fluxo de carga foi acionado 1145 vezes.

Tabela 1: Configuração inicial (CI) e as 10 melhores configurações (sistema de 14 barras).

Nº. da Configuração	Chaves Abertas
CI	15-21-26
01	17-19-26
02	14-17-19
03	15-17-26
04	19-21-26
05	17-19-25
06	14-15-17
07	14-19-21
08	15-17-25
09	15-21-26
10	19-24-26

Tabela 2: Perdas nas 10 melhores configurações para o sistema de 14 barras pelos métodos aproximado e de Newton.

Nº Config.	Perdas em kW		Erro Percentual $EP = \frac{ P_1 - P_2 }{P_2} * 100$
	Mét. Aprox. (P ₁)	Mét. Newton (P ₂)	
CI	499,11	511,44	2,41%
01	456,04	466,13	2,16%
02	468,67	479,30	2,22%
03	473,94	483,87	2,05%
04	480,75	493,15	2,52%
05	482,24	492,83	2,15%
06	487,09	497,55	2,10%
07	487,61	500,14	2,51%
08	497,47	508,03	2,08%
09	499,11	511,44	2,41%
10	500,75	511,94	2,19%

Na Tabela 4 está o conjunto das 10 melhores configurações encontradas para o sistema de 69 barras.

Tabela 3: Configuração inicial (CI) as 10 melhores configurações (sistema de 32 barras) e respectivas perdas

Nº. da Configuração	Chaves Abertas	Perdas (kW)
CI	33-34-35-36-37	202,68
01	07-09-14=32-37	139,55
02	07-09-14-28-32	139,98
03	07-10-14-32-37	140,28
04	07-10-14-28-32	140,71
05	07-11-14-32-37	141,20
06	07-11-14-28-32	141,63
07	07-09-14-28-36	141,92
08	07-09-14-36-37	142,17
09	07-09-14-31-37	142,60
10	07-10-14-36-37	142,68

Tabela 4: Configuração inicial (CI) as 10 melhores configurações e respectivas perdas (sistema de 69 barras)

No. da Configuração	Chaves Abertas	Perdas (kW)
CI	70-71-72-73-74	20,78
01	15-57-62-70-71	9,34
02	15-59-62-70-71	9,34
03	15-56-62-70-71	9,34
04	15-58-62-70-71	9,34
05	14-59-62-70-71	9,34
06	14-56-62-70-71	9,34
07	14-57-62-70-71	9,34
08	14-58-62-70-71	9,34
09	13-57-62-70-71	9,35
10	13-59-62-70-71	9,35

4.4 Sistema real de 135 barras

O sistema real possui 135 barras, 21 chaves de interconexão, tensão 13,8 kV, potência base de 100 MVA. Para este sistema as chaves de interconexão são 136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-153-154-155-156 para a configuração inicial e seus dados completos encontram-se no Apêndice A. O limite mínimo de tensão permitido nos alimentadores, para a heurística de corte de configurações, foi de 0,95 pu. O número de configurações analisadas para obtenção desses resultados, considerando as configurações

analisadas pela rotina de refinamento, foi de 40051, ou seja, o programa para cálculo de fluxo de carga foi acionado 40051 vezes.

Na Tabela 5 estão a configuração inicial e o conjunto das 10 melhores configurações encontradas para esse sistema. Pode-se notar que não há muita diferença nas perdas das melhores configurações e, também, na topologia das mesmas. A pequena diferença entre as perdas das melhores configurações acontece em consequência de que o sistema possui muitos ótimos locais que diferem muito pouco entre si. Já a pequena diferença entre a topologia dessas configurações reforça a justificativa do bom funcionamento do método de busca de configurações radiais, da heurística de corte pelo critério de queda de tensão e, enfim, do bom desempenho geral da metodologia desenvolvida e implementada.

Para os sistemas hipotéticos testados foram obtidos os mesmos resultados apresentados nas referências bibliográficas revisadas, mostrando que o algoritmo possui um bom desempenho. Considerando-se os resultados apresentados para o sistema real, com a inclusão da subrotina de refinamento, pode-se afirmar que o algoritmo é também muito eficiente para resolver o problema de reconfiguração em sistemas reais.

Tabela 5: Configuração inicial (CI) as 10 melhores configurações e respectivas perdas (sistema de 135 barras).

<i>No. da Configuração</i>	<i>Chaves Abertas</i>	<i>Perdas (kW)</i>
CI	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-153-154-155-156	320,17
01	136-137-138-139-51-141-142-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-106-154-155-156	285,50
02	136-9-138-139-140-141-142-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-106-154-155-156	285,81
03	136-137-138-139-140-141-54-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-106-154-155-156	285,82
04	136-137-138-139-140-141-53-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-106-154-155-156	285,8197
05	7-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-106-154-155-156	285,88
06	136-137-138-139-140-50-142-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-106-154-155-156	286,18
07	136-137-138-139-140-49-142-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-106-154-155-156	286,18
08	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146-147-148-90-150-151-152-106-154-155-156	286,20
09	136-137-138-139-140-141-55-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-106-154-155-156	286,30
10	136-137-138-135-140-141-142-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-106-154-155-156	286,49

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se um algoritmo heurístico simples, eficiente e robusto para ser utilizado na solução do problema da reconfiguração de redes radiais de sistemas de distribuição. Como parte da metodologia proposta, está envolvida a obtenção do estado da rede para cada configuração radial, necessitando de um programa de fluxo de carga radial rápido e eficiente. Isto é necessário tendo em vista 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 cálculo 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. Os testes comparativos entre o método de cálculo de fluxo aproximado implementado e o método que usa o algoritmo de Newton mostram sua eficiência e robustez. Salienta-se que, o objetivo não foi a discussão genérica do problema de fluxo carga em redes radiais, mas sim uma técnica simples e eficiente para calcular o estado da rede e auxiliar na solução do problema de reconfiguração, independente do algoritmo adotado para avaliar a reconfiguração para o planejamento da operação do sistema.

O critério do limite máximo de queda de tensão, utilizado para efetuar o corte de configurações, também se mostrou eficiente em consequência da maneira como é realizada a busca de configurações radiais. O critério para reduzir o espaço de busca, através do limite de queda de tensão imposto nos alimentadores, pode excluir configurações de menores perdas mas com limites de queda de tensão em algum dos alimentadores do sistema, acima do permitido.

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, dependendo do sistema analisado, 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.

Os resultados foram apresentados para três sistemas hipotéticos amplamente divulgados na literatura e para um sistema real. Em consequência do tratamento heurístico empregado para a solução do problema, não se pode garantir que as propostas de solução são ótimas, uma vez que não é realizada uma busca exaustiva verificando-se todas as opções possíveis de chaveamento. Entretanto, para os sistemas hipotéticos testados foram obtidos os mesmos resultados apresentados nas referências bibliográficas revisadas, mostrando que o algoritmo possui um bom desempenho. Considerando-se os resultados apresentados para o sistema real, pode-se afirmar que o algoritmo é também muito eficiente para resolver o problema de reconfiguração em sistemas reais.

O algoritmo de busca mostra-se muito eficiente para encontrar as configurações radiais podendo ser afirmado que se não fosse o problema da explosão combinatorial, ele seria capaz de encontrar todas as configurações radiais possíveis para qualquer sistema. Isto significa que esse algoritmo pode ser usado em outras metodologias para resolver o problema de reconfiguração para guiar a busca. Sua eficiência fica ainda mais notável quando aplicado ao sistema real que possui 21 chaves de interconexão, não para encontrar o máximo de configurações possíveis, mas agora para conduzir de maneira

correta a busca. Para este sistema, a necessidade de uma técnica eficiente de poda na árvore de configurações é essencial para a aplicação do algoritmo, pois, considerando que passe pelo critério de corte, apenas uma configuração em cada nível da árvore de decisão, o número de configurações que deveriam ser analisadas seria de 2^{21} o que tornaria impraticável a busca.

A metodologia desenvolvida neste trabalho é adequada para implementação em máquinas de memória distribuída, permitindo expandir o espaço de busca e ao mesmo tempo resolver o problema de reconfiguração em um tempo menor.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e também aos revisores que contribuíram para a melhoria da apresentação e redação deste trabalho.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Baran, M.E. e Wu, F.F. (1989); Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2.

Chiang, H.D. e Jean-Jumeau, R.M. (1990); Optimal Network Reconfigurations in Distribution Systems: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3.

Civanlar, S., Grainger, J.J., Yin, H. e Lee, S.S.H. (1988); Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 3.

Fan, J.Y. et alli (1996); Distribution Network Reconfiguration: Single Loop Optimization, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 3

Sárfi, R.J. et alli (1996); Distribution System Reconfiguration for Loss Reduction: Na Algorithm Based on Network Partitioning Theory, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 1.

Goldberg, D.E. (1989); *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, MA.

Goswami, S.K. e Basu, S.K. (1992); A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 3.

Morelato, A.L. e Monticelli, A. (1989); Heuristic Search Approach to Distribution Systems Restoration, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 4.

Srinivas, M. e Patnaik, L.M. (1994); Genetic Algorithms: A Survey, *Computer*, Vol. 27, No. 6.

APÊNDICE - A

O sistema real de 135 barras utilizado neste trabalho possui 21 chaves de interconexão, tensão base de 13,8 kV, potência base

de 100 MVA. Na figura A.1 encontra-se topologia deste sistema. Na Tabela A.1 são apresentados os dados completos.

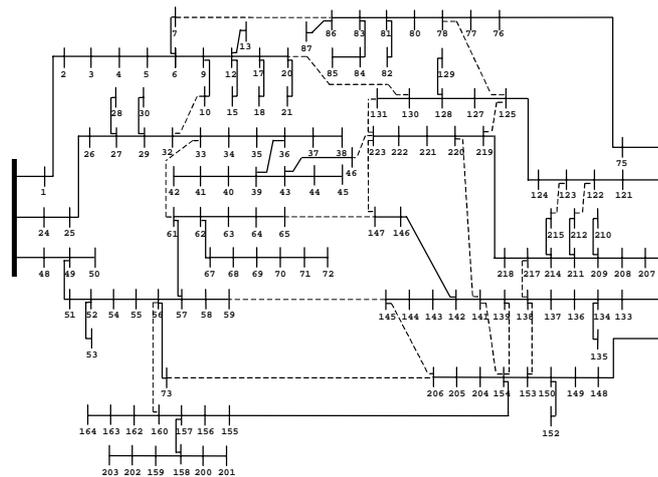


Figura A.1 - Diagrama unifilar do sistema de distribuição de 135 barras.

Tabela A.1: Dados completos do sistema de 135 barras.

Nº. da Chave	Noi	Nof	R (Ohm)	X (Ohm)	P (kW)	Q (kVAR)
1	0	1	0,33205	0,76653	000,000	000,000
2	1	2	0,00188	0,00433	047,780	019,009
3	2	3	0,22324	0,51535	042,551	016,929
4	3	4	0,09943	0,22953	087,022	034,622
5	4	5	0,15571	0,35945	311,310	123,855
6	5	6	0,16321	0,37677	148,869	059,228
7	6	7	0,11444	0,26417	238,672	094,956
8	6	9	0,05675	0,05666	062,299	024,786
9	9	10	0,52124	0,27418	124,598	049,571
10	9	12	0,10877	0,10860	140,175	055,768
11	12	13	0,39803	0,20937	116,813	046,474
12	12	15	0,91744	0,31469	249,203	099,145
13	12	17	0,11823	0,11805	291,447	115,952
14	17	18	0,50228	0,26421	303,720	120,835
15	17	20	0,05675	0,05666	215,396	085,695
16	20	21	0,29379	0,15454	198,586	079,007
17	0	24	0,33205	0,76653	000,000	000,000
18	24	25	0,00188	0,00433	000,000	000,000
19	25	26	0,22324	0,51535	000,000	000,000
20	26	27	0,10881	0,25118	030,127	014,729
21	27	28	0,71078	0,37388	230,972	112,920
22	27	29	0,18197	0,42008	060,256	029,458
23	29	30	0,30326	0,15952	230,972	112,920
24	29	32	0,02439	0,05630	120,507	058,915
25	32	33	0,04502	0,10394	000,000	000,000
26	33	34	0,01876	0,04331	056,981	027,857
27	34	35	0,11823	0,11805	364,665	178,281
28	35	36	0,02365	0,02361	000,000	000,000
29	36	37	0,18954	0,09970	124,647	060,939
30	37	38	0,39803	0,20937	056,981	027,857
31	36	39	0,05675	0,05666	000,000	000,000
32	39	40	0,09477	0,04985	085,473	041,787
33	40	41	0,41699	0,21934	000,000	000,000
34	41	42	0,11372	0,05982	396,735	193,960
35	39	43	0,07566	0,07555	000,000	000,000
36	43	44	0,36960	0,19442	181,152	088,563
37	44	45	0,26536	0,13958	242,172	118,395
38	43	46	0,05675	0,05666	075,316	036,821
39	0	48	0,33205	0,76653	000,000	000,000
40	48	49	0,11819	0,27283	001,254	000,531
41	49	50	2,96288	1,01628	006,274	002,660
42	49	51	0,00188	0,00433	000,000	000,000
43	51	52	0,06941	0,16024	117,880	049,971
44	52	53	0,81502	0,42872	062,668	026,566
45	52	54	0,06378	0,14724	172,285	073,034
46	54	55	0,13132	0,30315	458,556	194,388
47	55	56	0,06191	0,14291	262,962	111,473

48	56	57	0,11444	0,26417	235,761	099,942
49	57	58	0,28374	0,28331	000,000	000,000
50	58	59	0,28374	0,28331	109,215	046,298
51	57	61	0,04502	0,10394	000,000	000,000
52	61	62	0,02626	0,06063	072,809	030,865
53	62	63	0,06003	0,13858	258,473	109,570
54	63	64	0,03002	0,06929	069,169	029,322
55	64	65	0,02064	0,04764	021,843	009,260
56	62	67	0,10881	0,25118	000,000	000,000
57	67	68	0,25588	0,13460	020,527	008,702
58	68	69	0,41699	0,21934	150,548	063,819
59	69	70	0,50228	0,26421	220,687	093,552
60	70	71	0,33170	0,17448	092,384	039,163
61	71	72	0,20849	0,10967	000,000	000,000
62	56	73	0,13882	0,32047	226,693	096,098
63	0	75	0,00750	0,01732	000,000	000,000
64	75	76	0,27014	0,62362	294,016	116,974
65	76	77	0,38270	0,88346	083,015	033,028
66	77	78	0,33018	0,76220	083,015	033,028
67	78	80	0,32830	0,75787	103,770	041,285
68	80	81	0,17072	0,39409	176,408	070,184
69	81	82	0,55914	0,29412	083,015	033,028
70	81	83	0,05816	0,13425	217,917	086,698
71	83	84	0,70130	0,36890	023,294	009,267
72	84	85	1,02352	0,53839	005,075	002,019
73	83	86	0,06754	0,15591	072,638	028,899
74	86	87	1,32352	0,45397	405,990	161,523
75	0	121	0,01126	0,02598	000,000	000,000
76	121	122	0,72976	1,68464	100,182	042,468
77	122	123	0,22512	0,51968	142,523	060,417
78	123	124	0,20824	0,48071	096,042	040,713
79	124	125	0,04690	0,10827	300,454	127,366
80	125	127	0,61950	0,61857	141,238	059,873
81	127	128	0,34049	0,33998	279,847	118,631
82	128	129	0,56862	0,29911	087,312	037,013
83	128	130	0,10877	0,10860	243,849	103,371
84	130	131	0,56862	0,29911	247,750	105,025
85	0	133	0,01126	0,02598	000,000	000,000
86	133	134	0,41835	0,96575	089,878	038,101
87	134	135	0,10499	0,13641	1137,280	482,108
88	134	136	0,43898	1,01338	458,339	194,296
89	136	137	0,07520	0,02579	385,197	163,290
90	137	138	0,07692	0,17756	000,000	000,000
91	138	139	0,33205	0,76653	079,608	033,747
92	139	141	0,08442	0,19488	087,312	037,013
93	141	142	0,13320	0,30748	000,000	000,000
94	142	143	0,29320	0,29276	074,001	031,370
95	143	144	0,21753	0,21721	232,050	098,369
96	144	145	0,26482	0,26443	141,819	060,119
97	142	146	0,10318	0,23819	000,000	000,000
98	146	147	0,13507	0,31181	076,449	032,408
99	0	148	0,00938	0,02165	000,000	000,000
100	148	149	0,16884	0,38976	051,322	021,756
101	149	150	0,11819	0,27283	059,874	025,381
102	150	152	2,28608	0,78414	009,065	003,843
103	150	153	0,45587	1,05236	002,092	000,887
104	153	154	0,69600	1,60669	16,735	007,094
105	154	155	0,45774	1,05669	1506,522	638,634
106	155	156	0,20298	0,26373	313,023	132,694
107	156	157	0,21348	0,27737	079,831	033,842
108	157	158	0,54967	0,28914	051,322	021,756
109	158	159	0,54019	0,28415	000,000	000,000
110	157	160	0,04550	0,05911	202,435	085,815
111	160	162	0,47385	0,24926	060,823	025,784
112	162	163	0,86241	0,45364	045,618	019,338
113	163	164	0,56862	0,29911	000,000	000,000
114	158	200	0,77711	0,40878	157,070	066,584
115	200	201	1,08038	0,56830	000,000	000,000
116	159	202	1,09933	0,57827	250,148	106,041
117	202	203	0,47385	0,24926	000,000	000,000
118	154	204	0,32267	0,74488	069,809	029,593
119	204	205	0,14633	0,33779	032,072	013,596
120	205	206	0,12382	0,28583	061,084	025,894
121	0	207	0,01126	0,02598	000,000	000,000
122	207	208	0,64910	1,49842	094,622	046,260
123	208	209	0,04502	0,10394	049,858	024,375
124	209	210	0,52640	0,18056	123,164	060,214
125	209	211	0,02064	0,04764	078,350	038,304
126	211	212	0,53071	0,27917	145,475	071,121
127	211	214	0,09755	0,22520	021,369	010,447
128	214	215	0,11819	0,27283	074,789	036,564
129	214	217	0,13882	0,32047	227,926	111,431
130	217	218	0,04315	0,09961	035,614	017,411

131	218	219	0,09192	0,21220	249,295	121,877
132	219	220	0,16134	0,37244	316,722	154,842
133	220	221	0,37832	0,37775	333,817	163,199
134	221	222	0,39724	0,39664	249,295	121,877
135	222	223	0,29320	0,29276	000,000	000,000
136	7	86	0,13132	0,30315		
137	10	32	0,26536	0,13958		
138	20	130	0,14187	0,14166		
139	46	223	0,08512	0,08499		
140	33	61	0,04502	0,10394		
141	59	145	0,14187	0,14166		
142	65	147	0,14187	0,14166		
143	73	206	0,03940	0,09094		
144	78	125	0,12944	0,29882		
145	125	219	0,01688	0,03898		
146	131	223	0,33170	0,17448		
147	139	154	0,14187	0,14166		
148	138	217	0,07692	0,17756		
149	138	153	0,07692	0,17756		
150	141	154	0,07692	0,17756		
151	141	220	0,07692	0,17756		
152	145	206	0,26482	0,26443		
153	160	56	0,49696	0,64567		
154	212	122	0,17059	0,08973		
155	215	123	0,05253	0,12126		
156	223	147	0,29320	0,29276		