



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GABRIEL ROGATTO

Reconfiguração ótima de redes de distribuição

São Carlos
Dezembro, 2012

GABRIEL ROGATTO

RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de
São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e
Automação

ORIENTADOR: Dr. Geraldo Roberto Martins da Costa

São Carlos

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

R721r Rogatto, Gabriel
 RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO /
 Gabriel Rogatto; orientador Geraldo Roberto Martins da
 Costa. São Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2012.

1. Distribuição. 2. Reconfiguração. 3. Fluxo de
Carga. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Gabriel Rogatto

Título: "Reconfiguração Ótima de Redes de Distribuição"

*Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 30 / 11 / 2012,*

com NOTA 9,0 (nove, zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Titular Geraldo Roberto Martins da Costa (Orientador)
SEL/EESC/USP

Dra. Vanusa Alves de Sousa
UFSCar

M.Sc. Fillipe Matos de Vasconcelos
SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Christine Leopold Rogatto e Luiz Alberto Rogatto, pelo apoio durante toda a etapa de graduação, pesquisa e elaboração deste projeto.

Aos meus irmãos, Beatriz Rogatto e Pedro Rogatto, pela amizade e apoio a qualquer custo e momento.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC – USP, em especial ao Professor Doutor Geraldo Roberto Martins da Costa, pela dedicação e esforço neste projeto e em minha formação.

Ao Bruno Toyoshima, Danilo Luiz Alves Negrão, Fabrício Silva Pires de Camargo, Marcos Vinícius Galli Casseb e Rafael Atique Claudio pela amizade, ensinamentos, apoio e pelos momentos de descontração durante toda a etapa de graduação.

Sumário

1.	Introdução.....	17
2.	Cálculo de fluxo de carga	21
2.1.	Método de resolução para sistemas radiais	21
2.1.1.	Método da Varredura.....	22
2.1.1.1.	Processo Backward.....	22
2.2.2.	Processo <i>Forward</i>	23
2.2.	Método de resolução para sistemas malhados	26
2.2.1.	Método Newton-Raphson	26
3.	Reconfiguração da rede.....	29
3.1.	Algoritmo proposto.....	29
3.2.	Estudo de caso.....	33
4.	Resultados.....	41
4.1.	Sistema de 33 barras.....	41
4.2.	Sistema de 69 barras.....	42
4.3.	Sistema de 135 barras.....	43
4.4.	Análise dos resultados	46
5.	Conclusão.....	47
	Referências	49
	A – Sistema de 33 barras	51
	B – Sistema de 69 barras	53
	C – Sistema de 135 arras.....	57

Lista de figures

FIGURA 1: MÉTODOS PROPOSTOS PARA RESOLVER O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE REDES	17
FIGURA 2: DIAGRAMA REPRESENTANDO DUAS BARRAS GENÉRICAS DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL PARA CÁLCULO DA CORRENTE.....	22
FIGURA 3: SISTEMA DE 3 BARRAS	23
FIGURA 4: DIAGRAMA REPRESENTATIVO DE DUAS BARRAS GENÉRICAS DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL PARA CÁLCULO DA TENSÃO.	24
FIGURA 5: FLUXOGRAMA DE PROCESSO PARA CÁLCULO DO FLUXO DE CARGA.	25
FIGURA 6: FLUXOGRAMA DE PROCESSO DE RECONFIGURAÇÃO.....	31
FIGURA 7: SISTEMA DE 33 BARRAS NA CONFIGURAÇÃO INICIAL.	33
FIGURA 8: SISTEMA DE 33 BARRAS APÓS A PRIMEIRA ITERAÇÃO.	35
FIGURA 9: SISTEMA DE 33 BARRAS APÓS A SEGUNDA ITERAÇÃO	36
FIGURA 10: SISTEMA DE 33 BARRAS APÓS A TERCEIRA ITERAÇÃO.....	38
FIGURA 11: SISTEMA DE 33 BARRAS APÓS A QUARTA ITERAÇÃO.	39
FIGURA 12: SISTEMA DE 33 NA CONFIGURAÇÃO FINAL.....	40
FIGURA 13: SISTEMA DE 33 BARRAS	42
FIGURA 14: SISTEMA DE 69 BARRAS	43
FIGURA 15: SISTEMA DE 135 BARRAS	45

Lista de tabelas

TABELA 1: POTÊNCIAS DISSIPADAS DO SISTEMA NA PRIMEIRA ITERAÇÃO.....	33
TABELA 2: POTÊNCIA NA CHAVE.....	34
TABELA 3: POTÊNCIA DISSIPADA NO SISTEMA NA SEGUNDA ITERAÇÃO.....	35
TABELA 4: POTÊNCIA DISSIPADA NO SISTEMA NA TERCEIRA ITERAÇÃO.....	37
TABELA 5: POTÊNCIA DISSIPADA NO SISTEMA NA QUARTA ITERAÇÃO.....	38
TABELA 6: POTÊNCIA DISSIPADA NO SISTEMA NA QUINTA ITERAÇÃO.....	39
TABELA 7: RESULTADO DO SISTEMA DE 32 BARRAS.....	41
TABELA 8: RESULTADO DO SISTEMA DE 69 BARRAS	42
TABELA 9: RESULTADO DO SISTEMA DE 135 BARRAS	44

RESUMO

ROGATTO, G. (2012). **Reconfiguração Ótima De Redes De Distribuição.** Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Este trabalho descreve uma nova metodologia para cálculo de reconfiguração de rede. A reconfiguração de redes de distribuição de energia permite alterar a topologia do sistema através da abertura e fechamento das chaves de interconexão. Tal processo pode ter como finalidade o isolamento de falhas, balanceamento de carga, minimização de perdas ativas, caso de estudo deste trabalho, entre outros objetivos. Devido a não linearidade do sistema, à complexidade do modelamento matemático, à característica não convexa das equações, ao fenômeno da explosão, e a presença de sistemas de grande porte, atingir tais objetivos torna-se uma tarefa de grande dificuldade. Neste cenário, a proposta foi utilizar o método de fluxo de potência ótimo como ferramenta para o cálculo de fluxo de potência. Os sistemas de 33, 70 e 135 barras, sendo o de 135 um sistema real, foram avaliados pela metodologia proposta e comparados com resultados da literatura.

Palavras chaves: Distribuição; Reconfiguração; Fluxo de Carga;

ABSTRACT

ROGATTO, G. (2012). **Optimal Reconfiguration Of Distribution Networks.** Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

This work describes a new methodology for calculating network reconfiguration. The network reconfiguration process its possible change the topology of the system through the opening and closing of interconnection switches. Such a process can be designed to isolate fault, balance the load among feeders, reduction of real power losses, and the case of this work, among others. Due to the nonlinearity of the system, the complexity of the mathematical model, the characteristic equations not convex, the phenomena of combinatorial explosion and the presence of large system, to achieve such goals becomes a very difficult task. In this scenario, the proposal was to use the method for optimal power flow as a tool for calculating power flow, systems of 33, 70 and 135 bars, and the 135 a real system, the proposed methodology was evaluated and compared with the literature.

Keywords: Distribution; Reconfiguration; Power Flow;

1. Introdução

Nas últimas décadas um grande crescimento da demanda por energia elétrica vem ocorrendo, juntamente com o aumento das exigências da qualidade da energia, principalmente devido ao avanço da eletrônica de potência, desde modo, melhorias e investimentos em pesquisas são exigidos no setor elétrico, resultando em novas e melhores metodologias de solução de problemas.

Uma alternativa para solucionar parte destes problemas é a reconfiguração do sistema de distribuição, evitando a compra e instalação de novos equipamentos (ZVIETCOVICH, 2006). Tal operação é permitida devido a diversos conjuntos de dispositivos de controle e de proteção da rede que permitem a alteração de sua configuração, possibilitando a redução das perdas ôhmicas nas linhas de distribuição de energia elétrica.

Existem diversos métodos de resolução do problema de reconfiguração de rede, podendo ele ser dividido em duas categorias: métodos baseados em conhecimento e métodos baseados em modelos físicos ou biológicos, como podem ser visto na figura 1 (ZVIETCOVICH, 2006).

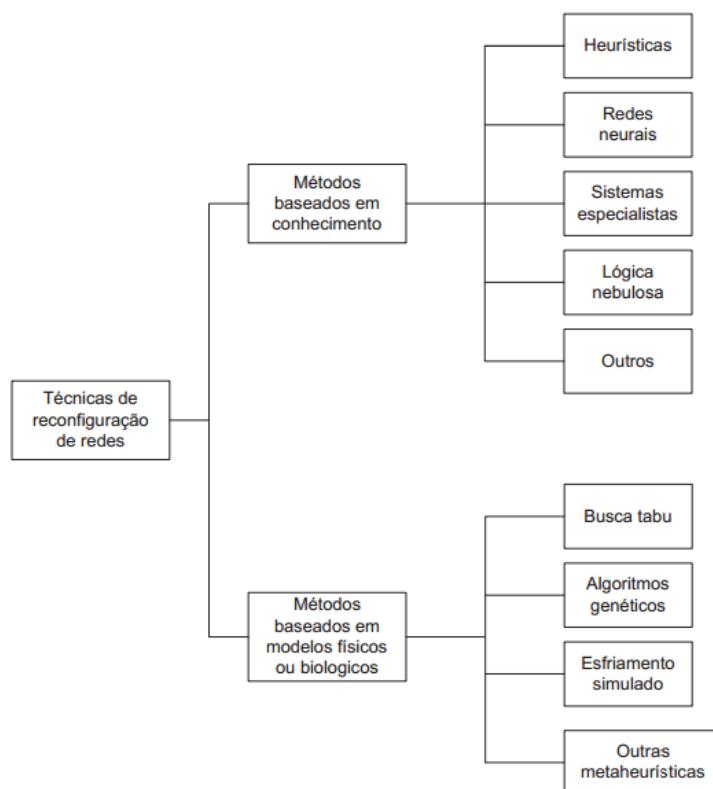


Figura 1: Métodos propostos para resolver o problema de reconfiguração de redes.

Inicialmente a categoria de métodos baseados em conhecimento foi amplamente estudada, e diversos métodos novos foram criados e aperfeiçoados, baseado sempre nas experiências dos operadores sobre as manobras dos sistemas. Criando assim as heurísticas, dentre os métodos criados podemos citar (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988; GOSWAMI; BASU, 1992; BARAN; WU, 1989a; SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989).

Com o avanço computacional técnicas utilizando Redes Neurais, Lógica Fuzzy, foram estudados e aplicados na resolução de tal problema, podemos citar (LIU; LEE; VENKATA, 1988; BOUCHARD et al., 1993; KIM; KO; JUNG, 1993).

O segundo grupo, métodos baseados em modelos físicos ou biológicos, não apresenta uma formulação matemática rigorosa que permita estabelecer com certeza seu comportamento em cada situação (ZVIETCOVICH, 2006). Contudo, tais métodos apresentam solução ótima ou quase ótima de sistemas de grande porte, mas geralmente com esforços computacionais elevados.

Este estudo teve como motivação a busca da solução, sendo o sistema malhada como ponto de partida e o sistema radial com mínima potência ativa dissipada como resposta, ou seja, a comprovação de que o sistema malhada apresenta informação suficientes que possam guiar a escolha das chaves a serem abertas atingindo assim o ponto ótimo, sem a necessidade de métodos clássicos de otimização.

Devido a não linearidade do sistema, e ao grande número de possibilidades (GUIMARÃES, 2005), este problema é de grande complexidade e a literatura ainda não apresenta um método de solução consolidado no setor de energia elétrica.

A solução proposta neste trabalho visa buscar o ponto ótimo de operação por meio de uma heurística, ou seja, uma busca pela solução tendo como base a experiência do engenheiro.

A organização deste trabalho segue as seguintes características:

No capítulo 1, trata-se de uma introdução sobre a importância e as dificuldades do processo de reconfiguração de redes de distribuição.

No capítulo 2, são apresentados métodos de resolução do cálculo do fluxo de carga, radial e malhado. Esta ferramenta é utilizada para análise na reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

No capítulo 3, é apresentado o modelo proposto de busca do ponto ótimo de operação do sistema.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos com a implementação do algoritmo de reconfiguração para minimização das perdas ôhmicas.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões de tal método.

No apêndice são apresentados os dados completos dos sistemas analisados.

2. Cálculo de fluxo de carga

O cálculo de fluxo de carga consiste na resolução do circuito elétrico que representa a rede a ser estudada, tais equações são não lineares, e sua resolução nos permite obter a tensão (módulo e fase) de todas as barras, a corrente (módulo e fase) de todas as barras e linhas e as perdas ôhmicas.

Existem diversos algoritmos para solucionar o problema em questão, como por exemplo, os algoritmos de Gauss, Gauss-Seidel, Newton, método da varredura, entre outros.

Estes métodos podem ser divididos em duas classes:

- Método de resolução de sistemas radiais;
- Método de resolução de sistemas malhados;

O segundo método possui a vantagem de resolver qualquer tipo de topologia, radial ou malhada.

Para o processo de reconfiguração proposto é necessário a utilização de um método para resolução de fluxo de carga cujas características sejam malhadas, dentre os métodos existentes o mais utilizado é o de Newton e suas variantes (MONTICELLI, 1983).

2.1. Método de resolução para sistemas radiais

As maioria dos sistemas de distribuição operam com topologia radial devido à maior simplicidade de controle, planejamento e operação. Com isso, buscaram-se métodos de cálculo de fluxo de potência especializados em tal topologia e que possuíssem, portanto, respostas mais rápidas e precisas.

O método que se destacou para tal finalidade é o método da varredura, ou *Backward/Forward Sweep*, proposto por D. Shimohammadi ET. AL. (1988), sendo baseada na técnica *Ladder*, proposta por W. H. Kerting ET. AL. (1976).

2.1.1. Método da Varredura

Este algoritmo possui este nome devido ao processo iterativo percorrendo todas as barras do sistema, iniciando nas barras finais em direção à subestação, e em seguida o contrário, varrendo todo o sistema repetidas vezes.

Inicialmente deve-se escolher um valor para a tensão nas barras. Convenientemente usamos o mesmo valor da subestação, como se a linha fosse ideal (sem perdas). Com estas informações é possível calcular a corrente de carga nas barras e, em seguida, as correntes nas linhas no sentido *backward*. Com tais informações, calculam-se as perdas ativas (ôhmicas) e reativas do sistema.

Com os valores das correntes nos ramos é possível calcular a queda de tensão nas linhas e, sabendo o valor exato da tensão de uma barra, a da subestação, é possível calcular a tensão na próxima barra, em um sentido *forward*, recalculando e atualizando todas as tensões. O processo então se repete até convergir à resposta desejada, respeitando uma dada tolerância ξ .

Os cálculos dos processos *Backward* e *Forward* são apresentados com mais detalhes a seguir.

2.1.1.1. Processo Backward

Usando a Figura 2, que possui duas barras genéricas de um sistema, como base para os cálculos. A carga é representada na forma $S_k = P_k + jQ_k$ e a tensão na forma $V_k = V_{kr} + jV_{ki}$. Têm-se as seguintes relações matemáticas:

$$V_k = V_{kr} + jV_{ki}$$

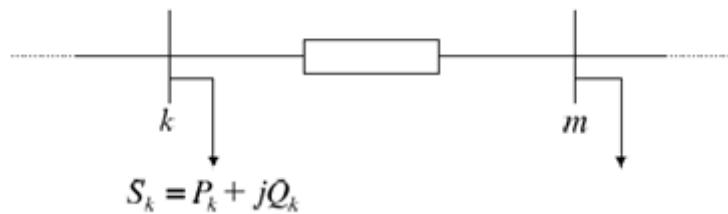


Figura 2: Diagrama representando duas barras genéricas de um sistema de distribuição radial para cálculo da corrente.

$$S_k = P_k + jQ_k \quad (1)$$

$$V_k = V_{kr} + jV_{ki} \quad (2)$$

$$S_k = V_k \cdot I_k * \quad (3)$$

Isolando I_k , e substituindo os valores das equações (1) e (2) em (3), tem-se:

$$I_k = \frac{P_k + jQ_k}{V_{kr} + jV_{ki}} \times \frac{V_{kr} - jV_{ki}}{V_{kr} - jV_{ki}} \quad (4)$$

Sabendo que $I_k = I_{kr} + jI_{ki}$, e substituindo em (4) tem-se as seguintes relações:

$$I_{kr} = \frac{P_k \cdot V_{kr} + Q_k \cdot V_{ki}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \quad (5)$$

$$I_{ki} = \frac{-P_k \cdot V_{ki} + Q_k \cdot V_{kr}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \quad (6)$$

No sentido das barras mais distantes à subestação todas as correntes de linha são calculadas, e seus valores atualizados.

O processo *Backward* termina com o cálculo de todas as correntes de linha (I_k), uma vez que, com estes valores é possível calcular as tensões das barras (V_k), atualizando assim seu valor.

A fim de exemplificar os cálculos das correntes nos ramos, tem-se um sistema de 3 barras, conforme Figura 3, que ilustra os valores de I_{km} .

$$I_{23} = I_3 \quad I_{12} = I_{23} + I_2 \quad (7)$$

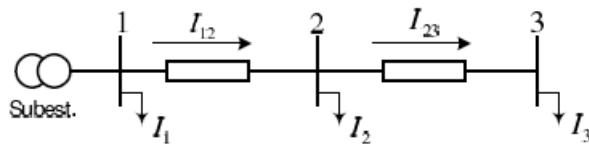


Figura 3: Sistema de 3 barras

2.2.2. Processo *Forward*

Usando a Figura 4, que possui duas barras genéricas de um sistema, como base para os cálculos. É conhecido o valor da tensão na barra $V_k = V_{kr} + jV_{ki}$ e a corrente no ramo calculado pelo processo *Backward*. Temos as seguintes relações matemáticas:

$$V_k = V_{kr} + jV_{ki} = V_m + (rkm + jxkm) \cdot (Ik_{mr} + jIk_{mi}) \quad (8)$$

Sabe-se, portanto, que $V_m = V_{mr} + jV_{mi}$, ou seja:

$$V_{mr} = V_{kr} - rkm \cdot Ik_{mr} + xkm \cdot Ik_{mi} \quad (9)$$

$$V_{mi} = V_{ki} - rkm \cdot Ik_{mi} + xkm \cdot Ik_{mr} \quad (10)$$

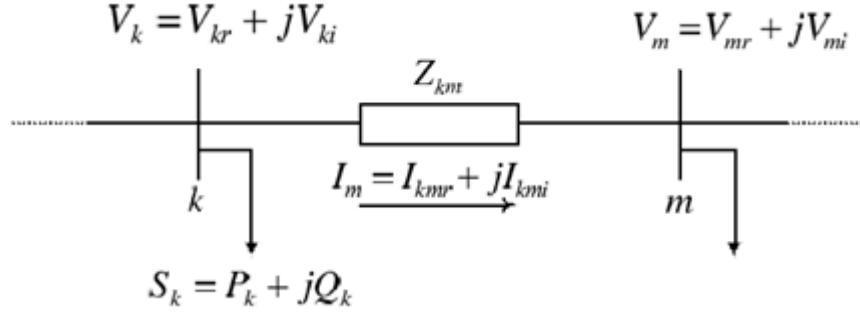


Figura 4: Diagrama representativo de duas barras genéricas de um sistema de distribuição radial para cálculo da tensão.

No sentido da subestação às barras mais distantes, todas as tensões são calculadas e seus valores atualizados.

O processo *Forward* termina com a atualização de todas as tensões das barras (V_k), neste ponto deve-se verificar se ouve a convergência dos cálculos. Para isso realiza-se:

$$|V_k - V_k'| \leq \xi \quad (11)$$

Em que V_k é a tensão na barra k da iteração atual, V_k' a tensão na barra k da iteração anterior e ξ o critério de parada escolhido pelo operador.

Quando todas as tensões das barras satisfizerem tal equação, foi atingida solução, caso contrário repete-se o processo *Bacward, Forward*.

Portanto podemos deduzir da Figura 3:

$$V2 = V1 - I12.Z12 \quad V3 = V2 - I23.Z23 \quad (12)$$

Atingida a solução, deve-se então calcular as perdas ativas e reativas. Nos ramos $k-m$, Figura 3, são calculadas da seguinte forma:

$$P_{kmp} = rkm \cdot Ikm^2 \quad (13)$$

$$Q_{kmp} = xkm \cdot Ikm^2 \quad (14)$$

A perda total do sistema é:

$$Pt = \sum_{(k,m) \in \alpha} rkm \cdot Ikm^2 \quad (15)$$

$$Qt = \sum_{(k,m) \in \alpha} xkm \cdot Ikm^2 \quad (16)$$

Em que α representa o conjunto de todos os ramos do sistema. A Figura 5 apresenta o fluxograma do processo (GUIMARÃES, 2005).

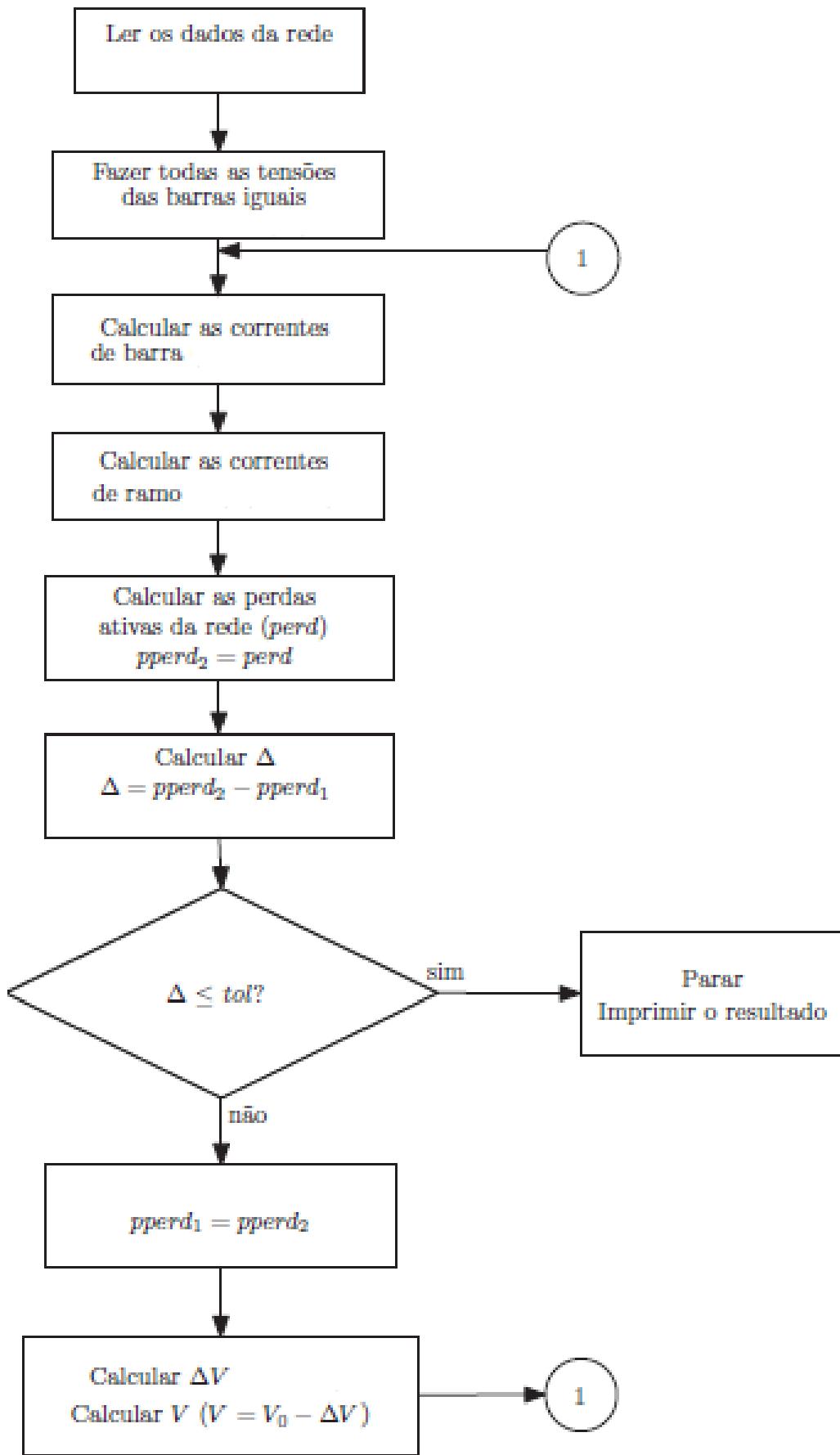


Figura 5: Fluxograma de processo para cálculo do fluxo de carga.

2.2. Método de resolução para sistemas malhados

A maioria do sistema de transmissão nacional opera com topologia malhada, com somente 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país fora do Sistema Interligado Nacional (SIN). Estes sistemas possuem a característica de operar interligado, com linhas paralelas e muitos caminhos redundantes dos pontos de geração para os pontos de carga, formando uma rede malhada (CARVALHO, 2005).

Diversas técnicas foram desenvolvidas, como os métodos de Gauss, Newton e suas variantes. Iremos retratar o método de Newton-Raphson, devido a sua ampla utilização nas concessionárias de energia.

2.2.1. Método Newton-Raphson

Neste método as equações não lineares que representam o sistema elétrico são linearizadas mediante o desenvolvimento da série de Taylor, desprezando os termos de ordem igual e superior a 2^a derivada. Tal método necessita de uma condição inicial, e convencionalmente é utilizado o valor de 1 p.u., considerando como se o sistema fosse ideal (sem perdas).

Devido à aproximação na linearização das equações para a obtenção da solução do sistema original, são necessárias sucessivas iterações. Neste método, a cada iteração é feita uma linearização das equações não lineares, o que requer o cálculo da matriz dos coeficientes do sistema linear denominada de matriz Jacobiana, bem como o cálculo do vetor dos termos independentes (CANOSSA, 2007). Assim, um sistema linear precisa ser resolvido a cada iteração.

Como verificado em (MONTICELLI, 1983), o método de Newton é aplicado à resolução do sistema de equações dado por:

$$\Delta P = P^{esp} - P(V, \theta) = 0 \rightarrow \Delta P_k = P^{esp}_k - P_k(V, \theta) = 0 \quad k \in \{\text{barras } PQ \text{ e } PV\} \quad (17)$$

$$\Delta Q = Q^{esp} - Q(V, \theta) = 0 \rightarrow \Delta Q_k = Q^{esp}_k - Q_k(V, \theta) = 0 \quad k \in \{\text{barras } PQ\} \quad (18)$$

sendo P^{esp}_k e Q^{esp}_k os valores das injeções de potência ativa e reativa especificadas para as barras, $P^{esp}_k = P^G_k - P^C_k$ e $Q^{esp}_k = Q^G_k - Q^C_k$.

Os valores de $P_k(V, \theta)$ e $Q_k(V, \theta)$ são calculados através das equações das potências nodais. ΔP_k e ΔQ_k são chamados de resíduos de potência ativa e reativa.

A resolução da equação (19) nos permite a obtenção do vetor de correção Δx , isto é, o vetor de atualização das variáveis de estado definida em (20).

$$g(x^i) = -J(x^i)\Delta x^i \quad (19)$$

Sabe-se que:

$$\Delta x^i = \begin{bmatrix} \Delta\theta^i \\ \Delta V^i \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$g(x^i) = \begin{bmatrix} \Delta P^i \\ \Delta Q^i \end{bmatrix} \quad (21)$$

em que $\Delta\theta^i$ e ΔP^i possuem o número de linhas igual à soma das barras dos tipos PV e PQ, e ΔV^i e ΔQ^i possuem o número de linhas igual à quantidade de barras PQ.

A matriz Jacobiana ($J(x^i)$) pode ser escrita como:

$$J(x^i) = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (22)$$

sendo as submatrizes:

$$H = -\frac{\partial P(V, \theta)}{\partial \theta} \quad (23)$$

$$N = -\frac{\partial P(V, \theta)}{\partial V} \quad (24)$$

$$M = -\frac{\partial Q(V, \theta)}{\partial \theta} \quad (25)$$

$$L = -\frac{\partial Q(V, \theta)}{\partial V} \quad (27)$$

portanto a equação (19) fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^i \\ \Delta Q^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta^i \\ \Delta V^i \end{bmatrix} \quad (28)$$

Desenvolvendo as submatrizes H, N, M e L têm-se:

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m [G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}] \quad (29)$$

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in K} V_m [G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}] \quad (30)$$

$$N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k [G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}] \quad (31)$$

$$N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k G_{kk} + \sum_{m \in K} V_m [G_{km} \cos \theta_{km} - B_{km} \sin \theta_{km}] \quad (32)$$

$$M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k V_m [G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}] \quad (33)$$

$$M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in K} V_m [G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}] \quad (34)$$

$$L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k [G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}] \quad (35)$$

$$L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k B_{kk} + \sum_{m \in K} V_m [G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}] \quad (36)$$

Com isso, as etapas para solução do sistema é:

- I. Fazer $i=0$, escolher os valores iniciais dos ângulos das tensões das barras PQ e PV e a magnitude das tensões das barras PQ, normalmente 1 p.u. e 0° ;
- II. Calcular $P_k(V^i, \theta^i)$ para as barras PQ e PV e $Q_k(V^i, \theta^i)$ para as barras PQ, determinando assim o vetor dos resíduos ΔP_k^i e ΔQ_k^i ;
- III. Testar a convergência: se $\max_{k \in \{PQ+PV\}} \{|\Delta P_k^i|\} \leq \epsilon_p$ e $\max_{k \in \{PQ\}} \{|\Delta Q_k^i|\} \leq \epsilon_q$, o processo termina, tendo a solução (V^i, θ^i) , caso contrário, continuar;
- IV. Calcular a matriz Jacobiana;
- V. Resolver o sistema linear (28);
- VI. Determinar a nova solução (V^{i+1}, θ^{i+1}) , em que $V^{i+1} = V^i + \Delta V^i$ e $\theta^{i+1} = \theta^i + \Delta \theta^i$;
- VII. $i = i + 1$ e retornar a II.

3. Reconfiguração da rede

Existem dois métodos principais para solucionar o problema de reconfiguração, os algoritmos heurísticos e a aplicação de inteligência artificial (ZVIETCOVICH, 2006). Iremos retratar somente os algoritmos heurísticos, uma vez que o algoritmo proposto enquadra-se neste método. Tal método pode ser dividido em duas técnicas.

O Primeiro método, proposto por (MERLIN; BACK, 1975), e modificado por (SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989) consiste em fechar todas as chaves, obtendo-se assim um sistema malhado. Utilizando um programa de fluxo de carga, abrem-se as chaves até obter novamente um sistema radial.

O segundo método, proposto por (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988) e modificado por (BARAN; WU, 1989a) utiliza uma técnica baseada na troca de ramos, mantendo a radialidade do sistema. Este processo consiste no fechamento de uma chave formando um laço e procura-se uma chave que deve ser aberta.

O método proposto neste trabalho enquadra-se no primeiro método e consiste na análise do sistema malhado e na influência da abertura de certas chaves do circuito nas propriedades do sistema (tensão, corrente e potência dissipada), para então escolher as chaves a serem abertas, atingindo assim o ponto ótimo, de mínima potência ativa dissipada.

3.1. Algoritmo proposto

A busca pelo ponto ótimo é realizada inicialmente resolvendo o cálculo de fluxo de potência para o sistema completamente malhado, ou seja, com todas as chaves fechadas. São armazenadas as informações das perdas ôhmicas totais e de cada ramo, pois são elas que são analisadas para verificar qual chave deve ser aberta.

Em seguida é aberta uma chave do sistema, calcula-se novamente o fluxo de potência, e armazena-se a informação da perda ativa total. Fecha-se a chave e abre-se a próxima, repetindo o processo. Ao término da varredura do sistema, ou seja, quando todas as chaves já foram abertas, verifica-se qual topologia obteve a menor perda ôhmica total, tal valor é considerado a referência.

Caso alguma topologia apresente um valor próximo da referência (empate), ou seja, valor menor que a precisão do fluxo de potência, utiliza-se as informações

armazenadas do sistema original para tomarmos a melhor escolha, uma vez que, neste caso os valores não podem ser comparados pois possuem erros maiores que a própria diferença.

Neste caso deve-se verificar dentre os ramos candidatos a serem abertos qual apresentou maior perda ativa no sistema original, tal ramo deve ser aberto.

Portanto a decisão de qual ramo deve ser aberto segue os seguintes critérios:

1. Caso nenhuma outra topologia apresente valor muito próximo da referência (empate), o novo sistema original é o que apresente a menor perda ôhmica total.
2. Caso uma ou mais topologias apresente valores muito próximos da referência (empate), verifica-se qual chave foi aberta em cada topologia, e qual a potência dissipada pela chave no sistema de original, a chave com maior dissipação de potência deve ser aberta.

Atualiza-se então o sistema original, agora com a chave aberta. Após a abertura da chave o processo recomeça, e termina quando o sistema vira radial.

Tal processo pode ser verificado pelo fluxograma presente na figura 6.

Nele é possível verificar a existência de dois loops, cuja importância deve ser ressaltada:

- Controle de qual chave deve ser aberta, correspondente aos blocos 2 a 12 (Loop principal);
- Controle de varredura do sistema, correspondente aos blocos 5 a 7 (Loop secundário);

O loop principal controlará a chave que deve ser aberta, sendo solicitado pelo mesmo número de vezes que o número de malhas presente no sistema.

O loop secundário varrerá o sistema inteiro, abrindo as chaves uma a uma, e calculando o fluxo de potência, sendo solicitado, no máximo, pelo mesmo número de chaves fechadas presente na rede.

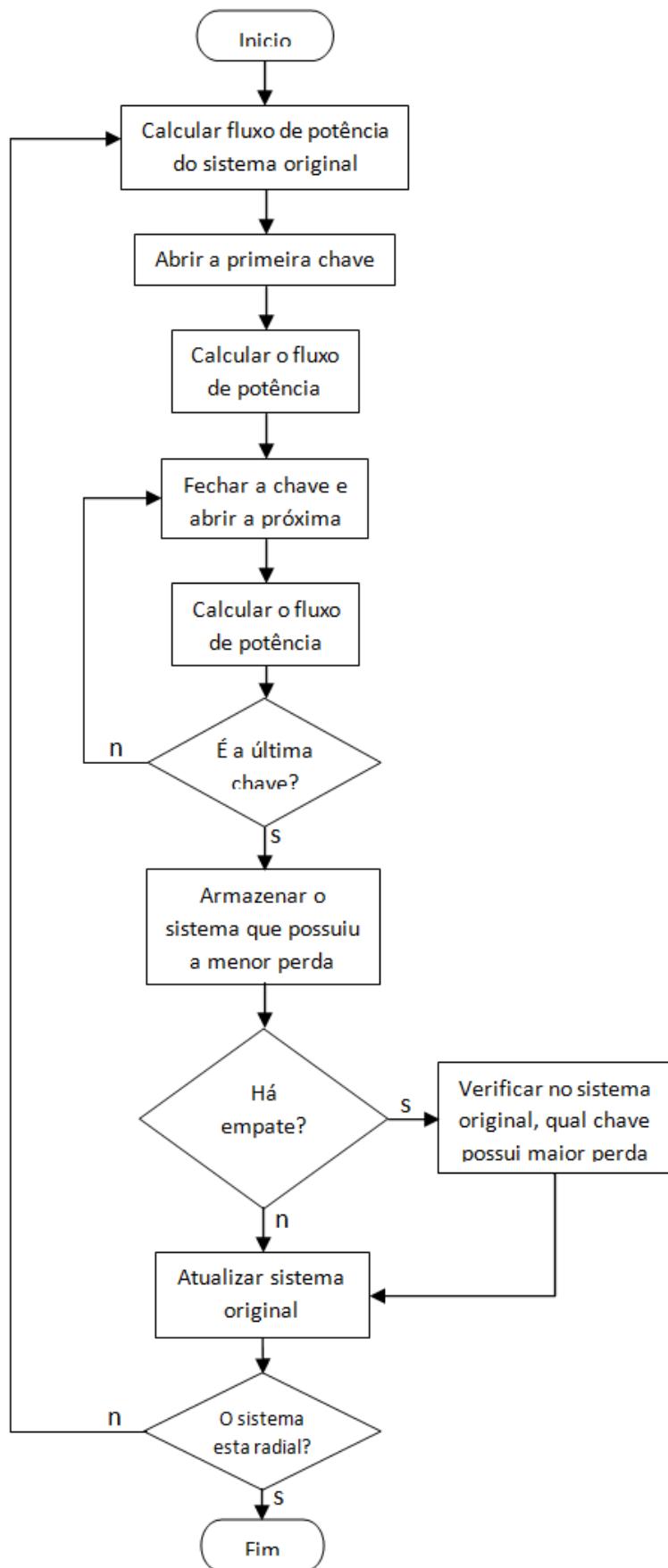


Figura 6: Fluxograma de processo de reconfiguração.

Verifica-se que é possível calcular de antemão o número máximo de vezes que o programa de fluxo de potência será solicitado, sendo ele igual a:

$$N = \left(\sum_{Chave=\alpha-\beta}^{\alpha} Chave \right) \quad (37)$$

Sendo:

- N: Número de vezes que o programa de fluxo de potência pode ser solicitado;
- α: Número total de chaves;
- β: Número de malhas presentes no sistema, decrescido de 1;

Nota-se que este valor nunca será atingido, uma vez que conforme o sistema se torna radial, o número de chaves possíveis de serem abertas, sem ilhar nenhuma barra do sistema, diminui. E tais configurações não são analisadas.

Como o maior esforço computacional é devido ao programa de fluxo de carga, e o número de solicitações máximo pode ser calculado, é possível calcular o tempo máximo de convergência do software. Sendo ele:

$$T = N * \gamma \quad (38)$$

Sendo:

- γ: Tempo de processamento médio do fluxo de potência;

3.2. Estudo de caso

Tomaremos como exemplo o sistema de 33 barras (BARAN; WU, 1989a).

O inicio do processo tem o sistema totalmente malhado, como mostrada da figura 7.

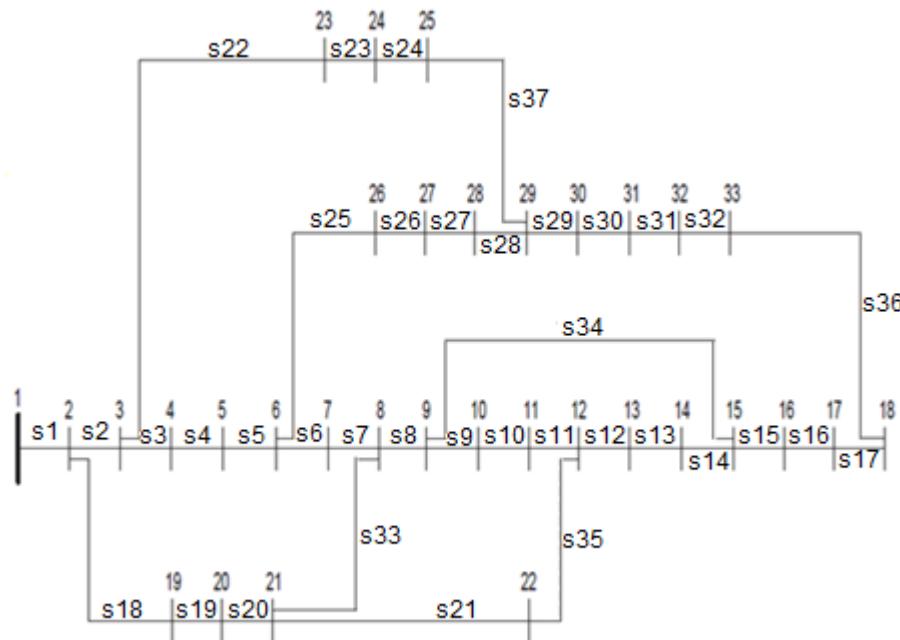


Figura 7: Sistema de 33 barras na configuração inicial.

Após abertas todas as chaves uma a uma, e calculada as perdas ôhmicas totais, obteve-se a seguinte tabela:

Tabela 1: Potências dissipadas do sistema na primeira iteração.

Chave aberta	Potência dissipada total (kW)
s2	610.0084
s3	175.7663
s4	164.8665
s5	160.2698
s6	127.9287
s7	132.8477
s8	128.9120
s9	123.2534
s10	123.2630
s11	123.4533
s12	126.8480
s13	125.3890
s14	123.5627
s15	131.5182
Continua	

Chave aberta	Potência dissipada total (kW)
s16	128.8704
s17	126.8028
s18	197.0837
s19	186.3508
s20	176.5285
s21	136.9002
s22	227.9551
s23	214.0512
s24	164.8625
s25	140.7766
s26	137.6834
s27	134.9266
s28	132.6329
s29	185.5898
s30	133.2726
s31	126.3657
s32	123.6803
s33	130.1947
s34	126.6799
s35	132.5153
s36	124.5781
s37	135.5975

Neste caso o valor de referência é 123.2534 kW, que corresponde à topologia com a chave 9 aberta, porém com a chave 10 aberta a potência dissipada foi de 123.2630 kW, uma diferença de 0.0096, valor menor que a tolerância do fluxo de carga, 0.01. Com isso verifica-se qual chave possui perda maior no sistema original:

Tabela 2: Potência na chave.

Chave	Potência dissipada (kW)
9	35.23
10	1.33

Observa-se que a chave 9 contribui mais para o aumento da potência dissipada total do que a chave 10, portanto ela deve ser aberta e o novo sistema original torna-se o representado na figura 8.

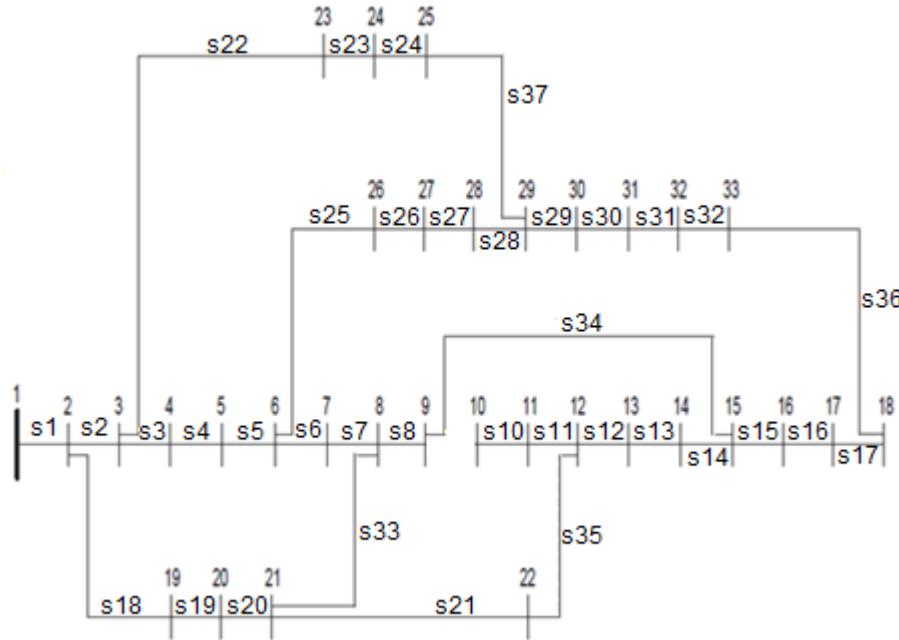


Figura 8: Sistema de 33 barras após a primeira iteração.

Terminada a primeira iteração e repetindo os processos de seleção da chave, não calculando a fluxo de potência para as topologias que apresentassem cargas isoladas. Construímos assim a tabela 3:

Tabela 3: Potência dissipada no sistema na segunda iteração.

Chave aberta	Potência dissipada total (kW)
2	625.7864
3	176.2297
4	165.2040
5	160.5565
6	127.9842
7	123.8367
8	130.7642
12	128.5479
13	126.2508
14	123.4332
15	131.4769
16	128.8219
17	126.7488
18	199.5477
19	188.4716
20	178.3380
21	144.3984
22	227.8518
23	213.9509
24	164.7797
25	140.8650
26	137.7535
Continua	

Chave aberta	Potência dissipada total (kW)
27	134.9797
28	132.6708
29	185.7790
30	133.2500
31	126.3169
32	123.6187
33	130.7269
34	128.5526
35	137.7124
36	124.5184
37	135.5366

Verifica-se que o novo valor da referência é 123.4332, topologia com a chave 14 aberta, como nenhuma outra topologia apresentou potência dissipada próxima, a chave a ser aberta é a própria 14, e o novo sistema original ficou:

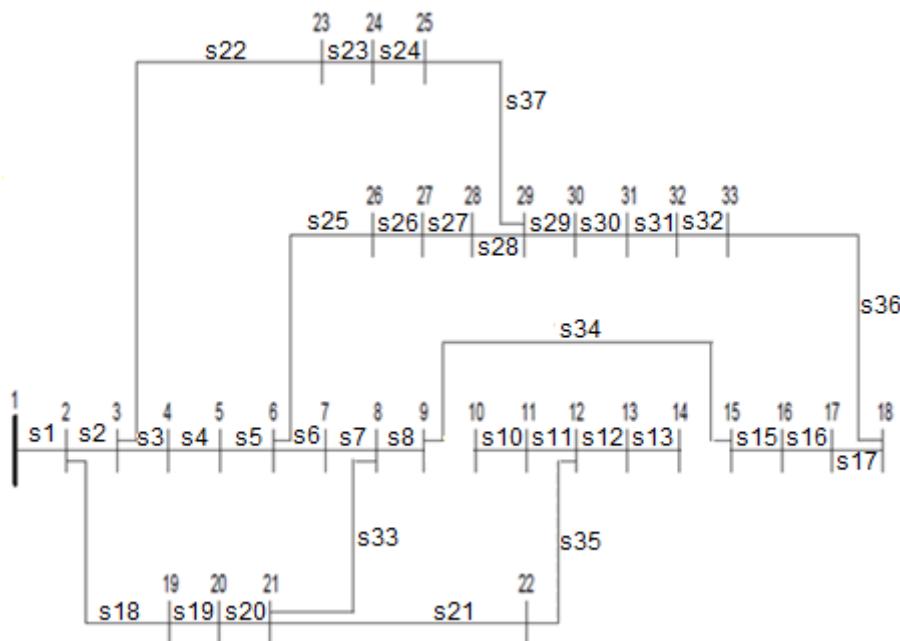


Figura 9: Sistema de 33 barras após a segunda iteração

Uma vez atualizado o sistema original, a busca pela próxima chave a ser aberta reinicia, e os valores da terceira iteração são expressos na tabela 4:

Tabela 4: Potência dissipada no sistema na terceira iteração.

Chave aberta	Potência dissipada total (kW)
2	719.4473
3	178.4217
4	167.0843
5	162.9937
6	128.2921
7	124.0735
8	138.6251
15	131.5141
16	128.7670
17	126.6699
18	205.1922
19	193.0159
20	181.9198
22	233.8343
23	219.2523
24	167.6541
25	141.7602
26	138.5638
27	135.7101
28	133.3299
29	201.2485
30	136.5576
31	127.8618
32	123.8157
33	135.0141
34	134.5716
36	124.5377
37	136.8236

Verifica-se que o valor de referencia é 123.8157, como a chave 32 é aberta, e nenhuma topologia apresentou perda próxima a este valor, o sistema original é novamente atualizado, resultando na topologia da figura 10.

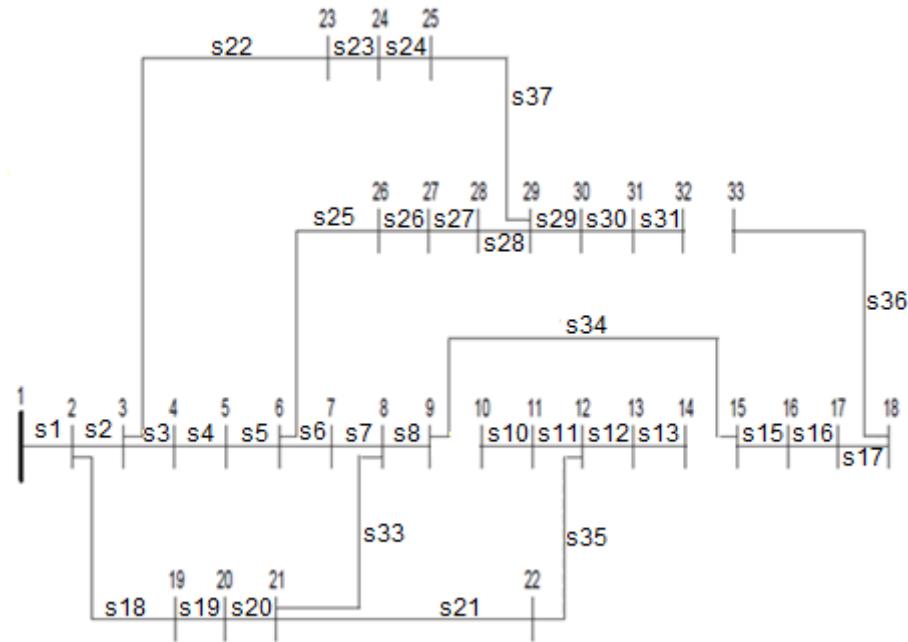


Figura 10: Sistema de 33 barras após a terceira iteração.

Os valores da quarta iteração são mostrados na tabela 5:

Tabela 5: Potência dissipada no sistema na quarta iteração.

Chave aberta	Potência dissipada total (kW)
2	746.4192
3	179.3237
4	167.8413
5	162.9937
6	130.3512
7	124.5477
18	208.0082
19	195.4043
20	183.9280
22	248.6681
23	232.1411
24	174.0322
25	147.6415
26	143.6501
27	140.0874
28	137.1335
33	135.6250
37	137.5427

Como a chave 7 aberta, a topologia que apresentou menor perda, apresenta configuração igual mostrada na figura 11.

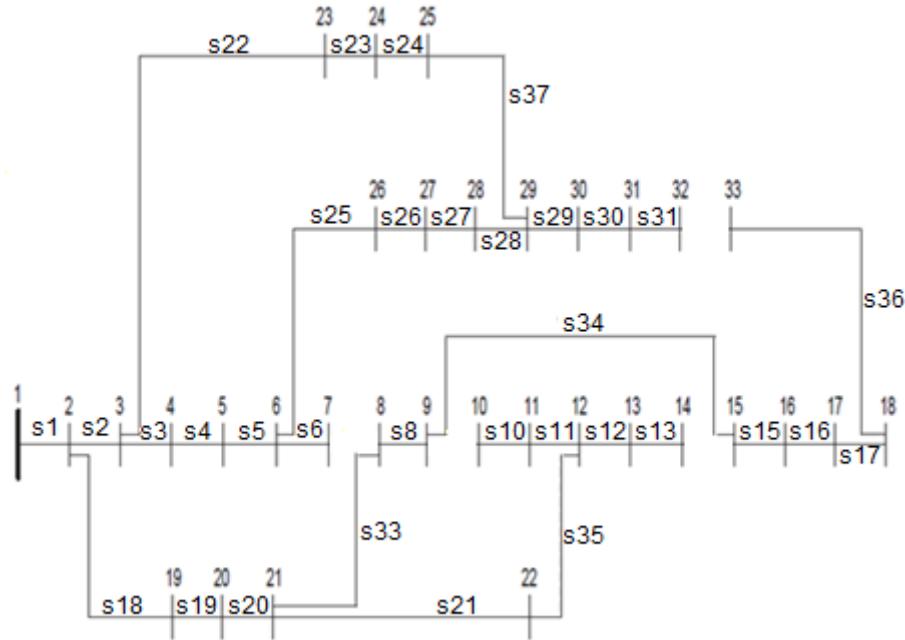


Figura 11: Sistema de 33 barras após a quarta iteração.

Os resultados das perdas da quinta e ultima iteração, uma vez que há somente 5 malhas, e portanto 5 chaves que devem ser abertas para tornar o sistema radial, são representados na tabela 6:

Tabela 6: Potência dissipada no sistema na quinta iteração.

Chave aberta	Potência dissipada total (kW)
3	201.5697
4	183.9500
5	176.7056
22	251.5112
23	234.2305
24	174.2016
25	151.6399
26	147.2475
27	143.2973
28	139.9781
37	139.5513

Com isso, a chave 37 é aberta e o sistema chega à topologia radial (figura 12).

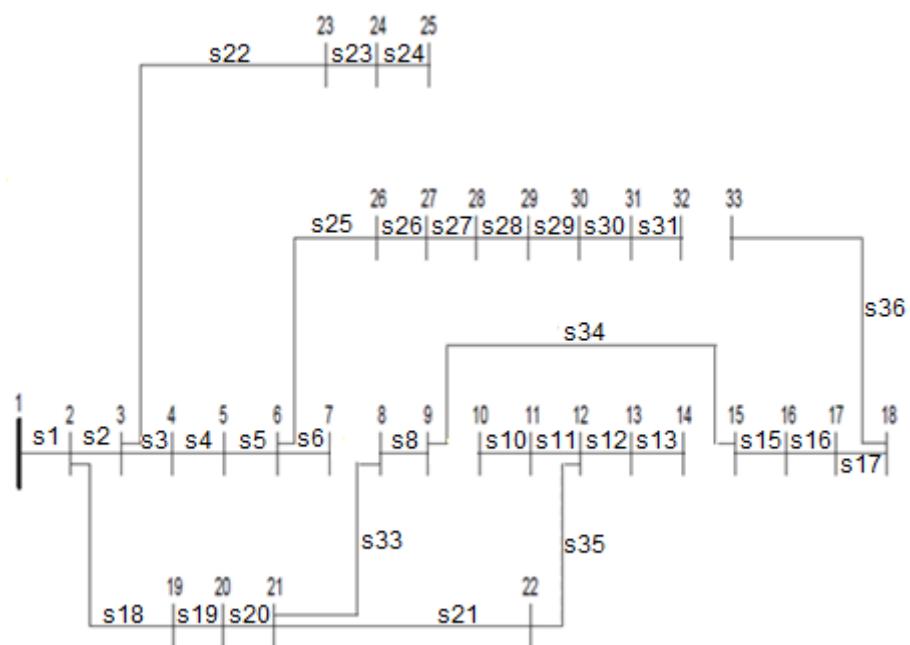


Figura 12: Sistema de 33 na configuração final

4. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em diversas simulações a fim de validar o algoritmo proposto para reconfiguração. Sendo tais circuitos bastante conhecidos na literatura especializada, incluindo também o estudo de um caso real (sistema de 135 barras).

Para o cálculo do problema de fluxo de carga foi utilizado um *software* de fluxo de carga ótimo, que é amplamente utilizado no laboratório de pesquisa LASEE – EESC – USP (SOUZA, 2006).

Outro método de cálculo de fluxo de carga pode ser utilizado, uma vez que o único requisito é o cálculo para configurações malhadas.

Para realizar a validação do algoritmo heurístico proposto, utilizamos como referência os sistemas encontrados em (ZVIETCOVICH, 2006).

4.1. Sistema de 33 barras

O sistema de 33 barras, representado na Figura 13, obtido em (BARAN; WU, 1989a) possui os ramos s33, s34, s35, s36 e s37 de interconexão. Na Tabela 7 é mostrada a resposta do programa em comparação à dissertação (ZVIETCOVICH, 2006). Os dados referentes a este sistema encontram-se no Apêndice A.

Tabela 7: Resultado do sistema de 32 barras.

Configuração	Chaves abertas	Perda (kW)
Inicial	s33 s34 s35 s36 s37	202.6762
2	s7 s9 s14 s32 s37	139.5497
3	s7 s9 s14 s28 s32	139.9767
4	s7 s10 s14 s32 s37	140.2773
5	s7 s10 s14 s28 s32	140.7043
6	s7 s11 s14 s32 s37	141.2025
Algoritmo proposto	s7 s9 s14 s32 s37	139.5497

Verificou-se que o algoritmo proposto atingiu como configuração ótima a mesma topologia encontrada na literatura.

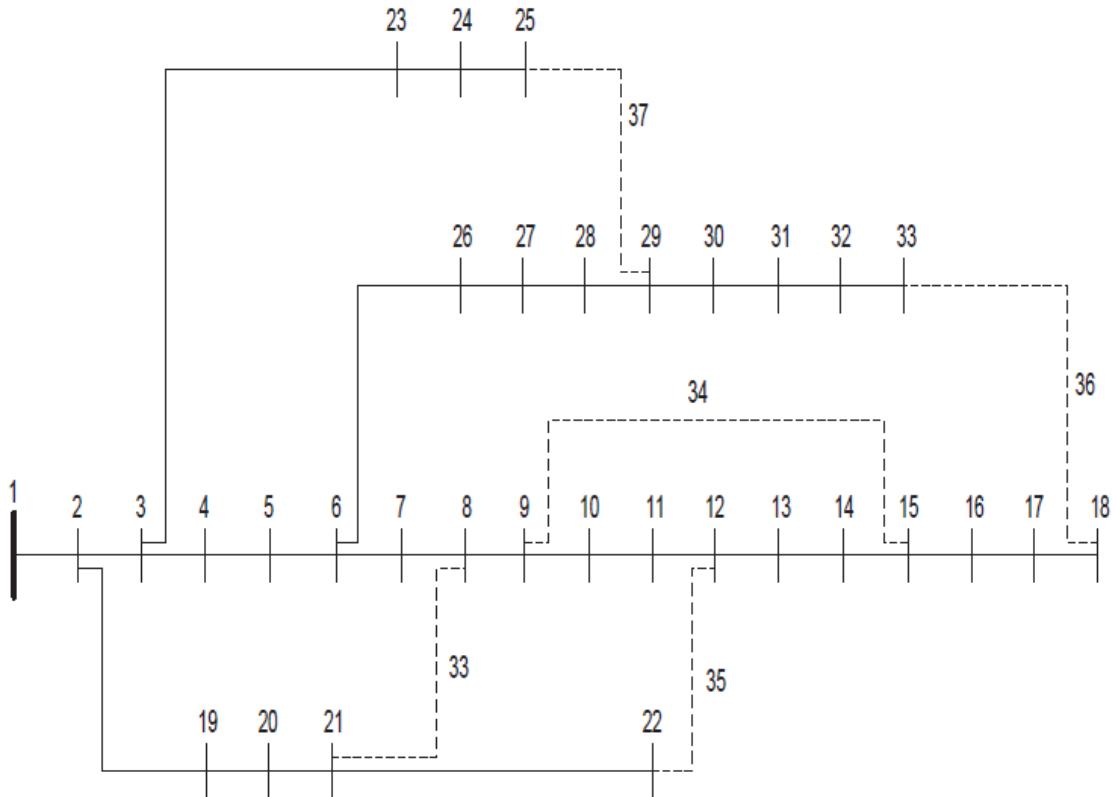


Figura 13: Sistema de 33 barras.

4.2. Sistema de 69 barras

O sistema de 69 barras, representado na Figura 14, obtido em s (CHIANG; JEAN-JUMEAU, 1990), possui os ramos s70, s71, s72, s73 e s74 de interconexão. Na Tabela 8 é mostrada a resposta do programa em comparação à dissertação (ZVIETCOVICH, 2006). Os dados referentes a este sistema encontram-se no Apêndice B.

Tabela 8: Resultado do sistema de 69 barras

Configuração	Chaves abertas	Perda (kW)
Inicial	s70 s71 s72 s73 s74	20.6826
2	s15 s59 s62 s70 s71	9.3408
3	s15 s56 s62 s70 s71	9.34076
4	s15 s58 s62 s70 s71	9.34076
5	s15 s57 s62 s70 s71	9.34077
6	s14 s59 s62 s70 s71	9.34932
7	s14 s56 s62 s70 s71	9.34932
Algoritmo proposto	s15 s56 s62 s70 s71	9.3408

Observa-se que neste caso o ponto encontrado não foi o mesmo encontrado pelo algoritmo comparado, porém observa-se que a diferença entre as

duas configurações é de 0.0004 kW, valor inferior ao critério de convergência do programa de fluxo de potência, portanto tal diferença pode ser desconsiderada.

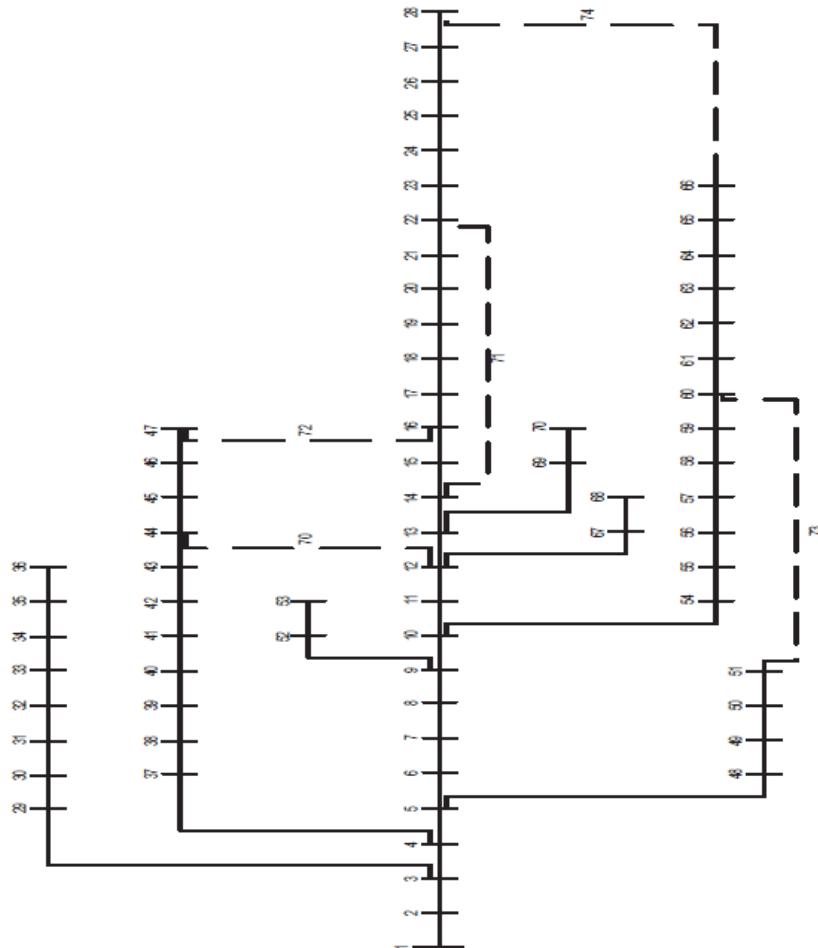


Figura 14: Sistema de 69 barras.

4.3. Sistema de 135 barras

O sistema de 135 barras, representado na Figura 15, um sistema real, possui os ramos s136, s137, s138, s139, s140, s141, s142, s143, s144, s145, s146, s147, s148, s149, s150, s151, s152, s153, s154, s155 e s156 de interconexão. Na Tabela 9 é mostrada a resposta do programa em comparação à dissertação (ZVIETCOVICH, 2006). Os dados referentes a este sistema encontram-se no Apêndice C.

Novamente a configuração obtida pela heurística proposta foi a mesma encontrada na literatura especializada, atingindo novamente o ponto dito como ótimo.

Tabela 9: Resultado do sistema de 135 barras

Configuração	Chaves abertas	Perda (kW)
Inicial	s136 s137 s138 s139 s140 s141 s142 s143 s144 s145 s146 s147 s148 s149 s150 s151 s152 s153 s154 s155 s156	320.276
2	s7 s35 s51 s90 s96 s106 s118 s126 s135 s137 s138 s141 s142 s144 s145 s146 s147 s148 s150 s151 s155	280.138
3	s7 s51 s53 s84 s90 s96 s106 s118 s126 s128 s137 s138 s139 s141 s144 s145 s147 s148 s150 s151 s156	280.166
4	s7 s38 s51 s53 s90 s96 s106 s118 s126 s137 s138 s141 s144 s145 s146 s147 s148 s150 s151 s155 s156	280.243
5	s7 s38 s51 s53 s84 s90 s96 s106 s118 s126 s128 s137 s138 s141 s144 s145 s147 s148 s150 s151 s156	280.281
6	s7 s49 s51 s53 s84 s90 s96 s106 s118 s126 s128 s137 s138 s139 s144 s145 s147 s148 s150 s151 s156	280.303
Algoritmo proposto	s7 s35 s51 s90 s96 s106 s118 s126 s135 s137 s138 s141 s142 s144 s145 s146 s147 s148 s150 s151 s155	280.138

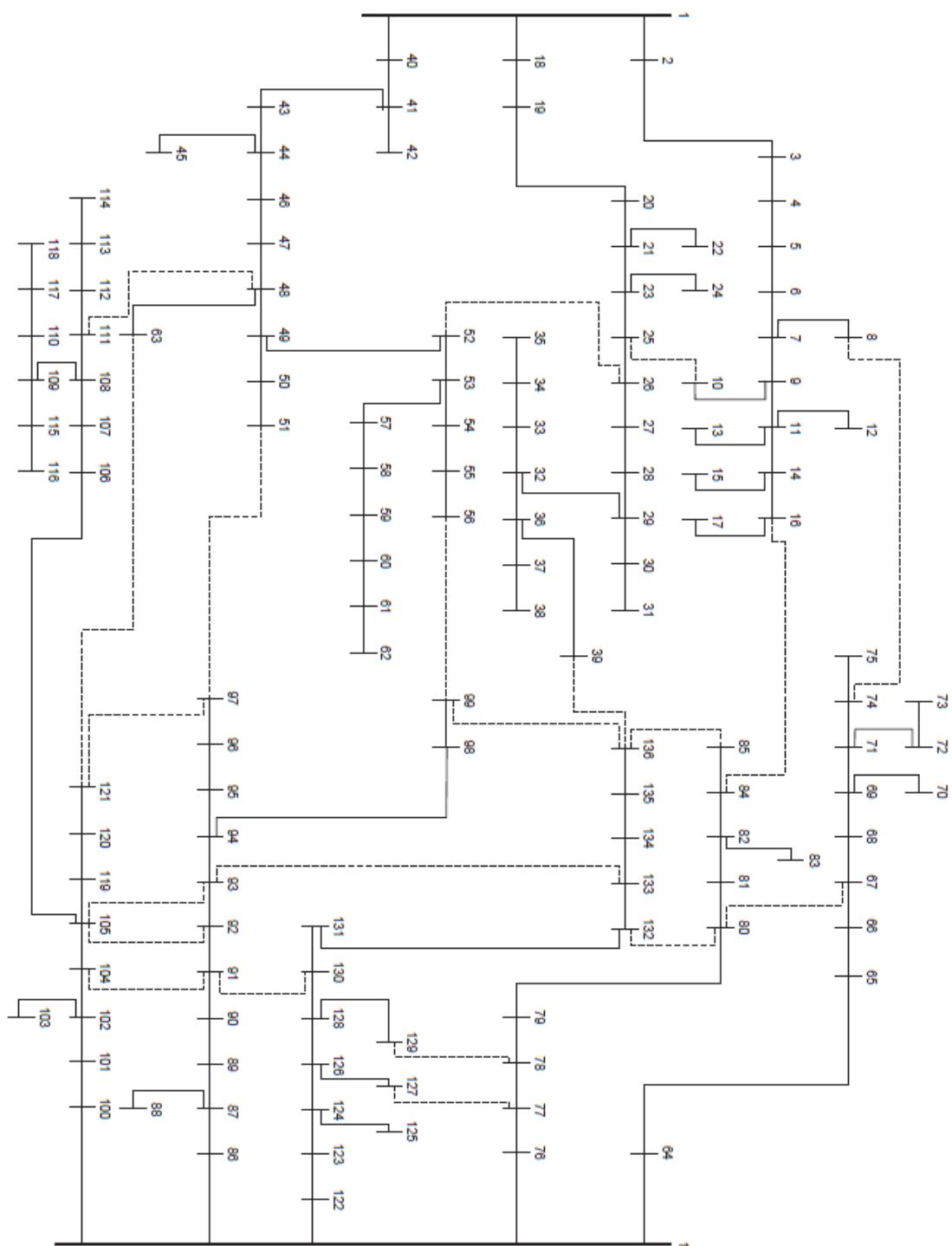


Figura 15: Sistema de 135 barras

4.4. Análise dos resultados

Verifica-se que nos três casos estudados o algoritmo proposto atingiu o ponto esperado, tendo em vista que o sistema de 69 barras apresentou erro menor que a tolerância do cálculo do fluxo de potência.

Para o sistema de 33 barras, o número máximo de solicitações do programa de fluxo de potência, utilizando a equação (37), é de 155 solicitações, para o sistema de 69 barras, o número máximo de solicitações do programa de fluxo de potência é de 335 solicitações e para o sistema de 135 barras, o número máximo de solicitações do programa de fluxo de potência é de 2625.

Considerando que o tempo médio de processamento do fluxo de carga para os três casos é, respectivamente, 0,0132 segundos, 0.0224 segundos e 0.386 segundos. A convergência do método de reconfiguração para os três casos é, respectivamente, 2.046 segundos, 7.504 segundos e 1013.25 segundos.

Devido à sua facilidade computacional, e a não dependência de uma resposta da outra, dentro da seleção da chave que deve ser aberta, tal método pode ser facilmente implementado em processadores com mais de um núcleo, o que acarretaria em diminuições bruscas no tempo de processamento, que não poderia mais ser calculado pela equação (38).

5. Conclusão

Como desejado, verificou-se que o sistema radial ótimo possui vínculo com o sistema original, malhado, uma vez que foi possível, por meio de uma heurística, encontrar resultados bastante satisfatórios quando comparados com os encontrados na literatura especializada e sem a necessidade de métodos clássicos de minimização.

Observa-se que o método proposto apresenta o tempo de processamento aumentado consideravelmente conforme o tamanho do sistema a ser estudado, isso ocorre, pois para a seleção da chave que deve ser aberta devem-se abrir todas as chaves do sistema, uma a uma, com isso conforme o maior número de chaves, maior o número de solicitações do programa de fluxo de potência.

Alem disso quanto maior o número de malhas presente no sistema, maior o número de chaves que devem ser aberta para transformar o sistema em radial, e consequentemente, maior o número de iterações que o software deve realizar.

Com isso, pode-se afirmar também que o método foi bastante eficaz para os testes estudados e demonstrou ser uma ferramenta de fácil implementação para a resolução de problemas de reconfiguração de rede.

Referências

- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 2, p. 1401–1407, 1989.
- BOUCHARD, D. et al. Applications of hopfield neural-networks to distribution feeder reconfiguration. *IEEE*, , n. , p. 311–316, 1993.
- CANOSSA, J. H. *Um Programa Interativo para Estudos de Fluxo de Potência*. Dissertação – UNESP 2007
- CARVALHO, M. R. (2005). *Estudo de Técnicas Eficientes Para a Resolução do Problema de Fluxo de Potência Para Sistemas de Distribuição Radial*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005
- CINVANLAR, S.; GRAINGER, J.; LEE, S. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988
- CHIANG, H. D.; JEAN-JUMEAU, R. Optimal network reconfigurations in distribution systems: Part 2: Solution algorithms and numerical results. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 3, p. 1568–1574, 1990.
- GUIMARÃES, M. A. N. *Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica utilizando algoritmos de Busca Tabu*. Dissertação – UNICAMP 2005
- GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 3, p. 1484–1491, 1992.
- KERSTING, W. H.; MENDICE, D. L.. “An Application of Ladder Network Theory to the Solution of Three-Phase Radial Load-Floe Problems.” *IEEE/PES 1976 Winter Meeting*, New York, NY, January 1976
- KIM, H.; KO, Y.; JUNG, K. H. Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 3, p. 1356–1366, 1993.
- LIU, C.; LEE, S.; VENKATA, S. An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 2, p. 619–626, 1988.

MERLIN; BACK, G. Search for a minimal - loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. In: Of the Fith Power System Conference. Cambridge: [s.n.], 1975. p. 1–18.

MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. 1. Ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1983

SHIRMOHAMMADI, D. A.; HONG, H. W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 2, p. 1492–1498, 1989.

SHIRMOHAMMADI, D. A. Compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 2, p. , 1988.

SOUZA, V. A.; (2006). *Resolução do Problema de Fluxo de Potência Ótimo Reativo Via Método da Função Lagrandiana Barreiro Modificada*. Tese (Doiutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006

ZVIETCOVICH, W. G. *Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando a Metaheurística Busca em Vizinhança Variável*. Dissertação – UNESP 2006

Apêndice

A – Sistema de 33 barras

Potência ativa e reativa referente à barra “Para”.

Ramo	De	Para	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Potência Ativa [MW]	Potência Reativa [MVAr]
s1	1	2	0,0922	0,0470	100	60
s2	2	3	0,4939	0,2511	90	40
s3	3	4	0,3660	0,1864	120	80
s4	4	5	0,3811	0,1941	60	30
s5	5	6	0,8190	0,7070	60	20
s6	6	7	0,1872	0,6188	200	100
s7	7	8	0,7114	0,2351	200	100
s8	8	9	1,0300	0,7400	60	20
s9	9	10	1,0440	0,7400	60	20
s10	10	11	0,1966	0,0650	45	30
s11	11	12	0,3744	0,1238	60	35
s12	12	13	1,4680	1,1550	60	35
s13	13	14	0,5416	0,7129	120	80
s14	14	15	0,5910	0,5260	60	10
s15	15	16	0,7463	0,5450	60	20
s16	16	17	1,2890	1,7210	60	20
s17	17	18	0,7320	0,5450	90	40
s18	2	19	0,1640	0,1565	90	40
s19	19	20	1,5042	1,3554	90	40
s20	20	21	0,4095	0,4784	90	40
s21	21	22	0,7089	0,9373	90	40
s22	3	23	0,4512	0,3083	90	50
s23	23	24	0,8980	0,7091	420	200
s24	24	25	0,8960	0,7011	420	200
s25	6	26	0,2030	0,1034	60	25
s26	26	27	0,2842	0,1447	60	25
s27	27	28	1,0590	0,9337	60	20

Continua

Ramo	De	Para	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Potência Ativa [MW]	Potência Reativa [MVAr]
s28	28	29	0,8042	0,7006	120	70
s29	29	30	0,5075	0,2585	200	600
s30	30	31	0,9744	0,9630	150	70
s31	31	32	0,3105	0,3619	210	100
s32	32	33	0,3410	0,5301	60	40
s33	8	21	2,0000	2,0000		
s34	9	15	2,0000	2,0000		
s35	12	22	2,0000	2,0000		
s36	18	33	0,5000	0,5000		
s37	25	29	0,5000	0,5000		

B – Sistema de 69 barras

Potência ativa e reativa referente à barra “Para”.

Ramo	De	Para	Resistência	Reatância	Potência	Potência
			[Ω]	[Ω]	Ativa [MW]	Reativa [MVAr]
s1	1	2	0,0005	0,0012	0,000	0,000
s2	2	3	0,0005	0,0012	0,000	0,000
s3	3	4	0,0000	0,0000	0,000	0,000
s4	4	5	0,0015	0,0036	0,000	0,000
s5	5	6	0,0251	0,0294	0,000	0,000
s6	6	7	0,3660	0,1864	0,878	0,720
s7	7	8	0,3811	0,1941	13,455	0,720
s8	8	9	0,0922	0,0470	24,887	17,810
s9	9	10	0,0493	0,0251	10,000	7,208
s10	10	11	0,8190	0,2707	9,333	6,666
s11	11	12	0,1872	0,0619	48,500	34,609
s12	12	13	0,7114	0,2351	48,500	34,609
s13	13	14	1,0300	0,3400	2,710	1,821
s14	14	15	1,0440	0,3450	2,710	1,521
s15	15	16	1,0580	0,3496	0,000	0,000
s16	16	17	0,1966	0,0650	15,176	10,198
s17	17	18	0,3744	0,1238	16,500	11,775
s18	18	19	0,0047	0,0016	16,500	11,775
s19	19	20	0,3276	0,1083	0,000	0,000
s20	20	21	0,2106	0,0696	0,316	0,212
s21	21	22	0,3416	0,1129	37,983	27,100
s22	22	23	0,0140	0,0046	1,762	1,184
s23	23	24	0,1591	0,0526	0,000	0,000
s24	24	25	0,3463	0,1145	9,390	6,670
s25	25	26	0,7488	0,2475	0,000	0,000
s26	26	27	0,3089	0,1021	4,667	3,330
s27	27	28	0,1732	0,0572	4,667	3,330
s28	3	29	0,0044	0,0108	8,667	6,185
s29	29	30	0,0640	0,1565	8,667	6,185
s30	30	31	0,3978	0,1315	0,000	0,000

Continua

Ramo	De	Para	Resistência	Reatância	Potência	Potência
			[Ω]	[Ω]	Ativa [MW]	Reativa [MVar]
s31	31	32	0,0702	0,0232	0,000	0,000
s32	32	33	0,3510	0,1160	0,000	0,000
s33	33	34	0,8390	0,2816	4,582	3,260
s34	34	35	1,7080	0,5646	6,501	5,549
s35	35	36	1,4740	0,4873	1,920	1,290
s36	4	37	0,0044	0,0108	8,667	6,185
s37	37	38	0,0640	0,1565	8,667	6,185
s38	38	39	0,1053	0,1230	0,000	0,000
s39	39	40	0,0304	0,0355	8,000	5,709
s40	40	41	0,0018	0,0021	8,000	5,709
s41	41	42	0,7283	0,8509	0,392	0,325
s42	42	43	0,3100	0,3623	0,000	0,000
s43	43	44	0,0410	0,0478	2,000	1,427
s44	44	45	0,0092	0,0116	0,000	0,000
s45	45	46	0,1089	0,1373	3,076	8,787
s46	46	47	0,0009	0,0012	3,076	8,787
s47	5	48	0,0034	0,0084	0,000	0,000
s48	48	49	0,0851	0,2083	26,350	18,800
s49	49	50	0,2898	0,7091	28,226	91,492
s50	50	51	0,0822	0,2011	128,226	91,492
s51	9	52	0,0928	0,0473	13,512	9,442
s52	52	53	0,3319	0,1114	1,202	0,894
s53	10	54	0,1740	0,0886	1,449	1,162
s54	54	55	0,2030	0,1034	8,787	6,322
s55	55	56	0,2842	0,1447	8,000	7,708
s56	56	57	0,2813	0,1433	0,000	0,000
s57	57	58	1,5900	0,5337	0,000	0,000
s58	58	59	0,7837	0,2630	0,000	0,000
s59	59	60	0,3042	0,1006	0,667	24,025
s60	60	61	0,3861	0,1172	0,000	0,000
s61	61	62	0,5075	0,2555	414,667	295,910
s62	62	63	0,9740	0,0496	10,667	7,612

Ramo	De	Para	Resistência	Reatância	Potência	Potência
			[Ω]	[Ω]	Ativa [MW]	Reativa [MVAr]
s63	63	64	0,1450	0,0738	0,000	0,000
s64	64	65	0,7105	0,3619	75,670	53,873
s65	65	66	1,0410	0,5302	19,670	13,912
s66	12	67	0,2012	0,0611	6,000	4,282
s67	67	68	0,0047	0,0017	6,000	4,282
s68	13	69	0,7394	0,2444	9,333	6,660
s69	69	70	0,0047	0,0016	9,333	6,660
s70	12	44	0,5000	0,5000		
s71	14	22	0,5000	0,5000		
s72	16	47	1,0000	1,0000		
s73	51	60	2,0000	2,0000		
s74	28	66	1,0000	1,0000		

C – Sistema de 135 arras

Potência ativa e reativa referente à barra “Para”.

Ramo	De	Para	Resistência	Reatância	Potência	Potência
			[Ω]	[Ω]	Ativa [MW]	Reativa [MVar]
s1	1	2	0,33205	0,76653	0,000	0,000
s2	2	3	0,00188	0,00433	47,780	19,009
s3	3	4	0,22340	0,51535	42,551	16,929
s4	4	5	0,09943	0,22953	87,022	34,622
s5	5	6	0,15571	0,35945	311,310	123,855
s6	6	7	0,16321	0,37677	148,869	59,228
s7	7	8	0,11444	0,26417	238,672	94,956
s8	7	9	0,05675	0,05666	62,299	24,786
s9	9	10	0,52124	0,27418	124,598	49,571
s10	9	11	0,10877	0,10860	140,175	55,768
s11	11	12	0,39803	0,20937	116,813	46,474
s12	11	13	0,91744	0,31469	249,203	99,145
s13	11	14	0,11823	0,11805	291,447	115,592
s14	14	15	0,50228	0,26421	303,720	120,835
s15	14	16	0,05675	0,05666	215,396	85,695
s16	16	17	0,23379	0,15454	198,586	79,007
s17	1	18	0,33205	0,76653	0,000	0,000
s18	18	19	0,00188	0,00433	0,000	0,000
s19	19	20	0,22324	0,51535	0,000	0,000
s20	20	21	0,10881	0,25118	30,127	14,729
s21	21	22	0,71078	0,37388	230,972	112,920
s22	21	23	0,18197	0,42008	60,256	29,459
s23	23	24	0,30326	0,15952	230,972	112,920
s24	23	25	0,02439	0,05630	120,507	58,915
s25	25	26	0,04502	0,10394	0,000	0,000
s26	26	27	0,01876	0,04331	56,981	27,857
s27	27	28	0,11823	0,11230	364,665	178,281
s28	28	29	0,02365	0,02361	0,000	0,000
s29	29	30	0,18954	0,09970	124,647	60,939
s30	30	31	0,39803	0,20937	56,981	27,857

Ramo	De	Para	Resistência	Reatância	Potência	Potência
			[Ω]	[Ω]	Ativa [MW]	Reativa [MVar]
s31	29	32	0,05675	0,05666	0,000	0,000
s32	32	33	0,09477	0,04985	85,473	41,787
s33	33	34	0,41699	0,21934	0,000	0,000
s34	34	35	0,11372	0,05982	396,735	193,960
s35	32	36	0,07566	0,07555	0,000	0,000
s36	36	37	0,36960	0,19442	181,152	88,563
s37	37	38	0,26536	0,13958	242,172	118,395
s38	36	39	0,05675	0,05660	75,316	36,821
s39	1	40	0,33205	0,76653	0,000	0,000
s40	40	41	0,11819	0,27283	1,254	0,531
s41	41	42	2,96288	1,01628	6,274	2,660
s42	41	43	0,00188	0,00433	0,000	0,000
s43	43	44	0,06941	0,16024	117,880	49,971
s44	44	45	0,81502	0,42872	62,668	25,556
s45	44	46	0,06378	0,14724	172,285	73,034
s46	46	47	0,13132	0,30315	458,556	194,388
s47	47	48	0,06191	0,14291	262,962	111,473
s48	48	49	0,11444	0,26417	235,761	99,942
s49	49	50	0,28374	0,28331	0,000	0,000
s50	50	51	0,28374	0,28321	109,215	46,298
s51	49	52	0,04502	0,10394	0,000	0,000
s52	52	53	0,02626	0,06063	72,809	30,865
s53	53	54	0,06003	0,13858	258,473	109,570
s54	54	55	0,03002	0,06929	69,169	29,322
s55	55	56	0,02064	0,04764	21,843	9,260
s56	53	57	0,10881	0,25118	0,000	0,000
s57	57	58	0,25588	0,13460	20,527	8,702
s58	58	59	0,41699	0,21934	150,548	63,819
s59	59	60	0,50228	0,26421	220,687	93,552
s60	60	61	0,33170	0,17448	92,384	39,163
s61	61	62	0,20849	0,10967	0,000	0,000
s62	48	63	0,13882	0,32047	226,693	96,098

Ramo	De	Para	Resistência	Reatância	Potência	Potência
			[Ω]	[Ω]	Ativa [MW]	Reativa [MVar]
s63	1	64	0,00750	0,01732	0,000	0,000
s64	64	65	0,27014	0,62362	294,016	116,974
s65	65	66	0,38270	0,88346	83,015	33,028
s66	66	67	0,33018	0,76220	83,015	33,028
s67	67	68	0,32830	0,75787	103,770	41,285
s68	68	69	0,17072	0,39409	176,408	70,184
s69	69	70	0,55914	0,29412	83,015	33,028
s70	69	71	0,05816	0,13425	217,917	86,698
s71	71	72	0,70130	0,36890	23,294	9,267
s72	72	73	1,02352	0,53839	5,075	2,019
s73	71	74	0,06754	0,15591	72,638	28,899
s74	74	75	1,32352	0,45397	405,990	161,523
s75	1	76	0,01126	0,02598	0,000	0,000
s76	76	77	0,72976	1,68464	100,182	42,468
s77	77	78	0,22512	0,51968	142,523	60,417
s78	78	79	0,20824	0,48071	96,042	40,713
s79	79	80	0,04690	0,10827	300,454	127,366
s80	80	81	0,61950	0,61857	141,238	59,873
s81	81	82	0,34049	0,33998	279,847	118,631
s82	82	83	0,56962	0,29911	87,312	37,013
s82	82	84	0,10877	0,10860	243,849	103,371
s84	84	85	0,56862	0,29911	247,750	105,025
s85	1	86	0,01126	0,02598	0,000	0,000
s86	86	87	0,41835	0,96575	89,878	38,101
s87	87	88	0,10499	0,13641	1137,280	482,108
s88	87	89	0,43898	1,01338	458,339	194,296
s89	89	90	0,07520	0,02579	385,197	163,290
s90	90	91	0,07692	0,17756	0,000	0,000
s91	91	92	0,33205	0,76653	79,608	33,747
s92	92	93	0,08442	0,19488	87,312	37,013
s93	93	94	0,13320	0,30748	0,000	0,000
s94	94	95	0,29320	0,29276	74,001	31,370

Ramo	De	Para	Resistência	Reatância	Potência	Potência
			[Ω]	[Ω]	Ativa [MW]	Reativa [MVar]
s95	95	96	0,21753	0,21721	232,050	98,369
s96	96	97	0,26482	0,26443	141,819	60,119
s97	94	98	0,10318	0,23819	0,000	0,000
s98	98	99	0,13507	0,31181	76,449	32,408
s99	1	100	0,00938	0,02165	0,000	0,000
s100	100	101	0,16884	0,38976	51,322	21,756
s101	101	102	0,11819	0,27283	59,874	25,381
s102	102	103	2,28608	0,78414	9,065	3,843
s103	102	104	0,45587	1,05236	2,092	0,887
s104	104	105	0,69600	1,60669	16,254	0,531
s105	105	106	0,45774	1,05669	1506,522	638,634
s106	106	107	0,20298	0,26373	313,023	132,694
s107	107	108	0,21348	0,27737	79,831	33,842
s108	108	109	0,54967	0,28914	51,322	21,756
s109	109	110	0,54019	0,28415	0,000	0,000
s110	108	111	0,04550	0,05911	202,435	85,815
s111	111	112	0,47385	0,24926	60,823	25,874
s112	112	113	0,86241	0,45364	45,618	19,338
s113	113	114	0,56862	0,29911	0,000	0,000
s114	109	115	0,77711	0,40878	157,070	66,584
s115	115	116	1,08038	0,56830	0,000	0,000
s116	110	117	1,06633	0,57827	250,148	106,041
s117	117	118	0,47385	0,24926	0,000	0,000
s118	105	119	0,32267	0,74488	68,809	28,593
s119	119	120	0,14633	0,33779	32,072	13,596
s120	120	121	0,12382	0,28583	61,084	25,894
s121	1	122	0,01126	0,02598	0,000	0,000
s122	122	123	0,64910	1,49842	94,622	46,260
s123	123	124	0,04502	0,10394	49,858	24,375
s124	124	125	0,52640	0,18056	123,164	60,214
s125	124	126	0,02064	0,04764	78,350	38,304
s126	126	127	0,53071	0,27917	145,475	71,121

Ramo	De	Para	Resistência	Reatância	Potência	Potência
			[Ω]	[Ω]	Ativa [MW]	Reativa [MVAr]
s127	126	128	0,09755	0,22520	21,369	10,447
s128	128	129	0,11819	0,27283	74,789	36,564
s129	128	130	0,13882	0,32047	227,926	111,431
s130	130	131	0,04315	0,09961	35,614	17,411
s131	131	132	0,09192	0,21220	249,295	121,877
s132	132	133	0,16134	0,37244	316,722	154,842
s133	133	134	0,37832	0,37775	333,817	163,199
s134	134	135	0,39724	0,39664	249,295	121,877
s135	135	136	0,29276	0,29276	0,000	0,000
s136	8	74	0,13132	0,30315		
s137	10	25	0,26536	0,13958		
s138	16	84	0,14187	0,14166		
s139	39	136	0,08512	0,08499		
s140	26	52	0,04550	0,10394		
s141	51	97	0,14187	0,14166		
s142	56	99	0,14187	0,14166		
s143	63	121	0,03940	0,09094		
s144	67	80	0,12944	0,29882		
s145	80	132	0,01688	0,03898		
s146	85	136	0,33170	0,17448		
s147	92	105	0,14187	0,17166		
s148	91	130	0,07692	0,17756		
s149	91	104	0,07692	0,17756		
s150	93	105	0,07692	0,17756		
s151	93	133	0,07692	0,17756		
s152	97	121	0,26482	0,26443		
s153	111	18	0,49696	0,64670		
s154	127	77	0,17059	0,08973		
s155	129	78	0,05253	0,12126		
s156	136	99	0,29320	0,29276		