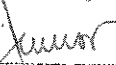


defendida por	Jorge F.C. Lorenzetti
e aprovada pela Comissão	
fulgada em	13 / 10 / 2004
	
	Orientador



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica

Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para a Melhoria das Condições de Operação com Relação à Estabilidade de Tensão

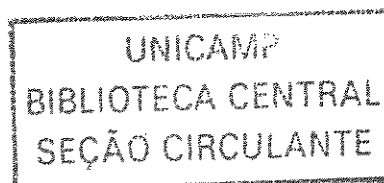
Autor: Jorge Fernando Canato Lorenzetti
Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Júnior

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Luiz Morelato França	FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Junior	FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Carlos César Barioni de Oliveira	PEA/USP
Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro	FEIS/UNESP

Campinas, outubro de 2004.



UNIDADE	Bc
Nº CHAMADA	T/UNICAMP
	L887r
V	EX
TO	62074
PROC.	16-P. 0086-05
C	☐
PREÇO	11,00
DATA	10/02/05
Nº CPD	

12ib. id. 337609

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

L887r

Lorenzetti, Jorge Fernando Canato

Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica para a melhoria das condições de operação com relação à estabilidade de tensão / Jorge Fernando Canato Lorenzetti. --Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Carlos Alberto de Castro Júnior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Energia elétrica - Distribuição. 2. Sistemas de energia elétrica - Estabilidade. I. Castro Júnior, Carlos Alberto de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Resumo

Neste trabalho apresentamos um método heurístico para a reconfiguração de redes de distribuição visando a melhoria das suas condições de estabilidade de tensão, ou seja, aumentar sua margem de estabilidade de tensão. A reconfiguração é realizada alterando a topologia da rede através da abertura/fechamento das chaves de interconexão com base na análise de um índice de estabilidade de tensão, mantendo sempre a característica radial das redes de distribuição. Utilizamos um método aproximado, rápido e de precisão satisfatória para estimarmos os valores dos índices pós-reconfiguração. Graças ao pequeno esforço computacional que o método como um todo demanda, pode-se admitir a sua utilização em tempo real. Verificamos ainda o impacto da inserção da geração independente, com ou sem controle de tensão, dentro da metodologia desenvolvida.

Abstract

In this work, we present an heuristic method for the reconfiguration of distribution networks for enhancing their voltage stability conditions, that is, for increasing its voltage stability margin. The reconfiguration is carried out by modifying the network topology through the opening/closing of interconnection switches, based on information from voltage stability indices. The radial topology is maintained throughout the reconfiguration process. A fast method is used to estimate the indices, after a switching operation is performed. The method can be used in real time since it requires little computational effort. The impact of inserting independent generation, with or without voltage control, is evaluated within the framework of the developed methodology.

200504665

Agradecimentos

- Ao professor Carlos Alberto de Castro Júnior que me orientou desde os trabalhos de iniciação científica, sempre muito prestativo e atencioso, cuja disciplina e dedicação ao seu trabalho são inspirações ao meu.
- Aos professores Ariovaldo Garcia, Carlos Castro, Carlos Murari, Luiz Pereira e Fujio Sato, não apenas pelos ensinamentos técnicos mas também e principalmente pela maneira compreensiva e paciente com que esses ensinamentos eram passados.
- À Edna Servidone por ser sempre tão prestativa e aos demais funcionários que mantêm o bom funcionamento do departamento.
- A todos os colegas do DSEE que sempre me ajudaram e que mantêm um ambiente de trabalho fraterno dentro do laboratório, em especial ao colega Marcos Guimarães pela significativa contribuição ao desempenho e aprimoramento do meu trabalho.
- À toda minha família e à Ellen pelo constante apoio e incentivo.
- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP - pelo apoio financeiro.

Dedico este trabalho aos meus pais Fernanda e Jorge
e aos meus irmãos Natália, Bruno e Nathan.

Sumário

1	Introdução	1
2	Estabilidade de tensão	3
2.1	Conceitos, classificação e análise	3
2.2	Índices de proximidade ao colapso de tensão	6
2.3	O índice de estabilidade TPSI	6
2.4	Comportamento do índice TPSI	9
3	Cálculo de fluxo de carga para redes de distribuição	14
3.1	O método <i>back-and-forward sweep</i>	14
3.2	Consideração de barras de geração (PV)	16
3.3	Método aproximado	18
3.3.1	Aspectos teóricos	19
3.3.2	Resultados	20
4	Reconfiguração de sistemas de distribuição	23
4.1	Introdução	23
4.2	Método de reconfiguração proposto	25
4.3	Exemplo	27
5	Resultados	38
5.1	Rede de 16 barras	38
5.2	Rede de 33 barras	40
5.3	Rede de 70 barras	41

5.4	Rede de 136 barras	43
5.5	Rede de 202 barras	45
5.6	Redes carregadas	46
5.6.1	Rede de 70 barras	47
5.6.2	Rede de 136 barras	48
6	Impacto da geração distribuída	52
6.1	Geração distribuída	52
6.2	Inserção de geradores sem controle de tensão	54
6.2.1	Rede de 33 barras	54
6.2.2	Rede de 202 barras	57
6.3	Inserção de geradores com controle de tensão	58
6.3.1	Rede de 16 barras	58
7	Tensões nas barras e índice TPSI	67
8	Conclusão	70
A	Dados das redes testadas	71
A.1	Sistema de 16 barras	71
A.2	Sistema de 33 barras	72
A.3	Sistema de 70 barras	74
A.4	Sistema de 136 barras	76
A.5	Sistema de 202 barras	81
	Referências Bibliográficas	87

Lista de Figuras

2.1	Curva P-V.	4
2.2	Curva Q-V.	5
2.3	Diagrama fasorial para um sistema de 2 barras.	7
2.4	Caminho de transmissão.	8
2.5	Projeções de tensões ao longo do caminho de transmissão.	8
2.6	Valores dos índices em função do carregamento.	11
2.7	Valores dos índices em função do carregamento.	13
3.1	Numeração das camadas de um sistema radial de distribuição.	14
3.2	Passo <i>backward sweep</i>	15
3.3	Algoritmo utilizado considerando a presença de nós PV.	18
4.1	Configuração inicial da rede de 16 barras.	24
4.2	Configuração da rede de 16 barras após reconfiguração.	24
4.3	Sistema de 16 barras abrindo linha 09-11 e fechando linha 05-11.	29
4.4	Sistema de 16 barras abrindo linha 08-10 e fechando linha 14-10.	30
4.5	Sistema de 16 barras abrindo linha 02-08 e fechando linha 14-10.	31
4.6	Sistema de 16 barras abrindo linha 06-07 e fechando linha 16-07.	32
4.7	Sistema de 16 barras abrindo linha 04-05 e fechando linha 11-05.	33
4.8	Sistema de 16 barras abrindo linha 15-16 e fechando linha 07-16.	34
4.9	Sistema de 16 barras abrindo linha 13-14 e fechando linha 10-14.	35
4.10	Sistema de 16 barras abrindo linha 03-13 e fechando linha 10-14.	36
5.1	Tensões nos barramentos para a rede de 16 barras.	39

5.2	Configuração final para a rede de 16 barras.	40
5.3	Tensões nos barramentos para a rede de 33 barras.	41
5.4	Tensões nos barramentos para a rede de 70 barras.	42
5.5	Tensões nos barramentos para a rede de 136 barras.	44
5.6	Tensões nos barramentos para a rede de 202 barras.	46
5.7	Variação do TPSI com o carregamento para a rede de 70 barras (configuração inicial). 47	
5.8	Variação do TPSI com o carregamento para a rede de 136 barras para as barras terminais 116 e 119 (configuração 05 da Tabela 5.4)	50
5.9	Variação do TPSI com o carregamento para a rede de 70 barras (configuração 04 da Tabela 5.3).	51
6.1	TPSI para a rede de 33 barras com a configuração inicial da Tabela 6.2.	56
6.2	Máximo fator de carregamento em função da potência ativa gerada e da localização dos geradores para a rede de 16 barras.	59
6.3	Máximo fator de carregamento em função do limite de geração de reativos do gerador para a rede de 16 barras.	59
6.4	TPSI para a rede de 16 barras.	60
6.5	Potência reativa injetada na barra 12 pelo gerador em função do carregamento. . . .	61
6.6	Tensão na barra 12 em função do carregamento.	61
6.7	TPSI para a rede de 16 barras.	62
6.8	TPSI para a rede de 16 barras.	62
6.9	TPSI para a rede de 16 barras (configuração inicial, Tabela 6.6).	65
6.10	TPSI para a rede de 16 barras (configuração final, Tabela 6.6).	65
6.11	TPSI para a rede de 16 barras (configuração final, Tabela 6.7).	66
7.1	Tensões nas barras terminais para a rede de 16 barras.	68
7.2	Tensões nas barras terminais para a rede de 16 barras.	68
A.1	Sistema de 16 barras.	71
A.2	Sistema de 33 barras	72
A.3	Sistema de 70 barras	74
A.4	Sistema de 136 barras.	76
A.5	Sistema de 202 barras.	81

Lista de Tabelas

2.1	Estado da rede de 16 barras.	10
2.2	Índices TPSI para o sistema de 16 barras.	10
2.3	Estado da rede de 16 barras para $\lambda = \lambda^{max} = 6,257$	12
2.4	Índices TPSI para o sistema de 16 barras para $\lambda = \lambda^{max} = 6,257$	12
3.1	Fechando linha 15 e abrindo linha 7 para a rede de 16 barras.	21
3.2	Fechando linha 14 e abrindo linha 6 para a rede de 16 barras.	22
4.1	Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 09-11 e fechando linha 05-11.	28
4.2	Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 08-09 e fechando linha 05-11.	29
4.3	Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 08-10 e fechando linha 14-10.	30
4.4	Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 02-08 e fechando linha 14-10.	31
4.5	Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 06-07 e fechando linha 16-07.	33
4.6	Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 04-05 e fechando linha 11-05.	34
4.7	Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 15-16 e fechando linha 07-16.	35
4.8	Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 13-14 e fechando linha 10-14.	36
4.9	Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 03-13 e fechando linha 10-14.	36

5.1	Resultados para a rede de 16 barras.	39
5.2	Resultados para a rede de 33 barras.	40
5.3	Resultados para a rede de 70 barras.	42
5.4	Resultados para a rede de 136 barras.	43
5.5	Resultados para a rede de 136 barras utilizando o fluxo de carga exato em todas as análises.	45
5.6	Resultados para a rede de 202 barras.	46
5.7	Resultados para a rede carregada ($\lambda = 9,4$) de 70 barras.	48
5.8	Resultados para a rede carregada ($\lambda = 3,5$) de 136 barras.	48
5.9	Resultados para a rede carregada ($\lambda = 6,3$) de 136 barras partindo da configuração final dada pelo caso base.	49
6.1	Resultados para a rede de 33 barras.	54
6.2	Resultados para a rede de 33 barras.	55
6.3	Resultados para a rede de 33 barras.	57
6.4	Resultados para a rede de 202 barras.	57
6.5	Resultados para a rede de 16 barras.	63
6.6	Resultados para a rede de 16 barras.	63
6.7	Resultados para a rede de 16 barras.	64
7.1	Tempo computacional.	69
A.1	Dados do sistema de 16 barras	72
A.2	Dados do sistema de 33 barras	73
A.3	Dados do sistema de 70 barras	74
A.4	Continuação - Dados do sistema de 70 barras	75
A.5	Dados do sistema de 136 barras	77
A.6	Continuação - Dados do sistema de 136 barras	78
A.7	Continuação - Dados do sistema de 136 barras	79
A.8	Continuação - Dados do sistema de 136 barras	80
A.9	Dados Sistema de 202 barras	82
A.10	Continuação - Dados Sistema de 202 barras	83

A.11 Continuação - Dados Sistema de 202 barras	84
A.12 Continuação - Dados Sistema de 202 barras	85
A.13 Continuação - Dados Sistema de 202 barras	86

Capítulo 1

Introdução

Dentre todos os componentes de um sistema elétrico de potência, o sistema de distribuição tradicionalmente tem sido caracterizado como o componente menos glamouroso. Na última metade do século XX o projeto e a operação da geração e da transmissão de energia elétrica apresentaram muitos desafios para engenheiros e pesquisadores. As usinas tornaram-se cada vez maiores. Linhas de transmissão atravessam países formando enormes redes interligadas. A operação dessas grandes redes exigiu o desenvolvimento de novas técnicas de análise e de operação. Enquanto isso, o sistema de distribuição continuou a entregar potência com pouca ou nenhuma análise. Sendo assim, os sistemas de distribuição eram tipicamente superdimensionados [1].

Os tempos mudaram. Atualmente as redes de distribuição são constantemente submetidas a um aumento contínuo da demanda de carga fazendo com que o sistema de distribuição possa vir a operar em sua máxima capacidade [1, 2].

Em certas áreas industriais tem-se observado a ocorrência de condições críticas de carga, em que o sistema de distribuição atingiu o colapso de tensão. Casos foram relatados em que o colapso de tensão ocorre com frequência e são necessárias compensações de reativos no sistema para evitá-lo [2].

O grande desenvolvimento da eletrônica e das tecnologias de telecomunicações trouxeram um grande avanço na área de automação dos sistemas de distribuição. É nesse contexto que a reconfiguração de sistemas de distribuição para a melhoria das condições de estabilidade de tensão em tempo real pode ser uma importante ferramenta para aumentarmos a segurança da distribuição de energia principalmente em momentos de alta demanda do sistema.

A reconfiguração consiste na abertura/fechamento de chaves de interconexão, alterando a topologia da rede e pode ser usada como ferramenta de planejamento e/ou controle em tempo real da operação. Podemos encontrar na literatura muitos trabalhos sobre reconfiguração de redes para a minimização de perdas e balanceamento de carga entre alimentadores, como por exemplo em [3], porém, pouco se fala sobre reconfiguração para a melhoria da margem de estabilidade de tensão. Em [4] é proposto um método que analisa todas as combinações possíveis entre os estados das chaves de interconexão (aberta ou fechada) e em caso de linha fechada, verifica qual das linhas vizinhas deve ser aberta, de forma a manter a radialidade do sistema e minimizar determinado índice de estabilidade. Mais recentemente, foi proposto em [5] um método para encontrar a reconfiguração

ótima de sistemas de distribuição radial para maximizar o carregamento da rede utilizando lógica *fuzzy*. Neste trabalho apresentamos um método heurístico para a reconfiguração de sistemas de distribuição visando melhorar suas condições de estabilidade de tensão, ou seja, aumentar sua margem de segurança ao colapso de tensão. A eficácia das operações de chaveamento é avaliada através do cálculo do índice de estabilidade proposto em [6]. Utilizamos um método aproximado para a obtenção do estado da rede na análise de todas as configurações candidatas e o método de fluxo de carga *back-and-forward sweep* [7] para a atualização do estado após a realização da melhor reconfiguração encontrada em cada busca pelo método aproximado, garantindo uma rapidez e uma precisão necessárias para que se possa utilizar o método proposto na operação em tempo real, embora as atuais restrições operacionais, técnicas e econômicas tornam mais apropriado a aplicabilidade do método no planejamento da operação do que na operação em tempo real.

Realizamos também uma avaliação inicial do impacto da inserção dos geradores independentes sobre a margem de segurança de redes de distribuição com relação à estabilidade de tensão. Procuramos também avaliar o desempenho do método de reconfiguração proposto na presença de geradores independentes.

Nos primeiros capítulos descrevemos o método *back-and-forward sweep*, o cálculo do índice de estabilidade utilizado e o método aproximado baseado no modelo linear da rede. Mostramos também alguns conceitos que envolvem sistemas de distribuição, estabilidade de tensão, reconfiguração de redes e geração distribuída. No capítulo 4 detalhamos a metodologia de reconfiguração desenvolvida e os resultados da aplicação da mesma são mostrados no capítulo 5. Os resultados de alguns testes realizados com a inserção da geração independente são encontrados no capítulo 6. No último capítulo fazemos ainda uma comparação entre o índice de estabilidade de tensão utilizado e o valor da magnitude das tensões dentro da metodologia de reconfiguração.

Capítulo 2

Estabilidade de tensão

2.1 Conceitos, classificação e análise

Podemos definir a estabilidade de um sistema elétrico de potência como a capacidade que o sistema tem de permanecer no estado de equilíbrio sob condições de operação normal e a capacidade que o mesmo tem de recuperar-se para um estado de equilíbrio aceitável após certa contingência.

Um sistema elétrico é planejado para continuar operando de maneira estável na ocorrência de um conjunto seletivo de contingências. Podemos classificar a estabilidade do sistema de acordo com a natureza da instabilidade e o tipo do distúrbio. Na literatura podemos encontrar os seguintes tipos de estabilidade:

- Estabilidade de ângulo: corresponde à capacidade do sistema de manter os geradores em sincronismo após a ocorrência de perturbações na rede e é influenciada pelas dinâmicas dos ângulos do rotor do gerador e relações de potência-ângulo. É usualmente caracterizada em: estabilidade de pequenos sinais, quando o distúrbio é pequeno e as equações que descrevem a resposta resultante do sistema podem ser linearizadas; e estabilidade transitória, quando ocorre grande distúrbio e as respostas para esses envolvem grandes excursões dos ângulos do rotor do gerador, não sendo possível linearizar as equações que representam o sistema.
- Estabilidade de tensão: corresponde à capacidade do sistema de manter as tensões aceitáveis nos barramentos em condições normais de operação, e também após a ocorrência de uma perturbação, seja ela decorrente de um aumento de carga ou alguma modificação na configuração do sistema.

O principal fator associado à instabilidade de tensão é a incapacidade do sistema em atender sua demanda de potência ativa e reativa, como em situações extremas de carregamento. Em [8] exemplifica-se que o colapso pode ocorrer devido somente ao aumento da demanda de potência ativa e não necessariamente devido somente a alta demanda de potência reativa. O colapso de tensão pode ocorrer também quando uma sequência de eventos associados levam o sistema a um perfil de tensão abaixo dos valores aceitáveis e pode resultar num blecaute total ou parcial devido a desligamentos em cascata de transformadores, geradores e linhas de transmissão.

Podemos analisar a estabilidade de tensão de um sistema por métodos estáticos e dinâmicos. Porém, as dinâmicas que influenciam a estabilidade de tensão são usualmente lentas e muitos aspectos do problema podem ser analisados eficientemente por métodos estáticos. Tais métodos permitem o exame de uma ampla extensão das condições do sistema e podem identificar a natureza e fatores que contribuíram para a instabilidade. Métodos estáticos baseados em fluxo de potência geralmente fornecem resultados mais conservadores do que métodos dinâmicos, visto que muitos fatores que têm considerável efeito sobre a estabilidade de tensão são ignorados no cálculo do fluxo de carga, mas mesmo assim, são amplamente utilizados pois fazem uma análise aproximada, porém rápida do ponto de vista computacional.

As curvas **P-V** e **Q-V** são métodos estáticos de análise que podem ser utilizadas na análise da estabilidade de tensão de um sistema [9]. A curva P-V (ilustrada na Fig. 2.1) é adequada para a identificação do ponto de colapso de tensão. Alguns sinônimos para o ponto de colapso de tensão são:

- ponto de máximo carregamento;
- máxima transferência de potência;
- “nose” (nariz da curva P-V);
- limite de estabilidade de tensão;

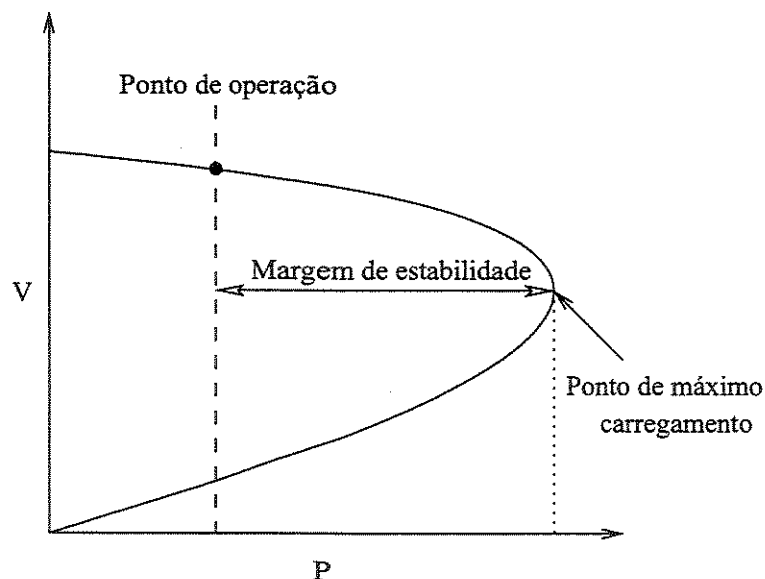


Figura 2.1: Curva P-V.

Os pontos da curva P-V são obtidos a partir de soluções sucessivas de fluxos de carga, onde

a carga e a geração são aumentadas por algum critério pré-estabelecido, obtendo-se assim a tensão V de uma barra para uma certa potência ativa P do sistema. Os pontos de equilíbrio da parte superior da curva P - V são estáveis (pontos de nó) e os pontos da parte inferior são instáveis (pontos de sela). A distância em porcentagem (ou MW) do ponto de operação ao limite de estabilidade de tensão define a margem de estabilidade de tensão.

Podemos também representar o ponto de máximo carregamento pelo fator de carregamento λ , que é um escalar que pode ser multiplicado por todas as cargas do sistema, de acordo com as equações abaixo:

$$\begin{aligned}\lambda P_k^n - P_k^c &= 0, \quad k \in \{\text{barras PQ, PV}\} \\ \lambda Q_k^n - Q_k^c &= 0, \quad k \in \{\text{barras PQ}\}\end{aligned}$$

em que P_k^n e Q_k^n são respectivamente as potências ativa e reativa nominais na barra k e P_k^c e Q_k^c são as potências consideradas na análise da rede. Aumentando o valor de λ atingimos o ponto de máximo fator de carregamento (λ^{max}) no limite de estabilidade de tensão.

A curva Q - V , representada na Fig. 2.2, expressa a relação entre o suporte de reativos em uma dada barra e a tensão dessa barra. Ela é utilizada para a identificação da margem de potência reativa de cada barra (em MVar), bem como para alocar e quantificar as necessidades de suporte de potência reativa do sistema. Para uma dada potência ativa P , podemos traçar a curva Q - V , onde Q é associado ao eixo y e V ao eixo x .

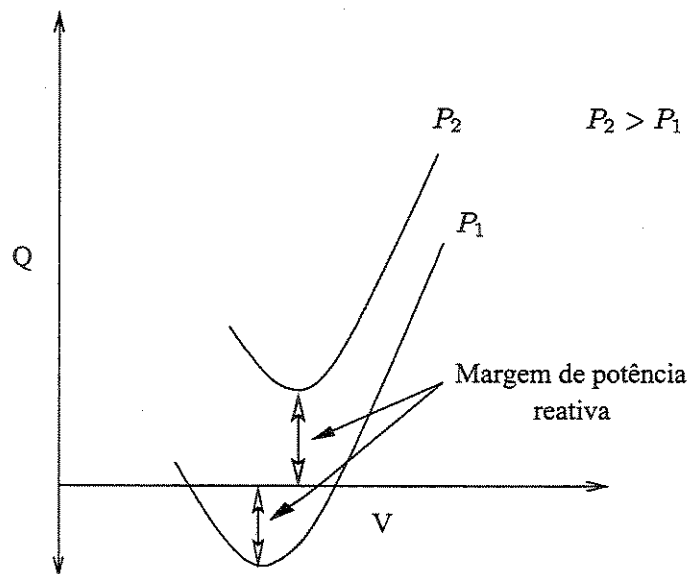


Figura 2.2: Curva Q - V .

No ponto de colapso de tensão a margem de potência reativa é nula. Para a demanda P_2 a margem de reativos será negativa, medindo a quantidade necessária de compensação reativa na barra, tal que a demanda P_2 possa ser atendida. A obtenção das curvas Q-V para todas as barras identifica as barras críticas do sistema do ponto de vista de deficiência de suporte de reativos. As menores margens indicam as barras críticas.

Outros exemplos de métodos que empregam a análise estática são: **análise de fluxo de carga continuado**, que utiliza equações de fluxo de carga reformuladas de modo a manter o sistema bem condicionado em todas possíveis condições de carregamento, evitando problemas de convergência na região próxima ao limite de estabilidade e **análise modal**, que é útil na identificação de áreas críticas em relação à estabilidade de tensão.

2.2 Índices de proximidade ao colapso de tensão

Entre os métodos de análise de estabilidade de tensão estão aqueles que calculam índices relativos ao colapso de tensão. O comportamento extremamente não-linear do sistema na região próxima ao limite de estabilidade torna muito difícil a elaboração de um índice com comportamento linear ou quase linear que seja eficaz para sistemas de grande porte, prevendo a margem de estabilidade a partir de um certo ponto de equilíbrio. Entretanto, existem alguns índices que fornecem indícios da proximidade ao colapso de tensão. O objetivo desses índices é definir uma medida escalar da proximidade ao colapso que possa ser monitorada quando parâmetros do sistema se modificam e podem ser usados *on-line* ou *off-line* para ajudar os operadores a determinar quão próximo o sistema está do ponto de colapso. Para o monitoramento *on-line* o cálculo de tais índices deve ser simples e com baixa demanda de tempo computacional.

Em [10] mostra-se que não há necessariamente uma relação entre a proximidade ao colapso e a magnitude de tensão para uma barra em sistemas de transmissão, não sendo correto tomar as magnitudes das tensões nas barras como indicadores de susceptibilidades ao colapso, tornando a análise de índices mais confiáveis não só quanto à proximidade mas também em relação ao próprio colapso de tensão.

Encontramos na literatura muitos índices de proximidade ao colapso de tensão. Em [11] são apresentados índices baseados em fluxos de potência ativa e reativa em cada ramo; em [12] é proposto um índice baseado na estabilidade do ramo; em [10] um índice baseado em perdas de potência ativa é apresentado. Em nosso trabalho utilizamos um índice baseado apenas em fasores de tensão proposto em [6].

2.3 O índice de estabilidade TPSI

O índice de estabilidade de tensão TPSI - *Transmission Path Stability Index*, proposto em [6], é baseado apenas em fasores de tensão, demandando pequeno esforço computacional, sendo adequado aos nossos propósitos de utilização do método em tempo real.

De acordo com [6], a condição crítica para a operação estável de um sistema formado por duas barras, cujo diagrama fasorial é apresentado na Fig. 2.3, composto de uma barra geradora 1 e uma barra de carga 2, é alcançada quando:

$$\Delta U_{12} = |\hat{U}_1 - \hat{U}_2| = U_2 \quad (2.1)$$

onde $\hat{U}_1$ e $\hat{U}_2$ são os fasores de tensões nas barras 1 e 2 respectivamente e U_2 é a magnitude do fasor $\hat{U}_2$.

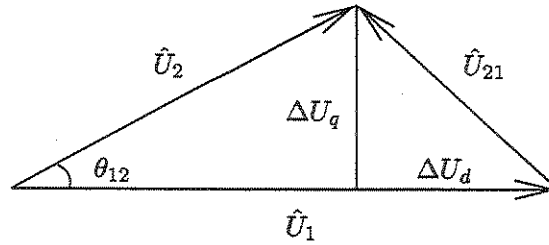


Figura 2.3: Diagrama fasorial para um sistema de 2 barras.

A projeção do fasor da barra de carga $U_2 \cos \theta_{12}$ e a sua diferença em relação ao fasor da barra geradora ΔU_d são comparados, alcançando a igualdade no caso crítico. Similar condição pode ser obtida para um sistema de 2 barras quando a matriz Jacobiana atinge a singularidade:

$$\det J = \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} - \frac{\partial P_2}{\partial U_2} \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} = 0 \quad (2.2)$$

A condição para a operação limite estável resulta na condição abaixo:

$$0,5U_1 = U_2 \cos \theta_{12} \quad (2.3)$$

em que $\theta_{12} = \theta_1 - \theta_2$.

Analisaremos agora a estabilidade de tensão para um caminho de transmissão radial com n_p barras, mostrado na Fig. 2.4. Neste caso, cada tensão nodal fasorial $\hat{U}_{i+1}$ é projetada no fasor de tensão da barra de camada imediatamente anterior $\hat{U}_i$ do mesmo caminho de transmissão conforme ilustra a Fig. 2.5, gerando uma diferença de tensão na direção do fasor anterior ΔU_{di} e uma componente ΔU_{qi} perpendicular ao fasor da barra de camada imediatamente inferior:

$$\Delta U_{di} = U_i - U_{i+1} \cos \theta_{i,i+1} \quad (2.4)$$

$$\Delta U_{qi} = U_{i+1} \sin \theta_{i,i+1} \quad (2.5)$$

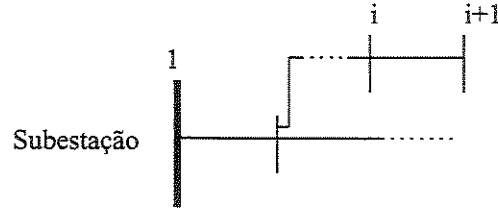


Figura 2.4: Caminho de transmissão.

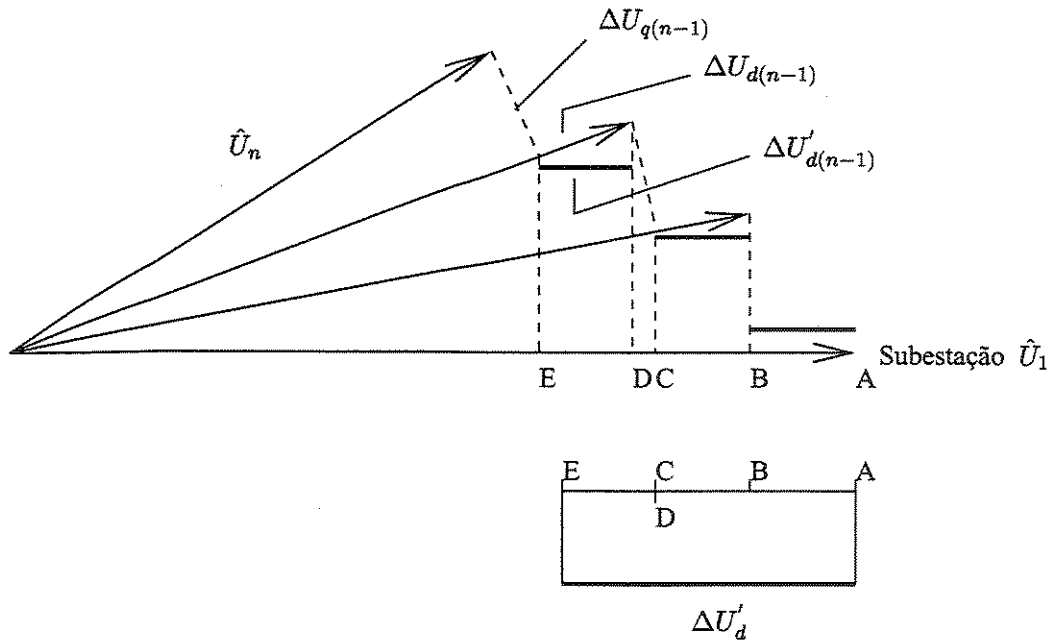


Figura 2.5: Projeções de tensões ao longo do caminho de transmissão.

A componente ΔU_{di} é projetada na direção do fasor gerador. Dessa forma obtemos a queda de tensão corrigida $\Delta U'_{di}$:

$$\Delta U'_{di} = (U_i - U_{i+1} \cos \theta_{i,i+1}) \cos \theta_{1,i} \quad (2.6)$$

A queda de tensão corrigida total $\Delta U'_d$ é definida como a somatória de todas as quedas de tensão corrigidas $\Delta U'_{di}$:

$$\Delta U'_d = \sum_{i=1}^{np-1} \Delta U'_{di} = \sum_{i=1}^{np-1} (U_i - U_{i+1} \cos \theta_{i,i+1}) \cos \theta_{1,i} \quad (2.7)$$

em que np é o número de barras do caminho de transmissão.

O índice de estabilidade de tensão TPSI pode então ser formulado com base nos conceitos das Eqs. (2.3) e (2.7). O TPSI é definido como a diferença entre a metade da magnitude do fasor da barra geradora U_G e a queda de tensão corrigida total ao longo do caminho de transmissão:

$$\text{TPSI} = 0,5U_G - \Delta U'_d \quad (2.8)$$

O índice TPSI é expresso em pu. Quando ele é igual a zero a potência transferida pelo caminho de transmissão é máxima e atinge-se o limiar de estabilidade de tensão. Qualquer aumento de demanda pode implicar em colapso de tensão nesse ponto. A propriedade mais importante deste índice é que ele explora apenas as informações dos fasores de tensão. Chamaremos de índice crítico o menor índice em um determinado ponto de operação da rede e de barra crítica à barra associada.

Em [6] apresentamos também a definição do índice TPSI para redes malhadas, e introduz-se a idéia dos caminhos críticos.

2.4 Comportamento do índice TPSI

Para a rede de 16 barras [13] cujos dados e diagrama unifilar encontram-se no apêndice A.1, após a resolução de um fluxo de carga encontramos os valores para a magnitude e o ângulo das tensões mostrados na Tabela 2.1. Utilizamos em todo o trabalho o modelo de carga de potência constante, porém, pela forma como foi implementado o programa computacional é fácil a adaptação para outros modelos de carga.

Tabela 2.1: Estado da rede de 16 barras.

Barra	Magnitude da Tensão [pu]	Ângulo da Tensão [rad]
1	1,0000	0,0000
2	1,0000	0,0000
3	1,0000	0,0000
4	0,9907	-0,0065
5	0,9878	-0,0095
6	0,9860	-0,0122
7	0,9849	-0,0123
8	0,9791	-0,0133
9	0,9711	-0,0253
10	0,9769	-0,0134
11	0,9710	-0,0266
12	0,9694	-0,0325
13	0,9944	-0,0057
14	0,9948	-0,0080
15	0,9918	-0,0091
16	0,9913	-0,0103

Esta rede possui 7 barras terminais (5, 7, 10, 11, 12, 14 e 16), portanto, será calculado o valor referente ao índice TPSI para os 7 caminhos de transmissão. Por exemplo, para o cálculo do índice TPSI para o caminho de transmissão de 4 barras determinado pela barra terminal 11, que a partir de agora chamaremos apenas de índice da barra 11, efetuamos as seguintes operações definidas na Eq. (2.8):

$$\text{TPSI}_{11} = 0,5U_1 - [(U_1 - U_8 \cos \theta_{1,8}) + (U_8 - U_9 \cos \theta_{8,9}) \cos \theta_{1,8} + (U_9 - U_{11} \cos \theta_{9,11}) \cos \theta_{1,9}]$$

Da mesma forma calculamos os índices das outras 6 barras terminais, obtendo os resultados mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Índices TPSI para o sistema de 16 barras.

Barra	Índice TPSI [pu]
5	0,48776
7	0,48486
10	0,47683
11	0,47080
12	0,46926
14	0,49482
16	0,49126

Pelos resultados da Tabela 2.2 observamos que o caminho de transmissão determinado pela barra terminal 12, que chamaremos de caminho 12, é o mais crítico, pois é o que apresenta menor valor para o índice. Podemos observar na Fig. 2.6 o comportamento dos valores dos índices TPSI para as barras terminais em função do carregamento da rede, ou seja, multiplicamos todas as cargas ativas e reativas da rede por um fator λ até o ponto em que o fluxo de carga não converge mais, atingindo então o máximo fator de carregamento da rede. Nesse ponto, o valor do índice crítico fica em torno de zero.

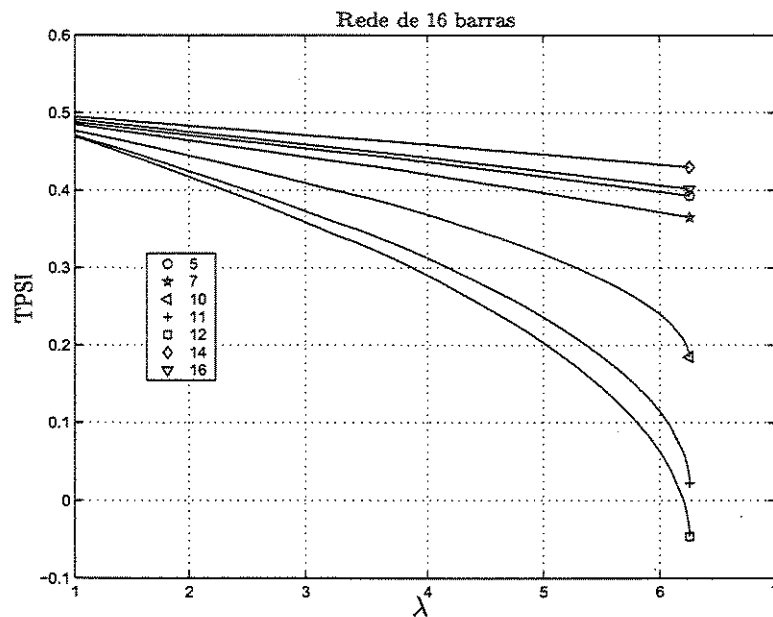


Figura 2.6: Valores dos índices em função do carregamento.

Verificamos então que o máximo fator de carregamento (λ^{max}) do sistema de 16 barras é de 6,257 e é determinado pelo caminho 12. Com um carregamento de 6,258 o fluxo de carga não converge mais. Para $\lambda = \lambda^{max} = 6,257$ temos o estado da rede de 16 barras mostrado na Tabela 2.3 e os valores dos índices mostrados na Tabela 2.4.

Tabela 2.3: Estado da rede de 16 barras para $\lambda = \lambda^{max} = 6,257$.

Barra	Magnitude da Tensão [pu]	Ângulo da Tensão [rad]
1	1,0000	0,0000
2	1,0000	0,0000
3	1,0000	0,0000
4	0,9207	-0,0333
5	0,8936	-0,0503
6	0,8740	-0,0697
7	0,8662	-0,0707
8	0,7065	-0,0597
9	0,5380	-0,1865
10	0,6875	-0,0611
11	0,5301	-0,2009
12	0,4635	-0,2939
13	0,9394	-0,0157
14	0,9300	-0,0216
15	0,9099	-0,0313
16	0,9021	-0,0355

Tabela 2.4: Índices TPSI para o sistema de 16 barras para $\lambda = \lambda^{max} = 6,257$.

Barra	Índice TPSI [pu]
5	0,39292
7	0,36514
10	0,18477
11	0,02228
12	-0,04625
14	0,42990
16	0,40183

Mostramos na Fig. 2.7 os valores do índice em função do carregamento até $\lambda^{max} = 3,622$ para a rede de 33 barras cujos dados e diagrama unifilar encontram-se no apêndice A.2.

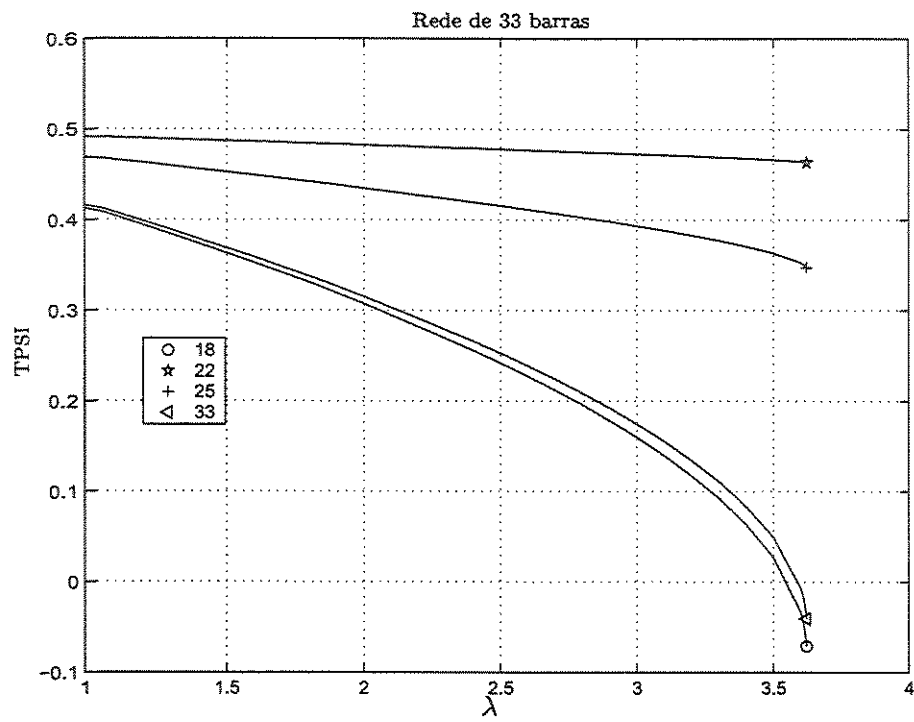


Figura 2.7: Valores dos índices em função do carregamento.

Capítulo 3

Cálculo de fluxo de carga para redes de distribuição

No nosso trabalho utilizamos o método *back-and-forward sweep* proposto em [7] para o cálculo de fluxo de carga para redes de distribuição radiais, que é um método rápido e preciso, atendendo às exigências para que o algoritmo como um todo possa ser utilizado em tempo real. Utilizamos também um método aproximado, baseado no modelo linear da rede, para avaliar de forma ainda mais rápida a qualidade de uma operação de chaveamento candidata durante o procedimento de reconfiguração.

3.1 O método *back-and-forward sweep*

Neste método o esquema de numeração das barras é muito importante, ou melhor, as **camadas** às quais as barras pertencem devem estar muito bem definidas. O sistema radial deve ser organizado em camadas em ordem crescente a partir do nó raiz (subestação), conforme ilustra a Fig. 3.1. Este esquema de numeração é importante para encontrarmos a solução do fluxo de carga de maneira eficiente.

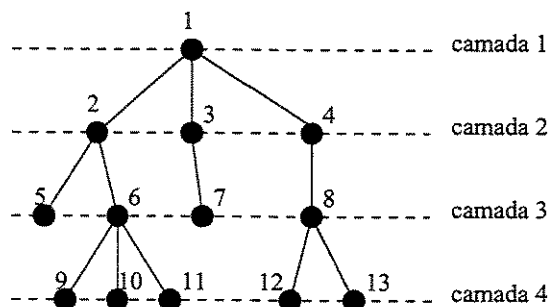


Figura 3.1: Numeração das camadas de um sistema radial de distribuição.

Para um sistema de distribuição radial com n nós e b ramos ($b = n - 1$), o método de resolução consiste em três passos:

1. **Cálculo das correntes nodais:** Na iteração k , as injeções de corrente nodais são calculadas por:

$$I_i^{(k)} = \left(\frac{S_i}{V_i^{(k-1)}} \right)^* - Y_i V_i^{(k-1)}, \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (3.1)$$

em que $V_i^{(k-1)}$ é a tensão no nó i calculada durante a iteração $(k - 1)$ e S_i é a injeção de potência complexa especificada no nó i . Y_i é a somatória de todos os elementos *shunt* ligados ao nó i .

2. **Backward sweep:** Na iteração k , começando das barras da última camada e movendo-se em direção ao nó raiz, a corrente no ramo L , J_L , é calculada por:

$$J_L^{(k)} = -I_{L2}^{(k)} + I_{sL2}, \quad L=b, b-1, b-2, \dots, 1 \quad (3.2)$$

em que $I_{L2}^{(k)}$ é a injeção de corrente no nó $L2$ e I_{sL2} é a somatória das correntes de linha emanando do nó $L2$ conforme a Fig. 3.2.

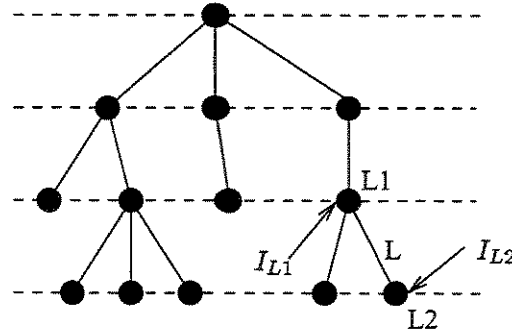


Figura 3.2: Passo *backward sweep*.

3. **Forward sweep:** As tensões nos nós são atualizadas, começando-se nas barras da primeira camada e seguindo em direção às barras da última camada. Para cada linha L (ver Fig. 3.2), a tensão no nó $L2$ é calculada usando-se a tensão do nó $L1$ atualizada e é dada por:

$$V_{L2}^{(k)} = V_{L1}^{(k)} - Z_L J_L^k, L=1, 2, 3, \dots, b \quad (3.3)$$

em que Z_L é a impedância série da linha L .

Os passos 1, 2 e 3 são repetidos até a convergência. Para a convergência utilizamos o seguinte critério:

$$\begin{aligned} \max \{ \Delta V_i, i = 1, 2, \dots, n. \} &\leq \text{tolerância} \Rightarrow \text{convergiu} \\ \max \{ \Delta V_i, i = 1, 2, \dots, n. \} &> \text{tolerância} \Rightarrow \text{passo 1} \end{aligned}$$

3.2 Consideração de barras de geração (PV)

O método *back-and-forward sweep* permite o acréscimo de geradores independentes (nós PV). Segundo [14], a relação incremental entre a magnitude de sequência positiva de tensão e a magnitude de sequência positiva da injeção de corrente reativa na iteração γ é expressa como:

$$[Z_V][I_q]^\gamma = [\Delta V]^\gamma \quad (3.4)$$

em que $[Z_V]$ é uma matriz de constantes reais, referente à matriz de sensibilidade nodal PV; ΔV é o vetor de *mismatches* de tensão (valor especificado menos valor calculado) e I_q é o vetor de injeções de correntes reativas nodais relacionado com as injeções de potência reativa para a manutenção das tensões nodais especificadas.

A dimensão de $[Z_V]$ é igual ao número de nós PV. A diagonal z_{ii} é igual ao módulo da somatória da sequência positiva das impedâncias de todas as linhas entre o nó PV i e o nó raiz (barra da subestação). Se dois nós PV i e j têm caminhos completamente diferentes ao nó raiz, então z_{ij} é zero. Se i e j partilham de um trecho do caminho até o nó raiz em comum, então z_{ij} é igual ao módulo da somatória da sequência positiva das impedâncias de todas as linhas do caminho em comum. Baseado nisso, $[Z_V]$ pode ser formada identificando os caminhos entre os nós PV e o nó raiz.

Supondo que há m nós PV no sistema, as injeções de corrente reativa nesses nós PV são determinadas através de um processo iterativo para cada iteração k do fluxo de carga, que só vai parar quando todos os mismatches das tensões envolvidas forem menores que a tolerância especificada. Portanto, na iteração γ do processo iterativo para os nós PV seguimos os seguintes passos:

1. Calcula o *mismatch* de magnitude de tensão para todos os nós PV:

$$\Delta V_i^\gamma = |V_i^s| - |V_i^\gamma|, i=1, 2, 3, \dots, m \quad (3.5)$$

em que V_i^s é a magnitude de tensão esperada para o nó i . Se algum dos *mismatches* for maior que a tolerância, então passamos para o próximo passo.

2. Encontra as injeções de corrente reativa para os nós PV usando a Eq. (3.4). Se a geração de potência reativa é ilimitada nós podemos injetar I_{iq} 90° adiantado em relação à tensão V_i correspondente em cada nó PV i :

$$I_{iq}^\gamma = |I_q|^\gamma e^{j(90^\circ + \delta_{V_i}^\gamma)} \quad (3.6)$$

em que δ_{V_i} é o ângulo da tensão do referido nó PV. Na realidade, a capacidade de geração de potência reativa no gerador é sempre limitada, então o limite de potência reativa deve ser verificado primeiramente para determinarmos se a injeção de corrente requerida é possível, de acordo com os passos seguintes.

3. Calcula a injeção de potência reativa requerida Q_{ig} para todos os nós PV:

$$Q_{ig}^\gamma = Q_i'^\gamma + Q_{id}, \quad i=1, 2, 3, \dots, m \quad (3.7)$$

em que Q_{id} é a potência reativa da carga especificada no nó PV i e Q_i' é a nova potência reativa injetada no nó i , que é calculada usando-se a tensão no nó PV e a nova corrente injetada da seguinte forma:

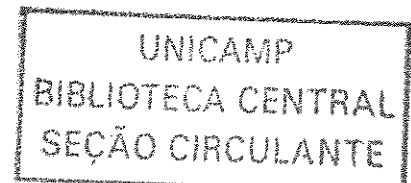
$$Q_i'^\gamma = \text{Im}[V_i I_{iq}^*]^\gamma \quad (3.8)$$

4. Q_{ig} é então comparada com os limites de geração de potência reativa. Se Q_{ig} está dentro dos limites:

$$Q_{ig}^{\min} < Q_{ig}^\gamma < Q_{ig}^{\max}$$

então a correspondente reativa I_{iq} é injetada no nó PV de acordo com a Eq. (3.7). Se Q_{ig} viola algum limite de potência reativa, nós injetamos o valor do limite violado, eliminando a linha e a coluna de $[Z_V]$ correspondente, pois agora a barra se comporta como uma barra PQ.

A iteração descrita nos passos 1-4 continuará até que os *mismatches* da magnitude de tensão para todos os nós PV calculados pela Eq. (3.5) tornem-se menores que a tolerância. Portanto, com o acréscimo da modelagem de geradores independentes o algoritmo utilizado é apresentado na Fig. 3.3.



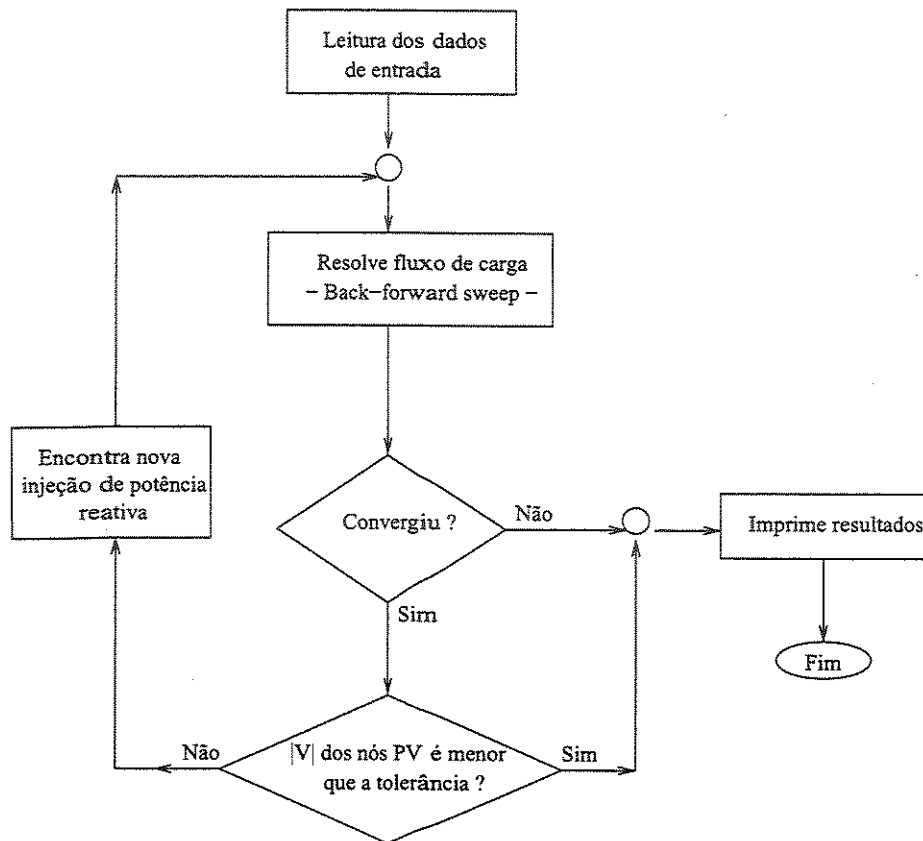


Figura 3.3: Algoritmo utilizado considerando a presença de nós PV.

Utilizando o método de fluxo de carga *back-and-forward sweep* obtivemos os mesmos resultados para o estado da rede que pelo método de Newton, além de ser até 5 vezes mais rápido que este último quando não há geração independente, o que é bom do ponto de vista da aplicação do algoritmo de reconfiguração em tempo real.

3.3 Método aproximado

Descreveremos agora o método de estimativa do estado da rede pós-reconfiguração utilizado no procedimento do nosso algoritmo, que será melhor detalhado no capítulo seguinte.

3.3.1 Aspectos teóricos

Como o índice de estabilidade de tensão TPSI depende apenas dos fasores das tensões, utilizamos o modelo linear da rede, ou seja, $YU = I$, em que Y é a matriz admitância, U é o vetor das tensões nodais e I é o vetor das correntes nodais, para estimá-los quando determinado chaveamento é testado e, a partir dos índices estimados, decidirmos se consideraremos aquela configuração boa ou não aos nossos propósitos de melhorar as condições de estabilidade da rede. Dessa forma, utilizaremos o método *back-and-forward sweep* para a obtenção do estado da rede somente após realizada a melhor reconfiguração encontrada pelo método aproximado.

Dada uma configuração inicial da rede, se abrirmos a linha que liga as barras a-k e fecharmos a linha que liga as barras p-i, considerando sempre a primeira barra do par como sendo a barra pertencente à camada menor, ou seja, mais próxima da raiz do alimentador [7], podemos estimar as variações das tensões nodais conforme mostrado a seguir:

$$\Delta \hat{U}_m = Z_{mk} \sum_{j \in \tau} \hat{I}_j, \text{ se } m \text{ pertence ao alimentador aliviado;} \quad (3.9)$$

$$\Delta \hat{U}_m = -Z_{mp} \sum_{j \in \tau} \hat{I}_j, \text{ se } m \text{ pertence ao alimentador carregado;} \quad (3.10)$$

$$\Delta \hat{U}_j = \hat{U}_p - \hat{U}_i - (z_{ip} + Z_{pp} + Z_{ii} - Z_{ij} - Z_{pj}) \sum_{j \in \tau} \hat{I}_j, \text{ se } j \text{ é uma barra transferida} \quad (3.11)$$

em que $\Delta \hat{U}$ é a diferença entre as tensões depois e antes do chaveamento; $\hat{U}_p$ e $\hat{U}_i$ são as tensões pré-reconfiguração nas barras p e i respectivamente; Z é a matriz impedância do sistema pré-reconfiguração; τ é o conjunto das barras transferidas; $\hat{I}_j$ é a injeção de corrente na barra transferida j e z_{pi} é a impedância da linha p-i. É importante notar que são utilizadas somente informações da rede pré-reconfiguração.

Por exemplo, para a rede de 16 barras encontrada no apêndice A.1, se fecharmos a linha 14 que liga as barras 5 e 11 e abrirmos a linha 6 que liga as barras 8 e 9, teremos então a=8, k=9, p=5 e i=11, transferindo as cargas das barras 9, 11 e 12 do alimentador 2 para o alimentador 1. As novas tensões após essa reconfiguração são estimadas pela Eq. (3.9) para as barras restantes do alimentador 2 (8 e 10) que foi aliviado; pela Eq. (3.10) para as barras do alimentador 1 (4, 5, 6 e 7) que foi carregado; e pela Eq. (3.11) para as barras transferidas (9, 11 e 12). As tensões nas barras do alimentador 3 não variam neste caso e consideramos que as tensões nas barras 1, 2 e 3 (barramentos da subestação) permanecem constantes e iguais a 1 pu em magnitude e 0 radianos de ângulo.

Podemos verificar a validade das Eqs. (3.9), (3.10) e (3.11) fazendo a diferença entre os estados pós-reconfiguração e pré-reconfiguração para um dado chaveamento, utilizando em ambos os casos o modelo linear da rede. As Eqs. (3.9) e (3.10) são facilmente verificáveis, visto que as tensões

nas barras do alimentador aliviado não sofrerão mais a queda de tensão causada pelas injeções de corrente das cargas transferidas ao longo do caminho em comum entre a barra do alimentador aliviado e as barras transferidas até o nó raiz do alimentador (Z_{mk}). Analogamente, as barras do alimentador carregado sofrerão maior queda de tensão causada pelas injeções de corrente das cargas transferidas ao longo do caminho em comum entre a barra do alimentador carregado e as barras transferidas até o nó raiz do alimentador (Z_{mp}).

A diferença entre os estados nas barras transferidas não será apenas a diferença entre as tensões das barras p e i . Quando transferidas as cargas, as tensões nas barras p e i serão diferentes, pois devemos descontar a queda na tensão devido às injeções de corrente das cargas transferidas ao longo do caminho de transmissão do nó raiz do alimentador carregado até as barras transferidas ($z_{ip} + Z_{pp}$).

Porém, se alguma das barras transferidas situava-se numa camada inferior à camada da barra i , ou seja, encontrava-se mais próxima do alimentador que a barra i , após a reconfiguração passa a se situar mais distante (camada maior), então devemos considerar também a queda de tensão provocada pela nova configuração do caminho de transmissão. No exemplo anterior temos uma situação dessas pois a barra 9 encontra-se numa camada menor que a barra i , ou seja, a barra 11, de forma que a queda de tensão provocada pela impedância da linha que liga as barras 9 e 11 ($Z_{ii} - Z_{ij}$) deve ser considerada na estimativa da nova tensão na barra 9. Se todas as barras transferidas se encontrassem em camadas maiores que a camada da barra i , teríamos $Z_{ii} = Z_{ij}$ e os termos se cancelariam conforme a Eq. (3.11).

Se a transferência de carga se dá dentro do mesmo alimentador, ele é ao mesmo tempo aliviado e carregado e as novas tensões nas barras desse alimentador (barras m não transferidas) são estimadas pela soma das estimativas das Eqs. (3.9) e (3.10):

$$\Delta \hat{U}_m = (Z_{mk} - Z_{mp}) \sum_{j \in \tau} \hat{I}_j \quad (3.12)$$

e as novas tensões nas barras transferidas j são estimadas pela Eq. (3.11). É neste caso que se justifica o termo Z_{pj} na Eq. (3.11), pois não devemos considerar a queda de tensão referente ao caminho em comum até o nó raiz do alimentador entre as barras transferidas na reconfiguração. Notemos que sempre que a transferência é feita entre dois alimentadores diferentes o termo Z_{pj} será igual a 0.

3.3.2 Resultados

Apresentaremos nessa seção alguns resultados práticos utilizando o método de estimativa do estado pós-reconfiguração apresentado anteriormente. Consideremos novamente a rede de 16 barras. Se fechamos a linha 15 e abrimos a linha 7, transferindo a barra 10 do alimentador 2 para o alimentador 3, comparamos o resultado para as novas tensões pós-reconfiguração estimado com os resultados do estado obtido com o cálculo de um fluxo de carga pelo método *back-and-forward sweep* na Tabela 3.1. O estado da configuração inicial da rede encontra-se na Tabela 2.1.

Tabela 3.1: Fechando linha 15 e abrindo linha 7 para a rede de 16 barras.

Barra	$\hat{U}_{estimado} = \hat{U}_{inicial} + \Delta\hat{U}$		$\hat{U}_{final}$ (fluxo de carga)		Erro $ \hat{U} _{estimado} - \hat{U} _{final} $ [pu]
	Magnitude da Tensão [pu]	Ângulo da Tensão [rad]	Magnitude da Tensão [pu]	Ângulo da Tensão [rad]	
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
2	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
3	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
4	0,9907	-0,0065	0,9907	-0,0065	0,0000
5	0,9878	-0,0095	0,9878	-0,0095	0,0000
6	0,9860	-0,0122	0,9860	-0,0122	0,0000
7	0,9849	-0,0123	0,9849	-0,0123	0,0000
8	0,9812	-0,0132	0,9812	-0,0132	0,0000
9	0,9732	-0,0252	0,9733	-0,0251	0,0001
10	0,9899	-0,0085	0,9900	-0,0085	0,0001
11	0,9731	-0,0265	0,9732	-0,0264	0,0001
12	0,9716	-0,0324	0,9716	-0,0323	0,0000
13	0,9923	-0,0058	0,9923	-0,0059	0,0000
14	0,9907	-0,0085	0,9907	-0,0085	0,0000
15	0,9807	-0,0092	0,9897	-0,0093	0,0000
16	0,9891	-0,0104	0,9891	-0,0104	0,0000

Podemos observar pela Tabela 3.1 que os erros dos resultados encontrados pelo método estimado em comparação ao fluxo de carga exato com precisão até a quarta casa decimal foram muito pequenos. Porém, neste exemplo realizamos a transferência de apenas uma barra e observamos que quanto mais barras são transferidas o erro máximo tende a ser maior, como veremos no exemplo seguinte, em que, partindo da configuração inicial da rede de 16 barras, fechamos a linha 14 e abrimos a linha 6 realizando a transferência das barras 9, 11 e 12 do alimentador 2 para o alimentador 1. O resultado da estimativa das novas tensões comparado com o fluxo de carga exato são mostrados na Tabela 3.2.

Verificamos conforme os resultados da Tabela 3.2 que os maiores erros são os das barras transferidas e o maior deles é o erro da barra mais distante do alimentador, ou seja, da barra 12. Observamos esse mesmo comportamento em nossos testes realizados com outras redes. Porém este erro é ainda muito pequeno sendo desprezível para os nossos propósitos.

Com este método de estimativa do estado pós-reconfiguração obtivemos bons resultados em relação aos resultados utilizando o fluxo de carga *back-and-forward sweep*, além dele ser em média 3 vezes mais rápido que este, representando uma redução de 35% em média no tempo total do algoritmo.

Tabela 3.2: Fechando linha 14 e abrindo linha 6 para a rede de 16 barras.

Barra	$\hat{U}_{estimado} = \hat{U}_{inicial} + \Delta \hat{U}$		$\hat{U}_{final}$ (fluxo de carga)		Erro $ \hat{U}_{estimado} - \hat{U}_{final} $ [pu]
	Magnitude da Tensão [pu]	Ângulo da Tensão [rad]	Magnitude da Tensão [pu]	Ângulo da Tensão [rad]	
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
2	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
3	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
4	0,9831	-0,0172	0,9825	-0,0171	0,0006
5	0,9723	-0,0324	0,9713	-0,0323	0,0010
6	0,9785	-0,0230	0,9778	-0,0229	0,0007
7	0,9774	-0,0231	0,9767	-0,0231	0,0007
8	0,9903	-0,0015	0,9904	-0,0016	0,0001
9	0,9576	-0,0481	0,9560	-0,0479	0,0016
10	0,9882	-0,0015	0,9883	-0,0017	0,0001
11	0,9684	-0,0369	0,9671	-0,0367	0,0013
12	0,9561	-0,0554	0,9543	-0,0553	0,0018
13	0,9944	-0,0057	0,9944	-0,0057	0,0000
14	0,9948	-0,0080	0,9948	-0,0080	0,0000
15	0,9918	-0,0091	0,9918	-0,0091	0,0000
16	0,9913	-0,0103	0,9913	-0,0103	0,0000

Capítulo 4

Reconfiguração de sistemas de distribuição

4.1 Introdução

Os sistemas de distribuição de energia elétrica são caracterizados (salvo raras exceções) pela configuração radial que permite o isolamento de faltas, facilitando fatores inerentes à proteção, tais como a atenuação de correntes de curto circuito, e melhorando as condições de operação do sistema como um todo. Essa característica radial implica na existência de apenas um caminho de transmissão entre a carga e o alimentador.

A reconfiguração de alimentadores é definida como sendo uma alteração na estrutura topológica da rede pela mudança dos estados aberto/fechado das chaves de interconexão de forma que ocorra uma redistribuição de cargas entre os alimentadores. A reconfiguração pode ser usada tanto como uma ferramenta de planejamento ou de controle em tempo real.

O problema da reconfiguração será ilustrado utilizando a rede de 16 barras, cujo diagrama unifilar para as condições iniciais de operação são mostrados na Fig. 4.1. O ramo pontilhado entre as barras 5 e 11 representa uma chave de interconexão entre os alimentadores 1 e 2. A carga da barra 11 pode ser transferida para o alimentador 1 fechando-se a chave de interconexão entre as barras 5 e 11 e abrindo-se a chave entre as barras 11 e 9. Similarmente, as cargas das barras 9, 11 e 12 podem ser transferidas para o alimentador 1 fechando-se a chave de interconexão entre as barras 5 e 11 e abrindo-se a chave entre as barras 8 e 9, preservando assim a característica radial do sistema. A configuração final após esta última transferência de carga descrita é mostrada na Fig. 4.2.

Cada alimentador de um sistema de distribuição possui uma combinação diferente de cargas comerciais, residenciais e industriais. sabendo-se que a variação diária de carga desses diferentes tipos de carga é também diferente, os picos de carga de cada um dos alimentadores ocorrem em instantes diferentes. A reconfiguração permite a transferência de cargas de alimentadores mais carregados para alimentadores relativamente menos carregados. Cada transferência é realizada não apenas para alterar o nível de carga entre os alimentadores mas também para melhorar o perfil de

tensão nas barras e reduzir perdas de potência no sistema em geral.

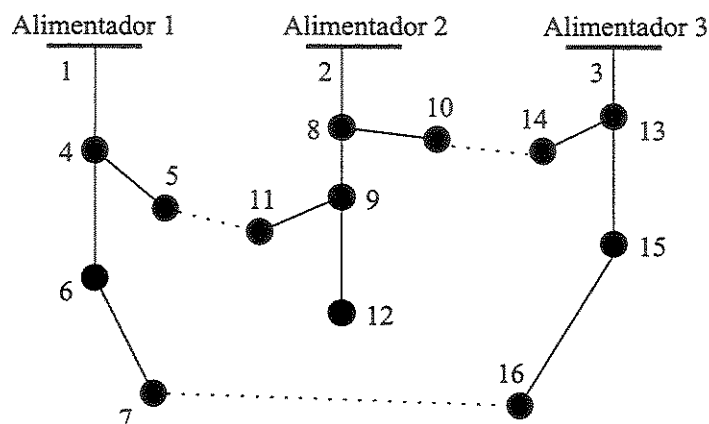


Figura 4.1: Configuração inicial da rede de 16 barras.

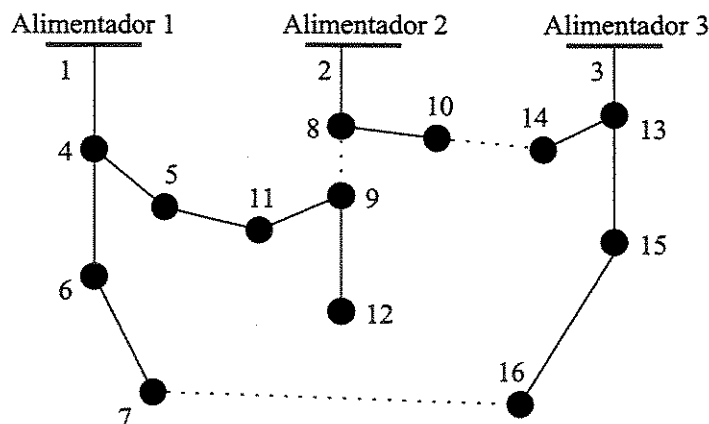


Figura 4.2: Configuração da rede de 16 barras após reconfiguração.

A solução exata para o problema da reconfiguração para a redução de perdas envolve a seleção, entre todas as configurações possíveis, daquela que melhor atinja o objetivo desejado, como por exemplo, as menores perdas. A diferença nas perdas de potência de um sistema após uma reconfiguração pode ser facilmente percebida com um estudo dos resultados do fluxo de carga antes e após a reconfiguração. Entretanto, até mesmo em sistemas de distribuição de tamanho médio, o número de opções de chaveamento é tão grande que torna extremamente ineficiente em termos computacionais o estudo por vários fluxos de carga e também impraticável em tempo real. O

número de configurações factíveis geradas pelo chaveamento cresce exponencialmente com o número e a disposição das chaves do sistema, tornando o processo de busca oneroso para sistemas reais. O fato do crescimento exponencial do número de possibilidades é denominado explosão combinatorial.

Devido a esse fato, encontramos na literatura muitos algoritmos heurísticos que não garantem que a solução encontrada é a solução ótima, mas apenas uma boa solução ou quase ótima. Situação semelhante à da reconfiguração para redução de perdas pode ser encontrada no problema da reconfiguração para a melhoria das condições de estabilidade do sistema de distribuição, que só tem despertado a atenção de engenheiros e pesquisadores mais recentemente, visto que já têm sido observado sistemas de distribuição operando em condições críticas de carga [2].

Em [13] é proposto um algoritmo que analisa a magnitude das tensões para a tomada de decisões na reconfiguração para a minimização de perdas. Analisando as tensões das barras envolvidas no chaveamento consegue-se eliminar muitas possibilidades de reconfiguração indesejadas, diminuindo bastante o esforço computacional. O método heurístico desenvolvido em nosso trabalho analisa os índices TPSI de estabilidade de tensão para eliminar a análise de configurações indesejadas aos propósitos de melhoria das condições de estabilidade de tensão, ganhando com isso a rapidez necessária para a sua utilização em tempo real.

4.2 Método de reconfiguração proposto

Nesta seção descreveremos todas as etapas da metodologia utilizada em nosso trabalho para reconfigurar a rede com o objetivo de melhorarmos sua condição de operação com relação à estabilidade de tensão.

O nosso principal objetivo no primeiro momento é, dado o estado da rede na sua configuração inicial e os valores dos índices de estabilidade TPSI das barras terminais, tentar, através da reconfiguração, aumentar o valor do menor índice (índice crítico), aliviando o alimentador ou caminho de transmissão mais carregado, de forma que o valor do índice crítico depois da reconfiguração seja maior que o valor do índice crítico antes da reconfiguração. Portanto, partimos do pressuposto de que o caminho da barra crítica no caso base é aquele que determinará o máximo fator de carregamento da rede, conforme podemos verificar nas Figs. 2.6 e 2.7 que se referem respectivamente às redes de 16 e 33 barras.

O primeiro passo é a obtenção do estado de operação da rede. Fazemos isso pelo método rápido e eficiente para redes radiais *back-and-forward sweep*. Calculamos então os índices TPSI para todas as barras terminais do sistema. Buscamos transferir carga do caminho mais carregado (menor índice) para o menos carregado (maior índice). Se não é possível tal transferência, procuraremos então transferir carga para o segundo caminho menos carregado e assim sucessivamente até a tentativa de transferência de carga dentro do próprio caminho mais carregado.

Verificamos a possibilidade de reconfiguração entre os caminhos de transmissão apenas verificando a existência ou não de chaves de interconexão entre eles. Quando encontrada uma possibilidade de chaveamento, chamamos de linha $p-i$ a linha que será fechada em nossa análise e que liga as barras p e i , e a linha que será aberta em nossa análise será a linha $a-k$, que liga as barras a e k , em que k é igual a i na primeira análise e a é a barra da camada imediatamente inferior à barra k .

Por exemplo, analisando a rede de 16 barras, se queremos transferir carga do caminho de transmissão terminado pela barra 11, ou seja, do caminho 11 para o caminho 5, então no primeiro momento fechamos a linha 05-11 e abrimos a linha 09-11, ou seja, $p=5$, $i=11$, $k=11$ e $a=9$, garantindo sempre a característica radial da rede.

Definido o chaveamento estimamos o estado da rede pós-reconfiguração pelo método aproximado descrito no capítulo anterior. Sempre utilizamos o método aproximado quando queremos avaliar se determinado chaveamento é bom sob o ponto de vista da estabilidade de tensão. Em nossos testes com o algoritmo verificamos que as configurações finais das redes encontradas tanto na análise dos chaveamentos com o método aproximado quanto na análise utilizando um fluxo de carga exato são as mesmas na maioria dos casos e quando não são, as diferenças entre os máximos fatores de carregamento para as configurações encontradas são na prática insignificantes.

Se o índice crítico pós-reconfiguração for maior que o índice crítico pré-reconfiguração então continuamos a análise fechando a linha aberta anteriormente e abrindo a linha que liga a barra a anterior à barra da camada imediatamente inferior a sua. Por exemplo, fechando a linha 11-09 e abrindo a linha 08-09 em continuação ao exemplo anterior. Dessa forma, agora teríamos $p=5$, $i=11$, $k=9$ e $a=8$, garantindo a característica radial da rede. Continuamos o processo até que o índice crítico diminua de valor em relação à configuração analisada anteriormente.

Encontrada uma boa configuração o processo de busca não pára, pois poderemos encontrar ainda uma solução melhor, ou seja, que eleve ainda mais o índice crítico, mesmo transferindo-se carga do alimentador ou caminho mais carregado para um outro mais carregado em relação àquele envolvido na transferência de carga da solução encontrada anteriormente, porque apenas nos interessa elevar ao máximo o índice crítico pós-reconfiguração.

Terminada a tentativa de transferência de carga do caminho mais carregado para outro, tentamos redistribuir carga entre os outros caminhos com o objetivo de tentarmos elevar o índice crítico. Quando aliviamos um caminho pertencente ao alimentador que contém o caminho mais carregado e carregamos um outro alimentador, o caminho mais carregado é aliviado indiretamente, pois aliviamos o caminho de transmissão em comum entre o caminho mais carregado e o caminho aliviado na reconfiguração. Nesses casos podemos elevar o índice crítico. Porém, a maioria das tentativas de transferência de carga entre os outros alimentadores resulta num mesmo valor para tal índice, o que ocorre quando não transferimos carga de caminhos pertencentes ao alimentador mais carregado. Nessa situação, consideramos uma reconfiguração válida somente quando a diferença entre o menor dos índices dos caminhos envolvidos diminui após a reconfiguração ou o menor dentre esses dois aumente de valor após a reconfiguração, ou seja, equilibrando os valores dos respectivos índices, o que na maioria das vezes resulta também em diminuição de perdas e, principalmente, abre novas possibilidades de chaveamento envolvendo o alimentador crítico (mais carregado).

Por exemplo, para a mesma rede de 16 barras, se verificado que todas as tentativas de aliviar o caminho 12 ou o alimentador 2 resultaram em valores para o índice crítico menores que o valor de tal índice na configuração inicial, então não encontramos uma boa solução que atendesse ao nosso primeiro propósito. Tentamos então redistribuir carga entre os outros alimentadores, por exemplo, fechando a linha 16-07 e abrindo a linha 06-07, transferindo a barra 7 do alimentador 1 para o alimentador 3, não alterando dessa forma o índice crítico que é o da barra 12, conforme observamos na Tabela 2.2. Se com essa transferência a diferença entre os índices das barras 6 e 7 (barras terminais após a reconfiguração) for menor que a diferença entre os índices das barras 7 e 16 (barras

terminais antes da reconfiguração) ou o menor dos índices entre as barras 6 e 7 for maior que o menor dos índices entre as barras 7 e 16, teremos então uma reconfiguração válida.

Encontrando a melhor reconfiguração segundo nossos critérios, encontramos o novo estado da rede através de um cálculo de fluxo de carga pelo método *back-and-forward sweep* e reiniciamos o processo de busca que só pára quando não há mais possibilidade de reconfiguração para elevarmos o menor dos índices ou para redistribuirmos carga segundo os critérios apresentados.

De maneira geral, seguimos os seguintes passos:

Passo (i): Obtenção do estado de operação da rede pelo cálculo de fluxo de carga pelo método *back-and-forward sweep*;

Passo (ii): Calcula o valor dos índices TPSI de estabilidade de tensão;

Passo (iii): Busca possíveis chaveamentos, fechando as linhas de interconexão abertas e abrindo as linhas adjacentes em cada tentativa de reconfiguração.

Passo (iv): Estima os novos índices de estabilidade para as possíveis reconfigurações pelo método aproximado;

Passo (v): É possível elevar o valor do menor dos índices? Se sim, vai para o passo (vi). Se não, vai para o passo (viii);

Passo (vi): Escolhe o melhor chaveamento;

Passo (vii): Reconfigura a rede. Vai para o passo (i).

Passo (viii): Verifica a possibilidade de redistribuir cargas a fim de diminuirmos as diferenças entre os menores índices de estabilidade dos caminhos envolvidos ou de elevar o menor deles. Se há essa possibilidade vai para o passo (vi). Se não, fim do procedimento.

Chamamos de índices de caminhos envolvidos numa reconfiguração (passo viii) àqueles índices cujos caminhos de transmissão contém alguma das barras envolvidas diretamente na reconfiguração. Por exemplo, se houvesse uma linha de interconexão entre as barras 4 e 8 na rede de 16 barras, os índices envolvidos no alimentador 1 seriam os índices das barras 5 e 7 e os índices envolvidos no alimentador 2 seriam os índices das barras 10, 11 e 12.

4.3 Exemplo

Utilizaremos novamente a rede de 16 barras como exemplo para verificarmos passo a passo a metodologia utilizada em nosso trabalho. Obtemos primeiramente o estado da rede pelo método *back-and-forward sweep* mostrado na Tabela 2.1 e calculamos os índices TPSI para todas as barras

terminais do sistema, conforme observamos na Tabela 2.2. Verificamos então que o índice crítico é o índice da barra 12, cujo valor é de 0,46926 pu.

Tentamos primeiramente aliviar o alimentador 2 que contém o caminho 12, que é o mais carregado. Não podendo aliviar diretamente o caminho 12 devido à inexistência de chaves de interconexão, tentaremos aliviar o caminho 11 que é o segundo mais carregado do alimentador 2, com um índice de 0,47080 pu. Podemos então fechar a linha 05-11 e abrir a linha 09-11 ($a=9$, $k=11$, $p=5$ e $i=11$) transferindo a barra 11 do alimentador 2 para o alimentador 1. Para esta nova configuração estimamos os valores das novas tensões nas barras com o método estimado descrito no capítulo anterior e calculamos os índices de estabilidade, obtendo os resultados conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 09-11 e fechando linha 05-11.

Barra	Índice TPSI [pu]
7	0,48489
10	0,47698
11	0,48779
12	0,46931
14	0,49482
16	0,49125

Percebemos pela Tabela 4.1 que o índice da barra 5 deixa de existir, pois não é mais uma barra terminal na configuração analisada. A Fig. 4.3 ilustra a configuração correspondente à situação apresentada pela Tabela 4.1. Verificamos que o índice da barra 12 é igual a 0,46931 pu, portanto é considerado maior que o índice crítico da configuração inicial (também da barra 12). Sendo assim, damos sequência à transferência de cargas fechando a linha 11-09 aberta anteriormente e abrindo a linha 08-09 ($a=8$, $k=9$, $p=5$ e $i=11$) e dessa forma transferimos as barras 9, 11 e 12 do alimentador 2 para o alimentador 1. Essa configuração é ilustrada na Fig. 4.2. Estimamos os valores das tensões para esta configuração novamente e calculamos os novos índices de estabilidade, obtendo os resultados mostrados na Tabela 4.2.

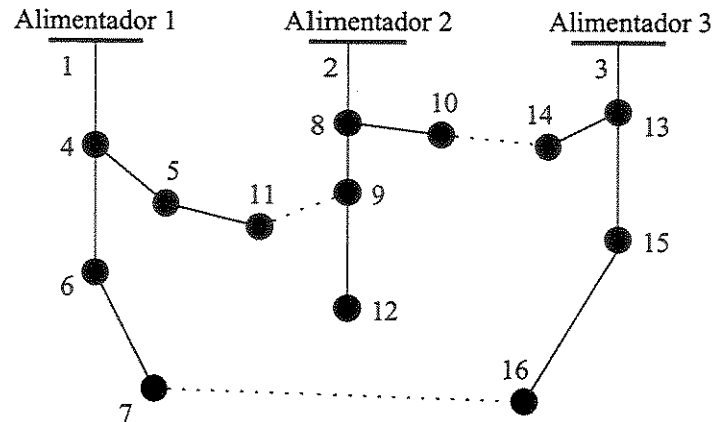


Figura 4.3: Sistema de 16 barras abrindo linha 09-11 e fechando linha 05-11.

Verificamos que o índice crítico da configuração descrita na Tabela 4.2 é menor que o índice crítico da configuração analisada anteriormente descrita na Tabela 4.1, portanto não damos mais sequência à transferência de cargas com o fechamento da linha 05-11, guardamos a configuração descrita na Tabela 4.1 e damos sequência ao processo de busca.

Tabela 4.2: Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 08-09 e fechando linha 05-11.

Barra	Índice TPSI [pu]
7	0,47721
10	0,48817
12	0,45580
14	0,49482
16	0,49126

Observando a Tabela 2.2 vemos que o próximo índice mais carregado é o índice da barra 10. Verificando que há possibilidade de aliviarmos o caminho 10, fechamos então a linha 14-10 e abrimos a linha 08-10, transferindo a barra 10 do alimentador 2 para o alimentador 3, situação que é ilustrada na Fig. 4.4. Nesse caso temos $a=8$, $k=10$, $p=14$ e $i=10$.

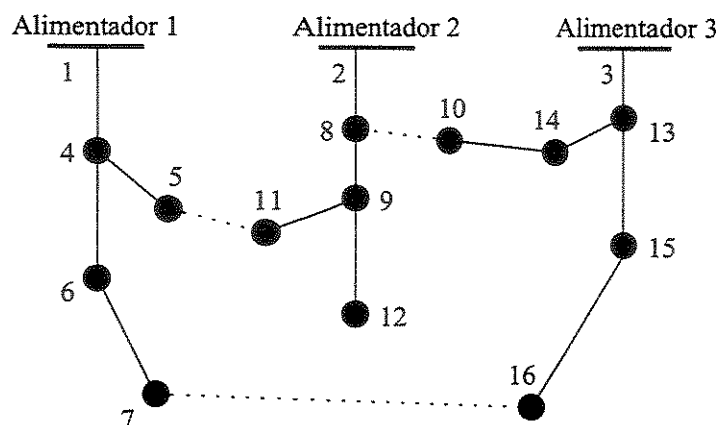


Figura 4.4: Sistema de 16 barras abrindo linha 08-10 e fechando linha 14-10.

Os novos índices de estabilidade obtidos são mostrados na Tabela 4.3. Verificando que o menor índice da nova configuração que é o índice da barra 12 igual a 0,47139 pu é maior que o menor índice da configuração inicial (Tabela 2.2), damos sequência à transferência de barras, fechando a linha 10-08 aberta anteriormente e abrindo a linha 02-08, ou seja, $a=2$, $k=8$, $p=14$ e $i=10$.

Tabela 4.3: Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 08-10 e fechando linha 14-10.

Barra	Índice TPSI [pu]
5	0,48776
7	0,48486
10	0,48988
11	0,47294
12	0,47139
16	0,48911

Nessa nova configuração ilustrada na Fig. 4.5, transferimos todas as barras do alimentador 2 para o alimentador 3, sendo que os novos índices calculados a partir das equações de estimativa do novo estado da rede são apresentados na Tabela 4.4.

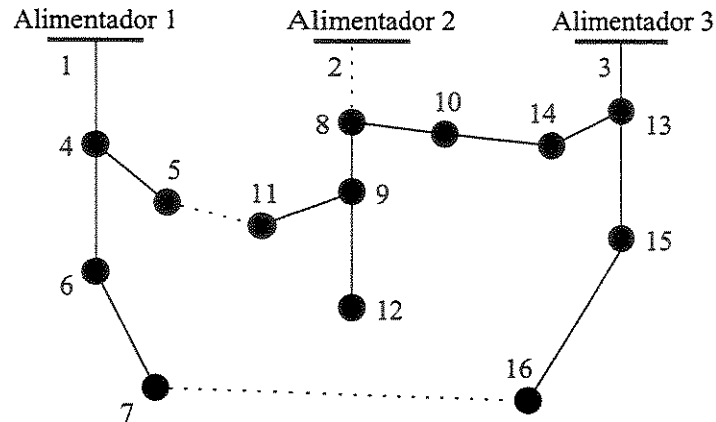


Figura 4.5: Sistema de 16 barras abrindo linha 02-08 e fechando linha 14-10.

Tabela 4.4: Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 02-08 e fechando linha 14-10.

Barra	Índice TPSI [pu]
5	0,48776
7	0,48486
11	0,47085
12	0,46931
16	0,49125

Observamos que o índice crítico na situação apresentada pela Fig. 4.5 (barra 12, 0,46931 pu) é menor que o índice crítico da configuração analisada anteriormente apresentada na Fig. 4.4, portanto não damos mais continuidade à transferência de cargas e armazenamos a configuração dada pela Fig. 4.4. Comparando com a configuração armazenada anteriormente (Fig. 4.3), vemos que esta apresenta um menor índice crítico (Tabela 4.1) que a última configuração armazenada (Tabela 4.3), dessa forma armazenamos apenas esta última, pois estamos interessados em maximizar o menor índice.

Mesmo quando já esgotamos as tentativas de aliviar o caminho mais carregado (como é o caso neste momento), tentamos a redistribuição de cargas entre os outros alimentadores ou caminhos de transmissão, mesmo carregando o alimentador mais carregado, pois pode haver situações em que mesmo transferindo barras para tal alimentador nós conseguimos bons resultados, porém esses casos são mais raros, prevalecendo as tentativas de alívio do alimentador ou caminho mais carregado (menor índice).

De acordo com a Tabela 2.2, o próximo caminho para tentarmos aliviar é o caminho 7 (o quarto mais carregado). Verificamos que existe essa possibilidade abrindo a linha 06-07 e fechando

a linha 16-07 ($a=6$, $k=7$, $p=16$ e $i=7$), conforme ilustra a Fig. 4.6 e cujos índices calculados após a estimativa do estado encontram-se na Tabela 4.5.

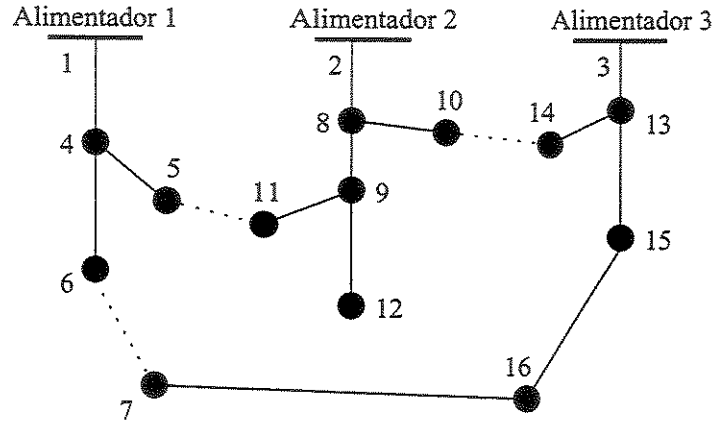


Figura 4.6: Sistema de 16 barras abrindo linha 06-07 e fechando linha 16-07.

Como a transferência de cargas se deu entre alimentadores diferentes daquele mais carregado, o índice crítico continuou o mesmo da configuração inicial (Tabela 2.2), e é o índice da barra 12 igual a 0,46926 pu. Passamos a avaliar então a diferença entre os índices envolvidos na transferência antes e após a reconfiguração.

Verificamos qual é o menor índice entre os caminhos que contém a barra k antes da reconfiguração, ou seja, a barra 7 neste caso, sendo então o próprio caminho 7 o único que satisfaz esta condição, e o menor índice entre os caminhos que contém a barra p antes da reconfiguração, ou seja, o índice do caminho 16, que é o único que satisfaz esta condição. A diferença entre os índices da barra 7 e 16 na configuração inicial é de 0,00640 pu. Verificamos também a diferença entre o menor dos índices pós-reconfiguração dentre os caminhos que contém a barra a e o menor dentre os que contém a barra p , que correspondem aos índices das barras 6 e 7 respectivamente, sendo a diferença de 0,01015 pu.

Tabela 4.5: Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 06-07 e fechando linha 16-07.

Barra	Índice TPSI [pu]
5	0,49013
6	0,49189
7	0,48174
10	0,47683
11	0,47080
12	0,46926
14	0,49180

Observamos então que a diferença entre os índices aumentou, portanto não corresponde a uma configuração válida para nós. Verificamos então se o menor dentre os índices analisados aumentou de valor, que é outra possibilidade para considerarmos uma configuração válida. O menor índice entre as barras 7 e 16 pré-reconfiguração é o índice da barra 7 (Tabela 2.2) que é igual a 0,48486 pu, porém o menor índice entre as barras 6 e 7 pós-reconfiguração é o índice da barra 7, igual a 0,48174 pu (Tabela 4.5). Portanto a configuração analisada não é válida.

Continuando o processo de busca, partindo da configuração inicial novamente (Tabela 2.2), o próximo caminho a tentarmos aliviar é o caminho 5 (quinto mais carregado). Podemos fechar a linha 11-05 e abrir a linha 04-05, passando a barra 5 do alimentador 1 para o alimentador 2 ($a=4$, $k=5$, $p=11$ e $i=5$). Esta configuração é ilustrada na Fig. 4.7 e os índices calculados após estimativa do estado estão na Tabela 4.6.

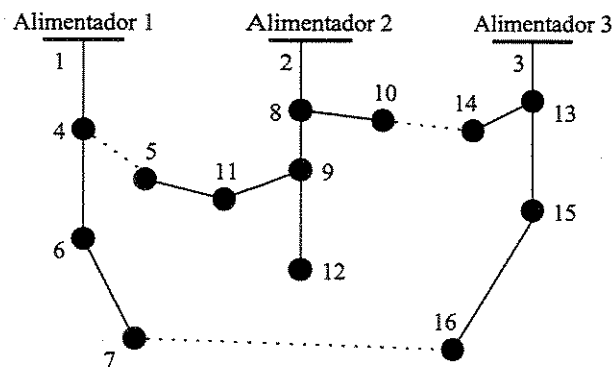


Figura 4.7: Sistema de 16 barras abrindo linha 04-05 e fechando linha 11-05.

Tabela 4.6: Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 04-05 e fechando linha 11-05.

Barra	Índice TPSI [pu]
5	0,45911
7	0,48755
10	0,47302
12	0,46267
14	0,49482
16	0,49125

Vemos claramente que o índice crítico (barra 5) diminuiu de valor em relação à configuração anterior (inicial). Desse modo, continuamos a busca e partindo novamente da configuração inicial verificamos que o próximo caminho mais carregado é o caminho 16 (sexto mais carregado), conforme vemos na Tabela 2.2. Fechamos então a linha 07-13 e abrimos a linha 15-16, transferindo a barra 16 do alimentador 3 para o alimentador 2 na primeira análise ($a=15$, $k=16$, $p=7$ e $i=16$). A Fig. 4.8 ilustra essa situação e a Tabela 4.7 mostra os índices calculados após estimativa do estado para essa configuração.

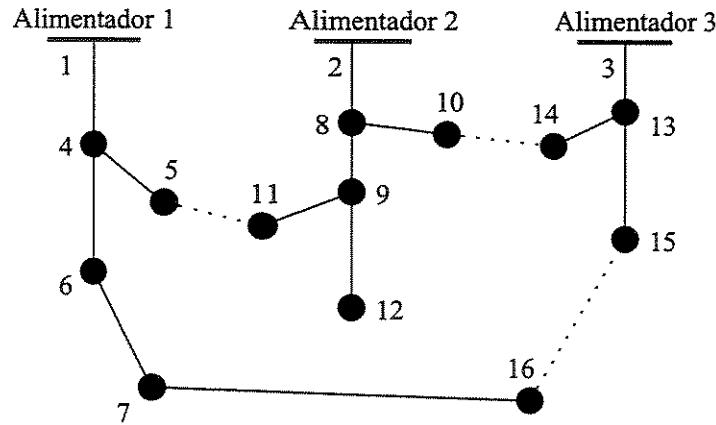


Figura 4.8: Sistema de 16 barras abrindo linha 15-16 e fechando linha 07-16.

Como não promovemos alteração no alimentador 2 que contém o caminho de índice mais carregado (barra 12), tal índice apresenta o mesmo valor (0,46926 pu). Verificando então as diferenças entre os índices como descrito anteriormente, observamos que a diferença aumenta de 0,00640 pu para 0,01188 pu, portanto não é uma configuração válida nesse critério. Observando se o menor dos índices envolvidos na transferência aumentou, verificamos que ele diminuiu de 0,48486 pu do caminho 7 (pré-reconfiguração) para 0,48219 pu do caminho 16 (pós-reconfiguração). Sendo assim, esta não é uma configuração válida e partimos para uma outra tentativa de reconfiguração.

Tabela 4.7: Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 15-16 e fechando linha 07-16.

Barra	Índice TPSI [pu]
5	0,48696
10	0,47683
11	0,47080
12	0,46926
14	0,49629
15	0,49407
16	0,48219

O próximo e último caminho mais carregado é o caminho 14 (maior índice), como vemos na Tabela 2.2. Para aliviá-lo, fechamos a linha 10-14 e abrimos a linha 13-14 num primeiro momento ($a=13$, $k=14$, $p=10$ e $i=14$), transferindo a barra 14 do alimentador 3 para o alimentador 2. A Fig. 4.9 ilustra essa situação e os índices calculados para ela após estimativa de estado estão na Tabela 4.8.

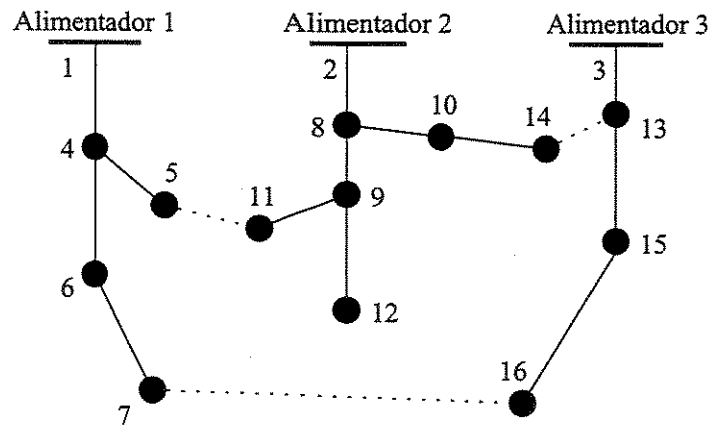


Figura 4.9: Sistema de 16 barras abrindo linha 13-14 e fechando linha 10-14.

Podemos observar que apesar de carregarmos o alimentador 2, que contém o caminho mais carregado (barra 12), tal índice aumenta em relação à configuração inicial, pois a barra transferida 14 fornece potência reativa, conforme verificamos nos dados da rede de 16 barras no apêndice A.1. Dessa forma, continuamos a transferência de carga fechando a linha 14-10 aberta anteriormente e abrindo a linha 03-13, transferindo todas as barras do alimentador 3 para o alimentador 2 ($a=3$, $k=13$, $p=10$ e $i=14$). Na Fig. 4.10 temos a ilustração dessa configuração e na Tabela 4.9 os índices calculados após estimativa do estado.

Tabela 4.8: Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 13-14 e fechando linha 10-14.

Barra	Índice TPSI [pu]
5	0,48776
7	0,48486
11	0,47092
12	0,46939
14	0,47710
16	0,49115

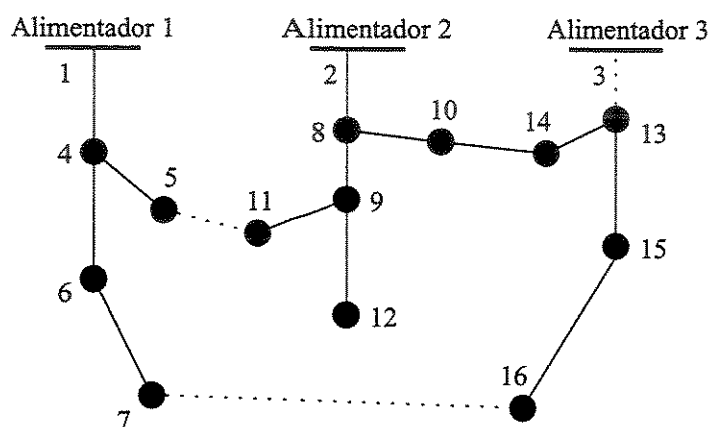


Figura 4.10: Sistema de 16 barras abrindo linha 03-13 e fechando linha 10-14.

Tabela 4.9: Índices TPSI estimados para o sistema de 16 barras abrindo linha 03-13 e fechando linha 10-14.

Barra	Índice TPSI [pu]
5	0,48776
7	0,48486
11	0,47080
12	0,46926
16	0,49116

Percebemos que o índice crítico (barra 12) da configuração ilustrada na Fig. 4.10 diminui de valor em relação à configuração analisada anteriormente (Tabela 4.8). Sendo assim, o processo de transferência de carga é interrompido e armazenamos a configuração anterior (Fig. 4.10). Comparando com a configuração armazenada anteriormente (Fig 4.4) verificamos que esta apresenta um

índice crítico maior (Tabela 4.3) que a configuração armazenada mais recentemente, portanto é a primeira que prevalece e esta última é descartada.

Verificando a possibilidade de alívio de todos os caminhos segundo nossos critérios estabelecidos, realizamos a melhor configuração encontrada, que está armazenada, sendo neste caso a configuração ilustrada na Fig. 4.4. Só então calculamos um fluxo de carga exato (método *back-and-forward sweep*) para encontrarmos o novo estado da rede e após isso, realizamos o mesmo processo de busca novamente até que não seja encontrada nenhuma reconfiguração válida.

Realizamos a análise de apenas 9 reconfigurações diferentes no primeiro processo de busca. Pelo método descrito em [4] seria necessário a análise de 27 configurações no primeiro processo de busca. Neste caso consideramos que todas as linhas podem ser abertas ou fechadas, mas podemos colocar restrições no algoritmo, em que apenas algumas linhas podem ser chaveadas, o que é mais próximo de sistemas reais e da análise em tempo real.

Capítulo 5

Resultados

Apresentamos neste capítulo os resultados obtidos pela nossa metodologia de reconfiguração, ou seja, todas as reconfigurações realizadas pelo algoritmo em cada processo de busca até a configuração final, quando o próximo processo de busca não encontra mais nenhuma configuração válida. As configurações iniciais (CI) e os respectivos dados das redes analisadas encontram-se nos apêndices. Em todos os casos consideramos que todas as linhas podem ser abertas ou fechadas, salvo quando explicitado o contrário. Neste capítulo não apresentamos testes com a inclusão da geração distribuída, que será objeto de estudo no próximo capítulo.

Utilizamos nos testes realizados nesse capítulo sempre o método de estimativa das tensões pós-reconfiguração para avaliarmos a validade das reconfigurações analisadas. Utilizando um fluxo de carga exato na análise de tais reconfigurações, quando não encontramos uma mesma configuração final, encontramos uma que apresenta um máximo fator de carregamento (λ^{max}) igual ou muito próximo do encontrado para a configuração resultante da análise pelo método aproximado, sendo esta diferença insignificante para fins práticos. Observaremos um desses exemplos com a rede de 136 barras.

Os valores de λ^{max} foram obtidos através de sucessivos fluxos de carga até o sistema atingir o colapso de tensão para verificarmos a validade da metodologia desenvolvida, e em procedimento separado da metodologia apresentada no capítulo anterior, uma vez que o método em si não verifica o valor de λ^{max} diretamente.

5.1 Rede de 16 barras

O sistema de 16 barras apresentado em [13] possui 3 linhas de interconexão e foi necessário a análise de 22 configurações até a apresentação da configuração final dada pela metodologia proposta, ou seja, o método aproximado de estimação de estado foi acionado apenas 22 vezes. Apresentamos na Tabela 5.1 as melhores configurações encontradas em cada processo de busca, assim como o máximo fator de carregamento de cada uma delas e as respectivas perdas de potência ativa.

Tabela 5.1: Resultados para a rede de 16 barras.

Conf.	a/f (*)	Linhas		Perdas [kW]
		Abertas	λ^{max}	
CI		14 15 16	6,257	511,41
01	07 15	07 14 16	6,494	483,93
02	08 14	07 08 16	6,704	466,18

(*) aberta/fechada em relação à configuração anterior

Neste caso obtivemos uma configuração final, igual à configuração final para a redução de perdas encontrada em [16] e em [17]. Neste último trabalho, em que utiliza-se o critério da queda de tensão, foi necessário a análise de 255 configurações, excedendo em mais de 11 vezes o número de análises realizadas pelo método aqui proposto.

Verificamos claramente o contínuo aumento do máximo fator de carregamento da rede, acompanhado de uma contínua redução de perdas. Observamos na Fig. 5.1 uma maior uniformidade nas tensões dos barramentos da rede para a configuração final (configuração 02 da Tabela 5.1), mostrada na Fig. 5.2, em relação à inicial, ou seja, uma melhora no perfil de tensão nas barras mais críticas (menores tensões) acompanhada de uma queda nas tensões em barras mais “folgadas” (maiores tensões).

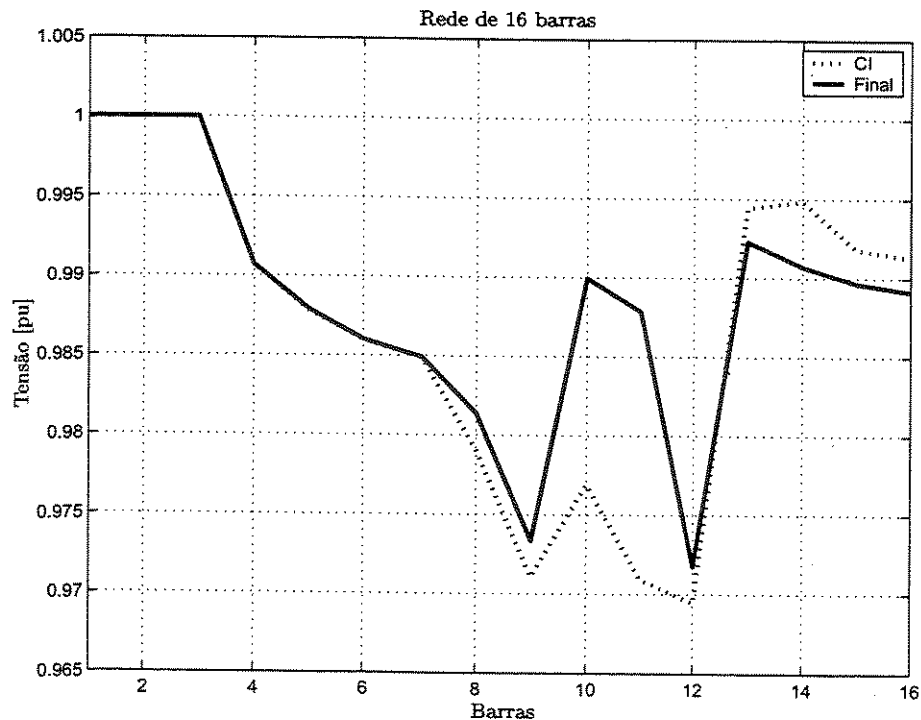


Figura 5.1: Tensões nos barramentos para a rede de 16 barras.

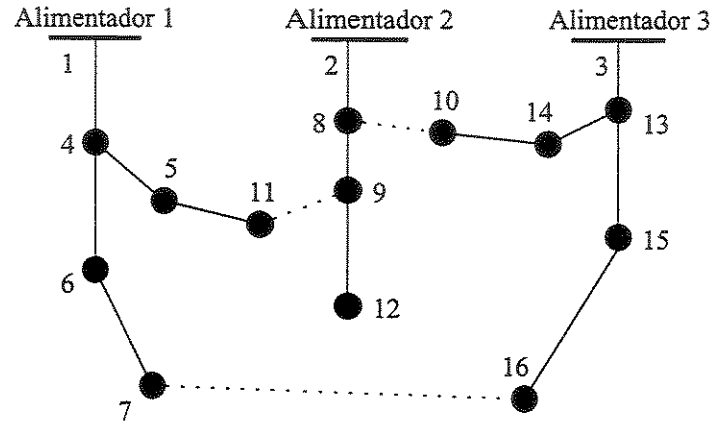


Figura 5.2: Configuração final para a rede de 16 barras.

5.2 Rede de 33 barras

O sistema de 33 barras apresentado em [18] possui 5 linhas de interconexão e foi necessário a análise de 79 configurações até a apresentação da configuração final. Na Tabela 5.2 mostramos os resultados encontrados com a aplicação do método proposto.

Tabela 5.2: Resultados para a rede de 33 barras.

Conf.	a/f (*)	Linhas						Perdas [kW]	
		Abertas							
		λ^{max}							
CI		33 34 35 36 37	3,622						202,66
01	<u>07/35</u>	07 33 34 36 37	4,578						156,54
02	<u>28/37</u>	07 28 33 34 36	4,715						156,28
03	<u>10/33</u>	07 10 28 34 36	4,975						144,86
04	<u>32/36</u>	07 10 28 32 34	5,026						143,94
05	<u>14/34</u>	07 10 14 28 32	5,234						140,71

(*) aberta/fechada em relação à configuração anterior

Percebemos mais uma vez, de acordo com a Tabela 5.2, o aumento contínuo de λ^{max} acompanhado de uma contínua diminuição nas perdas do sistema. Neste caso, a configuração final apresentada pelo nosso método é diferente da configuração final apresentada por [16] e [17] para diminuição de perdas, que corresponde às chaves abertas 07-09-14-32-37, em ambos os trabalhos, com perdas de 139,55 kW e λ^{max} de 4,871. Esta configuração apresenta perdas de potência ativa

apenas 0,8% menores mas λ^{max} 7% inferior ao λ^{max} apresentado pela configuração final resultante da nossa metodologia.

Em [17] são analisadas 5633 configurações para se chegar ao resultado final, mais de 71 vezes o número de configurações analisadas pelo nosso método, mostrando mais uma vez a eficiência do mesmo. Na Fig. 5.3 observamos a maior uniformidade das tensões nas barras do sistema da configuração final em relação à inicial.

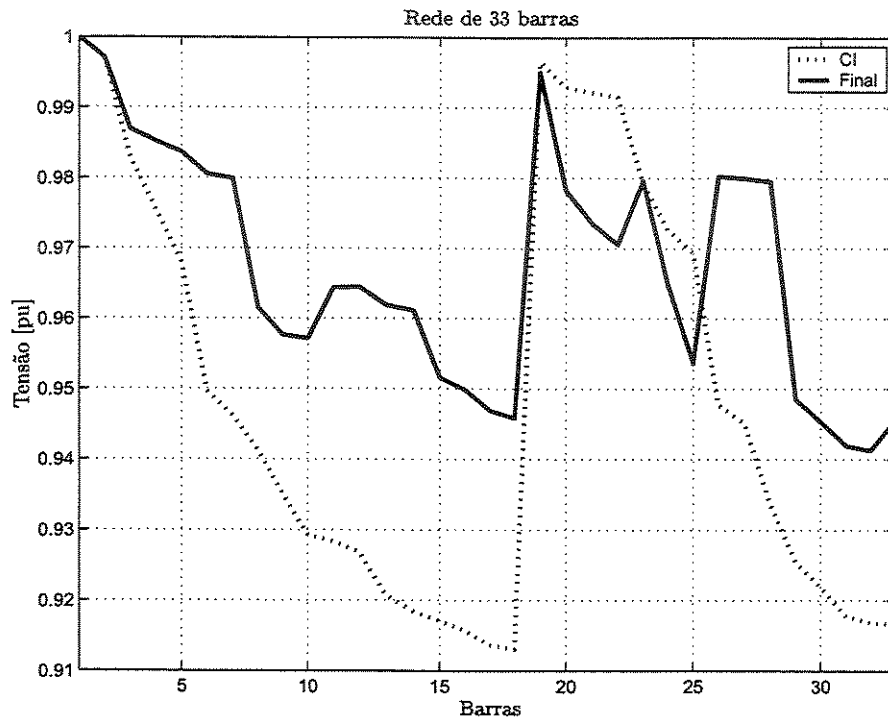


Figura 5.3: Tensões nos barramentos para a rede de 33 barras.

5.3 Rede de 70 barras

O sistema de 70 barras apresentado em [19] possui 5 linhas de interconexão e foi necessário a análise de 74 configurações até a apresentação da configuração final. Na Tabela 5.3 mostramos os resultados encontrados com a aplicação do método proposto.

Tabela 5.3: Resultados para a rede de 70 barras.

Conf.	a/f (*)	Linhas					Perdas [kW]
		Abertas					
		λ^{max}					
CI		70	71	72	73	74	9,889
01	<u>62/74</u>	62	70	71	72	73	11,810
02	<u>57/73</u>	57	62	70	71	72	15,036
03	<u>14/72</u>	14	57	62	70	71	15,041
04	<u>58/57</u>	14	58	62	70	71	15,041

(*) aberta/fechada em relação à configuração anterior

Observamos neste caso que há uma situação em que o λ^{max} não aumenta de uma configuração para outra, conforme verificamos na Tabela 5.3 com a alteração da topologia da rede da configuração 03 para a configuração final 04. A reconfiguração ocorre neste caso redistribuindo carga e abrindo novas possibilidades de chaveamento, embora não tenha ocorrido uma diminuição nas perdas e não tenha sido encontrada uma configuração melhor a partir da configuração 04. Na Fig. 5.4 verificamos mais uma vez uma maior uniformidade das tensões nas barras do sistema da configuração final em relação à inicial.

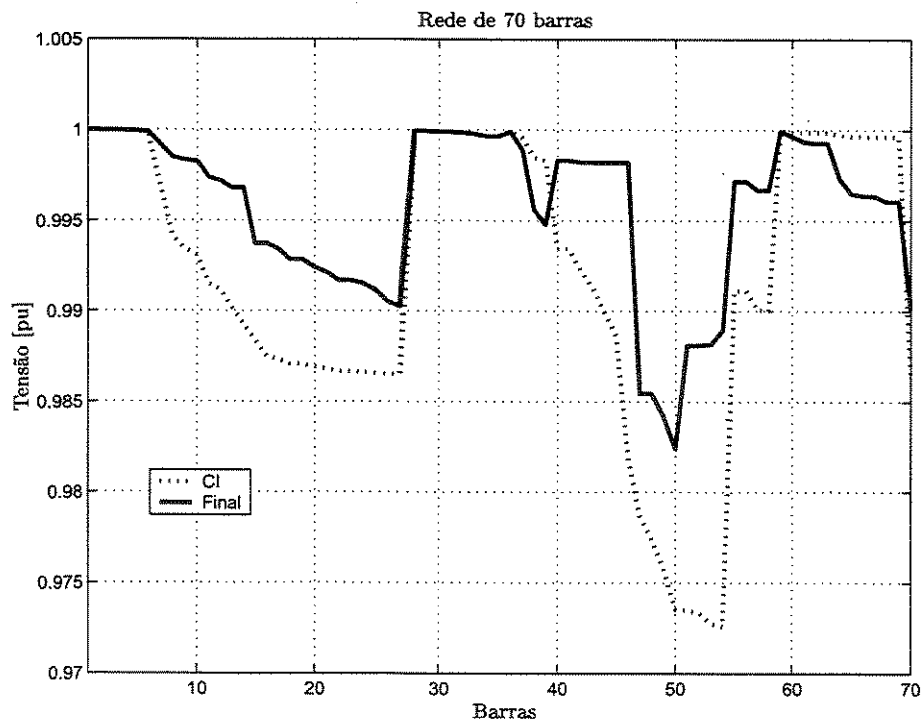


Figura 5.4: Tensões nos barramentos para a rede de 70 barras.

Em [17] a melhor configuração encontrada para diminuição de perdas corresponde às chaves abertas 15-56-62-70-71, com perdas de 9,41 kW e λ^{max} de 15,041, que é igual ao λ^{max} da configuração final dada pelo método proposto, porém em [17] foi necessário a análise de 1145 configurações, o que representa mais de 15 vezes o número de configurações analisadas pela nossa metodologia. Em [4] a configuração final apresentada para o aumento da margem de estabilidade de tensão corresponde às chaves abertas 15-59-62-70-71, com perdas de 9,41 kW e λ^{max} de 15,041, ou seja, o mesmo valor encontrado pelo nosso método. Porém em [4] é necessário a análise de 243 configurações (3^5) apenas na primeira busca, sendo que foi necessário 5 processos de busca até a apresentação da configuração final.

5.4 Rede de 136 barras

O sistema real de 136 barras da cidade de Três Lagoas (MS) apresentado em [17] possui 21 linhas de interconexão e foi necessário a análise de apenas 286 configurações até a apresentação da configuração final. Na Tabela 5.4 mostramos os resultados encontrados com a aplicação do método proposto.

Tabela 5.4: Resultados para a rede de 136 barras.

Conf.	a/f (*)	Linhas Abertas	λ^{max}	Perdas [kW]
CI		136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156	3,695	320,25
01	106/153	106 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	6,530	286,72
02	051/140	051 106 136 137 138 139 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	6,530	285,70
03	053/142	051 053 106 136 137 138 139 141 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	6,530	285,21
04	119/143	051 053 106 119 136 137 138 139 141 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	6,773	284,79
05	038/139	038 051 053 106 119 136 137 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	6,773	284,46

(*) aberta/fechada em relação à configuração anterior

Neste caso percebemos que foram realizadas várias reconfigurações que não resultaram em aumento do λ^{max} mas sim em diminuição das perdas e ainda possibilitando uma reconfiguração que aumentou o λ^{max} posteriormente. Observamos na Fig. 5.5 uma melhor uniformidade no perfil das tensões nas barras da configuração final em relação à inicial, verificando o aumento considerável da

tensão mínima.

Em [16], a melhor configuração para diminuição de perdas encontrada corresponde às chaves abertas 07-35-51-90-96-106-118-126-135-137-138- 141-141-144-145-146-147-148-150-151-155, com perdas de 280,13 kW, 1,52% menores que as perdas finais da Tabela 5.4. Obteve-se também λ^{max} de 5,793, que é 14,5% menor que o λ^{max} da configuração final dada pelo nosso método.

Em [17] é necessário a análise de 40051 configurações para a apresentação da configuração final para diminuição de perdas utilizando critério da queda de tensão, ou seja, mais de 140 vezes o número de configurações analisadas pela nossa metodologia para a melhoria das condições de estabilidade de tensão. Neste caso, o método apresentado em [4], também para melhoria da estabilidade de tensão, se mostra inviável, pois seria necessário a análise de 3^{21} configurações apenas no primeiro processo de busca, enquanto que com o nosso método foi necessário a análise de apenas 55 configurações no primeiro processo de busca.

Neste caso, se utilizarmos o fluxo de carga exato em todas as análises de reconfigurações e não mais o aproximado, obteremos um resultado diferente, como observamos na Tabela 5.5. A diferença no resultado em relação ao uso do método aproximado é, além do tempo computacional ser 67% maior com o fluxo de carga exato, a ordem trocada dos chaveamentos que resultam nas configurações 02 e 03 da Tabela 5.4 e ainda a realização de um chaveamento adicional (Configuração 06 da Tabela 5.5) que não resulta em aumento de λ^{max} , apenas diminui perdas. O perfil de tensão das barras praticamente não se modifica com este último chaveamento.

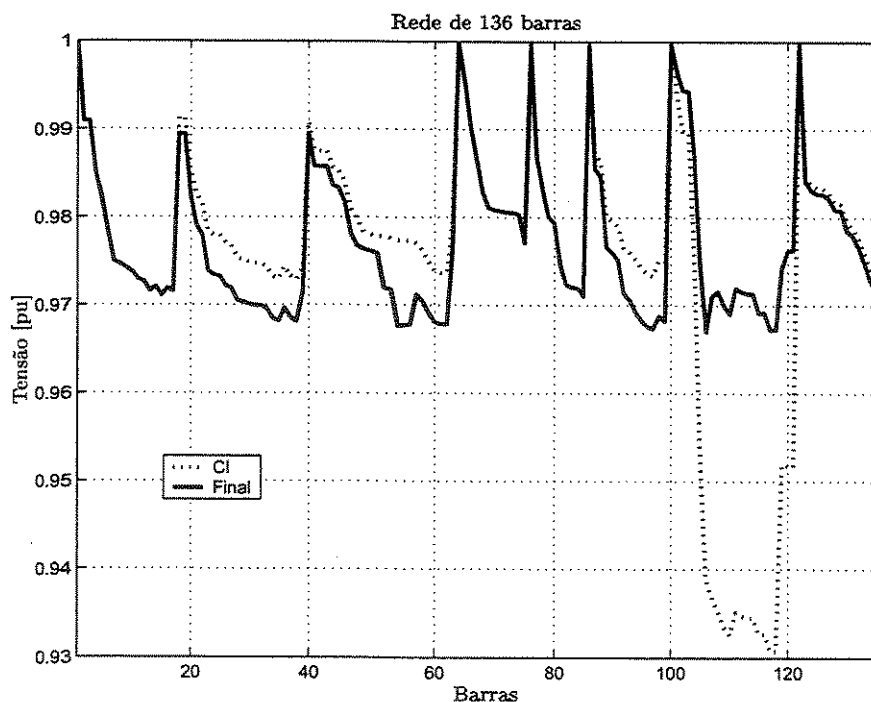


Figura 5.5: Tensões nos barramentos para a rede de 136 barras.

Tabela 5.5: Resultados para a rede de 136 barras utilizando o fluxo de carga exato em todas as análises.

Conf.	a/f (*)	Linhas Abertas	λ^{max}	Perdas [kW]
CI		136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156	3,695	320,25
01	106/153	106 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	6,530	286,72
02	053/142	053 106 136 137 138 139 140 141 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	6,530	285,70
03	051/140	051 053 106 136 137 138 139 141 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	6,530	285,21
04	119/143	051 053 106 119 136 137 138 139 141 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	6,773	284,79
05	038/139	038 051 053 106 119 136 137 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	6,773	284,46
06	007/136	007 038 051 053 106 119 137 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	6,773	283,79

(*) aberta/fechada em relação à configuração anterior

5.5 Rede de 202 barras

O sistema real de 202 barras da cidade de Guarujá (SP) possui 48 chaves de interconexão fechadas e 15 chaves de interconexão abertas. Neste caso só podemos realizar chaveamentos com estas 63 chaves disponíveis e não mais com qualquer uma das linhas como vínhamos fazendo até agora. Outras restrições como o limite de corrente nas linhas ou a queda de tensão nos barramentos podem ser facilmente adicionadas ao algoritmo e, nos casos em que algum dos limites é violado, a reconfiguração analisada é rejeitada e o programa continua a busca por outros possíveis chaveamentos. Foi necessário a análise de 85 configurações para apresentarmos a configuração final. Observamos na Tabela 5.6 os resultados encontrados para esta rede.

Na Fig. 5.6 mostramos o perfil de tensão nas barras antes e após a aplicação do método proposto e verificamos, embora sendo pequena a diferença, uma maior uniformidade nas tensões. Apesar de pequena a diferença entre as tensões das barras observamos um grande aumento de λ^{max} conforme é mostrado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Resultados para a rede de 202 barras.

Conf.	a/f (*)	Linhas Abertas	λ^{max}	Perdas [kW]
CI		202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216	6,349	504,18
01	<u>199/214</u>	199 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 215 216	6,617	500,33
02	<u>183/210</u>	183 199 202 203 204 205 206 207 208 209 211 212 213 215 216	6,617	498,42

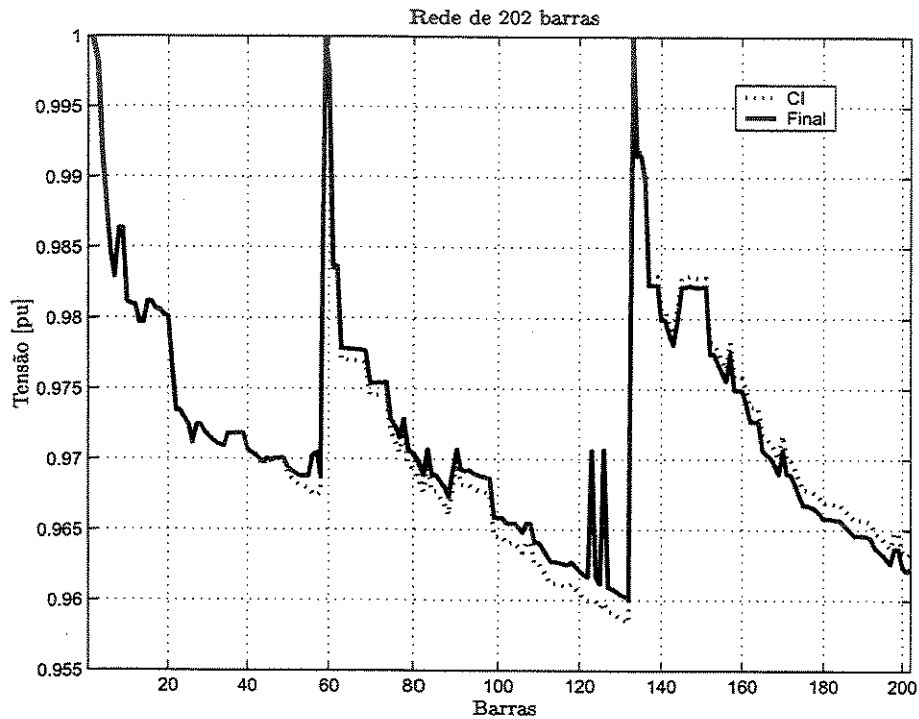
(*) aberta/fechada em relação à configuração anterior

Figura 5.6: Tensões nos barramentos para a rede de 202 barras.

5.6 Redes carregadas

Até agora a metodologia proposta foi aplicada a redes que apresentavam margens de estabilidade de tensão muito grandes, ou seja, operavam com carga leve. Visando testar a validade do algoritmo em redes carregadas, multiplicamos todas as cargas das redes testadas deste capítulo pelo

fator de carregamento λ , diferente em cada caso, de forma a deixarmos as redes com margens de estabilidade de tensão pequenas e só então aplicarmos a metodologia.

5.6.1 Rede de 70 barras

Observamos na Fig. 5.7 a variação dos valores do índice TPSI para as barras terminais do sistema com o carregamento da rede e verificamos que o λ^{max} é igual a 9,889 e é determinado pelo caminho 51. Os valores do TPSI para os caminhos 28 e 68 são praticamente os mesmos e o marcador do caminho 28 está um pouco deslocado apenas para facilitar a visualização.

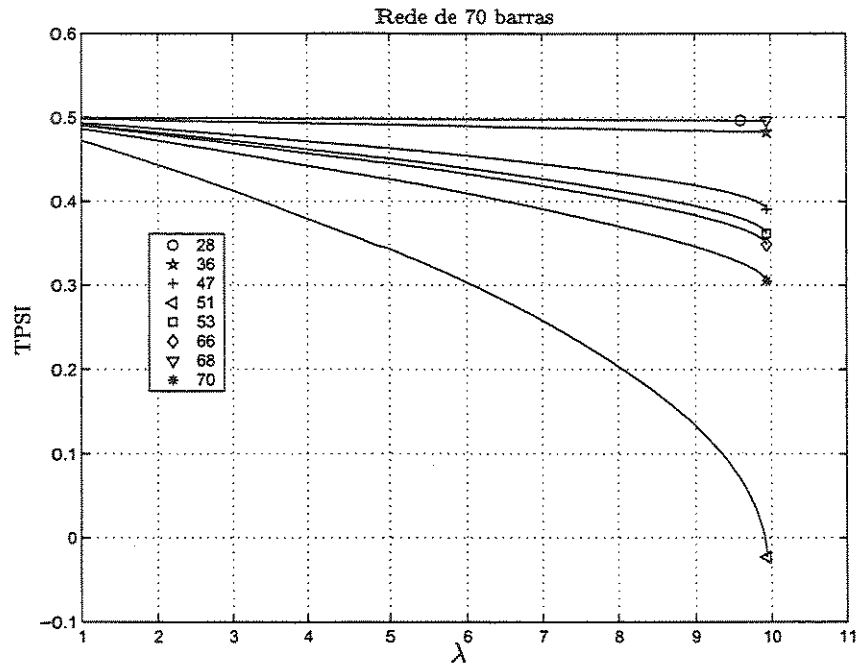


Figura 5.7: Variação do TPSI com o carregamento para a rede de 70 barras (configuração inicial).

Com um λ igual a 9,4 deixamos a rede com uma margem de estabilidade de tensão de 5,7% para a configuração inicial. A partir disso, aplicamos a metodologia de reconfiguração e verificamos os resultados apresentados na Tabela 5.7.

Comparando os resultados da Tabela 5.7 com os da Tabela 5.3 verificamos que apenas a ordem dos chaveamentos das configurações 01 e 02 estão trocadas, e atingi-se a mesma configuração final nos dois casos. Observa-se também o crescente aumento de λ^{max} na Tabela 5.7 e o decrescente valor das perdas como na Tabela 5.3.

Tabela 5.7: Resultados para a rede carregada ($\lambda = 9,4$) de 70 barras.

Conf.	a/f (*)	Linhas					λ^{max} (**)	Perdas [kW]
		Abertas						
CI		70	71	72	73	74	1,057	4235,5
01	<u>57/73</u>	57	70	71	72	74	1,286	1832,5
02	<u>62/74</u>	57	62	70	71	72	1,599	1579,9
03	<u>14/72</u>	14	57	62	70	71	1,600	1159,5
04	<u>58/57</u>	14	58	62	70	71	1,600	1159,5

(*) aberta/fechada em relação à configuração anterior

(**) Em relação à rede carregada

5.6.2 Rede de 136 barras

Para esta rede, com um λ igual a 3,5 deixamos a rede com uma margem de estabilidade de tensão de 5,5% para a configuração inicial. Os resultados da aplicação do nosso algoritmo, partindo da configuração inicial encontram-se na Tabela 5.8. Podemos observar que as 3 primeiras reconfigurações são as mesmas, tanto para o caso base (Tabela 5.4) quanto para a rede carregada.

Tabela 5.8: Resultados para a rede carregada ($\lambda = 3,5$) de 136 barras.

Conf.	a/f (*)	Linhas										λ^{max} (**)	Perdas [kW]
		Abertas											
CI		136	137	138	139	140	141	142	1,055	5771,0			
		143	144	145	146	147	148	149					
		150	151	152	153	154	155	156					
01	106/153	106	136	137	138	139	140	141	1,865	4188,4			
		142	143	144	145	146	147	148					
		149	150	151	152	154	155	156					
02	051/140	051	106	136	137	138	139	141	1,865	4170,9			
		142	143	144	145	146	147	148					
		149	150	151	152	154	155	156					
03	053/142	051	053	106	136	137	138	139	1,865	4142,6			
		141	143	144	145	146	147	148					
		149	150	151	152	154	155	156					
04	118/143	051	053	106	118	136	137	138	1,957	4127,8			
		139	141	144	145	146	147	148					
		149	150	151	152	154	155	156					
05	038/139	038	051	053	106	118	136	137	1,957	4118,7			
		138	141	144	145	146	147	148					
		149	150	151	152	154	155	156					
06	007/136	007	038	051	053	106	118	137	1,957	4104,3			
		138	141	144	145	146	147	148					
		149	150	151	152	154	155	156					

(*) aberta/fechada em relação à configuração anterior

(**) Em relação à rede carregada

Podemos partir também não da configuração inicial, mas sim da configuração final dada pelo caso base (Configuração 05, Tabela 5.4), porém com um λ de 6,3, o que deixa o sistema com uma margem de estabilidade de tensão de 7,5%. Os resultados para este caso encontram-se na Tabela 5.9.

Pelos resultados das Tabelas 5.8 e 5.9 percebemos que obtivemos configurações finais com maiores λ^{max} que o da configuração final encontrada para o caso base que é de 6,773 (Tabela 5.4), pois as configurações finais das Tabelas 5.8 e 5.9 apresentam para o caso base ($\lambda = 1$) valores de λ^{max} respectivamente de 6,851 e 6,958. Isto se deve ao fato de que nem sempre o menor dos índices na configuração inicial irá determinar o λ^{max} da rede devido à perda da característica linear do índice TPSI ao se aproximar do colapso de tensão.

Por exemplo, observamos na Fig. 5.8 a variação do índice TPSI em função do carregamento para a rede de 136 barras apenas para as barras terminais 116 e 119 da configuração final dada pela Tabela 5.4 e vemos que quando a rede se aproxima do colapso de tensão, o índice da barra 119 passa a ser menor que o índice da barra 116, sendo que no caso base ele era maior. Portanto, o método proposto fornecerá melhores resultados (configurações com maiores λ^{max}) com redes carregadas, sendo que os resultados serão tanto melhores quanto mais próximo do colapso o sistema se encontrar, pois trabalharemos com valores dos índices nas suas regiões de maior não-linearidade e podemos atingir nesses casos configurações com maiores capacidades de carregamento, que são difíceis de serem previstas em situações de carga leve, onde o índice apresenta um comportamento mais linear.

Tabela 5.9: Resultados para a rede carregada ($\lambda = 6,3$) de 136 barras partindo da configuração final dada pelo caso base.

Conf.	a/f (*)	Linhas Abertas	λ^{max} (**)	Perdas [kW]
CI		038 051 053 106 119 136 137 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	1,075	18375,1
01	<u>118/119</u>	038 051 053 106 118 136 137 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	1,104	18239,1
02	<u>096/141</u>	038 051 053 096 106 118 136 137 138 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	1,104	18151,4
03	<u>007/136</u>	007 038 051 053 096 106 118 137 138 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	1,104	18008,4
04	<u>141/152</u>	007 038 051 053 096 106 118 137 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151 154 155 156	1,104	17996,4

(*) aberta/fechada em relação à configuração anterior

(**) Em relação à rede carregada

O mesmo não acontece para a rede de 70 barras analisada anteriormente. Observamos na Fig. 5.9 o comportamento do índice TPSI com o carregamento da configuração final dada pela Tabela 5.7 e verificamos que não ocorre nenhum cruzamento entre os valores do TPSI até o colapso de tensão. Nesse caso espera-se, como de fato ocorreu, que a configuração final encontrada pelo algoritmo proposto seja a mesma tanto para carga leve como para a rede bastante carregada.

Levando em conta que:

- o método proposto obtém uma solução final com margem de segurança ao colapso de tensão significativamente maior, e com perdas um pouco maiores que os métodos de redução de perdas existentes na literatura;
- o método proposto apresenta melhores resultados para redes carregadas,

pode-se propor que, na condição de carga leve seja dada prioridade à redução de perdas e na condição de carga pesada seja dada prioridade ao aumento da margem de segurança. Esta solução apresenta um balanço entre fatores econômicos e de operação da rede.

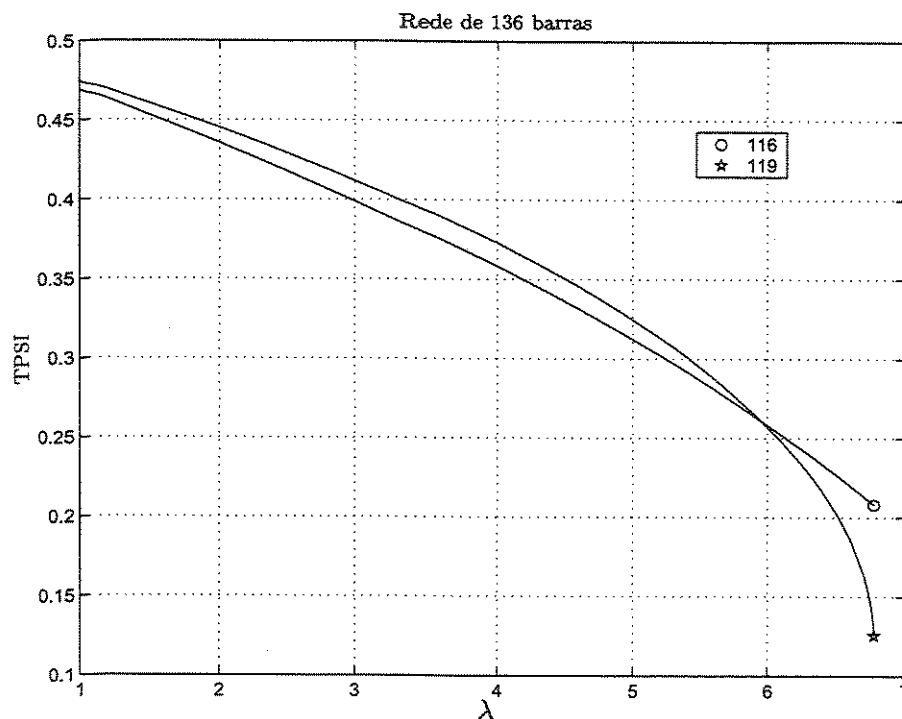


Figura 5.8: Variação do TPSI com o carregamento para a rede de 136 barras para as barras terminais 116 e 119 (configuração 05 da Tabela 5.4)

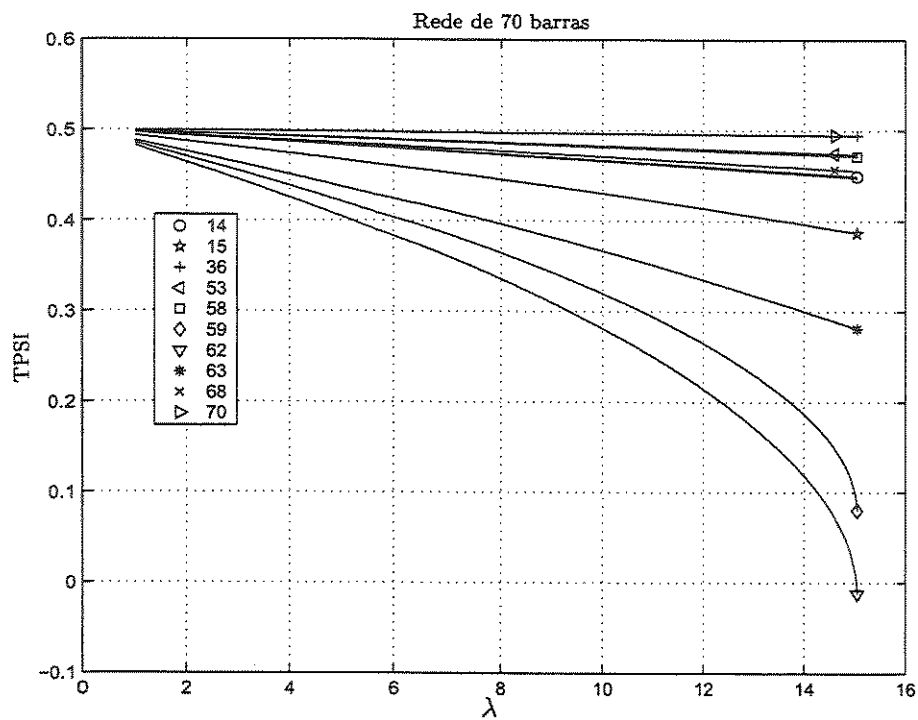


Figura 5.9: Variação do TPSI com o carregamento para a rede de 70 barras (configuração 04 da Tabela 5.3).

Capítulo 6

Impacto da geração distribuída

Neste capítulo, verificaremos o impacto da inserção da geração distribuída nos resultados com a aplicação da metodologia proposta, ou seja, observaremos a mudança na sequência de chaveamentos até a apresentação da configuração final para as redes testadas em comparação com os resultados obtidos nos capítulos anteriores.

6.1 Geração distribuída

Nos últimos anos tem-se notado uma tendência de aumento da inserção de geradores independentes na rede elétrica. Geradores independentes, de acordo com a definição proposta em [15], são “fontes de potência elétrica conectadas diretamente à rede de distribuição ou junto ao medidor do consumidor”.

Devido à grande variação de definições em torno da geração distribuída na literatura, são discutidos vários tópicos a fim de definirmos a geração distribuída mais precisamente [15]:

A) Objetivos:

O objetivo da geração distribuída é oferecer uma fonte adicional de potência ativa. Os geradores independentes não precisam fornecer necessariamente potência reativa.

B) Localização:

Os geradores independentes podem estar conectados diretamente à rede de distribuição ou conectados junto ao medidor do consumidor. A motivação para usarmos esta definição é que a conexão de unidades de geração em redes de transmissão é feita tradicionalmente pela indústria. A idéia central da geração distribuída é localizar os geradores perto da carga, ou seja, à rede de distribuição ou junto ao medidor do consumidor.

C) Potência gerada (P_G):

As categorias de geração distribuída sugeridas em [15] são as seguintes:

Micro: $\sim 1 \text{ W} < P_G < 5 \text{ kW}$

Pequena: $5 \text{ kW} < P_G < 5 \text{ MW}$

Média: $5 \text{ MW} < P_G < 50 \text{ MW}$

Grande: $50 \text{ MW} < P_G < 300 \text{ MW}$

D) Área de suprimento:

Em geral, a potência gerada pelos geradores independentes é consumida na própria rede de distribuição em que eles estão instalados. Existem casos, porém, de geradores independentes que exportam potência para outras redes de distribuição sob certas circunstâncias como, por exemplo, uma unidade de geração eólica em um período de baixa demanda e de fortes ventos.

E) Tecnologia:

As tecnologias utilizadas na geração independente são as mais variadas. Como exemplo de fontes de energia temos o gás natural, a água, o vento, o sol, a biomassa, fontes geotérmicas, que são utilizadas pelas tecnologias de motores de combustão interna, de células fotovoltaicas, de células de combustíveis, entre outras.

F) Impacto ambiental:

A geração distribuída parece tender a utilizar tecnologias que resultam em um menor impacto ambiental que as grandes usinas geradoras de energia elétrica.

G) Modo de operação:

Existem regulamentações variadas a esse respeito, no que se refere a planejamento da operação, planejamento de preços, despacho de carga, etc. Em geral, os geradores independentes não são obrigados a obedecerem instruções relativas ao despacho de carga por parte do operador do sistema.

H) Propriedade:

Há uma tendência dos geradores independentes não terem ligações com as companhias produtoras de energia em grande escala.

I) Penetração da geração distribuída:

Embora atualmente os geradores independentes sejam capazes de suprir uma pequena parcela da demanda de uma rede de distribuição, estudos mostram que esta parcela tende a aumentar muito, aumentando portanto a penetração da geração distribuída.

A integração da geração distribuída à rede de distribuição é um trabalho muito complexo, podendo ser significativamente diferente da tradicional integração de geradores de potência em redes de transmissão. Portanto será preciso muita pesquisa para se analisar o impacto da geração distribuída na segurança e operação econômica em sistemas de distribuição. No nosso presente trabalho apenas verificamos alguns impactos da inserção de geradores independentes na margem de estabilidade de tensão da rede e consequentemente na reconfiguração da mesma.

6.2 Inserção de geradores sem controle de tensão

Nesta seção verificaremos o impacto e a validade do algoritmo com a inserção de geradores sem controle de tensão, ou seja, atuando como barras PQ no sistema. Quando conectamos geradores deste tipo à barras que consomem uma potência maior do que a capacidade de geração do gerador, a rede se comporta como se ocorresse um corte de carga naquela barra e a metodologia de reconfiguração continua sendo válida e apresentando bons resultados, conforme observaremos no próximo exemplo.

6.2.1 Rede de 33 barras

Inserindo geradores sem controle de tensão nas barras 18, 25 e 30, gerando apenas potência ativa nos valores de 80 kW, 300 kW e 150 kW respectivamente, sendo portanto potências inferiores ao consumo de cada barra, observamos os resultados da aplicação do algoritmo na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Resultados para a rede de 33 barras.

Conf.	a/f (*)	Linhas					$\lambda^{max}(**)$	$\lambda^{max}(***)$	Perdas [kW]
		Abertas							
CI		33	34	35	36	37	3,985	3,716	163,11
01	07/ <u>35</u>	07	33	34	36	37	4,999	4,664	127,12
02	27/ <u>37</u>	07	27	33	34	36	5,162	4,802	123,59
03	10/ <u>33</u>	07	10	27	34	36	5,641	5,001	113,39
04	28/ <u>27</u>	07	10	28	34	36	5,790	5,120	110,92
05	06/ <u>07</u>	06	10	28	34	36	5,835	5,159	116,81
06	14/ <u>34</u>	06	10	14	28	36	5,842	5,162	116,40

(*) aberta/fechada em relação à configuração anterior

(**) Aumento da geração proporcional à carga

(***) Mantendo a geração fixa

Comparando os resultados da Tabela 6.1 com os da Tabela 5.2 percebemos que a configuração final apresentada é diferente, os λ^{max} apresentados em cada configuração encontrada são maiores com a inserção da geração com o aumento da mesma proporcional à carga do que sem ela ou mantendo o valor da geração fixa. Observamos também que da configuração 04 para a 05 da Tabela 6.1 o λ^{max} continuou aumentando porém as perdas também, mostrando mais uma vez que as perdas não necessariamente diminuem com o aumento de λ^{max} em uma reconfiguração.

Porém quando mantemos a geração fixa, obtivemos uma configuração final com um valor de λ^{max} inferior ao λ^{max} da configuração final encontrada sem a inserção da geração distribuída (ou simplesmente corte de carga neste caso), enquanto que esperávamos que ocorresse justamente o contrário. A explicação para este fato é que especificamente neste caso, apesar de termos obtido bons resultados com o crescente aumento de λ^{max} nos dois casos (geração fixa ou não), a metodologia atingiu um ótimo local, pois mesmo aplicando a metodologia com a rede carregada, obteremos os mesmos chaveamentos.

Mesmo que a geração não seja inserida no alimentador ou caminho de transmissão que possui o menor índice de estabilidade, poderá ocorrer aumento de λ^{max} se houver a possibilidade de transferência de carga do alimentador/caminho mais carregado para o alimentador/caminho no qual foi inserida a geração independente e com isso aumentarmos o valor do menor dos índices pós-reconfiguração se antes da inserção isso não era possível. Isto será demonstrado com um exemplo para a rede de 202 barras mais adiante.

Verificaremos agora o impacto da inserção de geradores distribuídos que geram uma potência maior do que a potência consumida pela barra na qual são conectados, ou seja, exportando potência para o sistema. Para isso, conectamos geradores nas mesmas barras do exemplo anterior, 18, 25 e 30, injetando potências de 190 kW, 300 kW e 400 kW respectivamente. Com isso, os geradores conectados às barras 18 e 30 passam a exportar potência ativa para a rede. Os resultados da aplicação do algoritmo para este caso encontram-se na Tabela 6.2. Na Fig. 6.1 observamos o comportamento dos valores dos índices TPSI em função do carregamento λ para a rede de 33 barras em sua configuração inicial para esse caso, aumentando a geração conforme a carga, e verificamos que a análise pelos índices no que diz respeito à proximidade do colapso de tensão continua sendo válida.

Tabela 6.2: Resultados para a rede de 33 barras.

Conf.	a/f (*)	Linhas					$\lambda^{max}(**)$	$\lambda^{max}(***)$	Perdas [kW]
		Abertas							
CI		33	34	35	36	37	4,538	3,842	130,14
01	<u>07/35</u>	07	33	34	36	37	5,669	4,784	104,07
02	<u>27/37</u>	07	27	33	34	36	5,756	4,919	102,29
03	<u>10/33</u>	07	10	27	34	36	6,287	5,101	93,663
04	<u>17/36</u>	07	10	17	27	34	6,481	4,878	96,112
05	<u>28/27</u>	07	10	17	28	34	6,658	4,986	94,491
06	<u>14/34</u>	07	10	14	17	28	6,669	4,987	93,019

(*) aberta/fechada em relação à configuração anterior

(**) Aumento da geração proporcional à carga

(***) Mantendo a geração fixa

Observamos pela Tabela 6.2 o contínuo aumento de λ^{max} com o aumento da geração proporcional à carga. Porém o mesmo não ocorre com a geração fixa, como podemos observar na Tabela 6.2 da configuração 03 para a 04. Isso pode ocorrer pois quando não aumentamos a geração proporcionalmente à carga nós perdemos também a proporcionalidade entre os índices TPSI com o aumento do carregamento. Por exemplo, no caso base ($\lambda = 1$), em que a metodologia foi aplicada para se obter os resultados da Tabela 6.2, a barra 18 exporta 100 kW para a rede e, com um carregamento de 3,8, próximo ao colapso mantendo-se fixa a geração, a barra 18 consome 152 kW. Ou seja, a situação é outra. Quanto maior for o carregamento, menor será a influência da geração de potência, quando fixa. Por isso, quando mantermos fixa a geração, poderemos obter melhores resultados quando aplicarmos a metodologia num ponto próximo ao colapso de tensão, com a rede carregada, a exemplo do capítulo anterior.

Injetando então as mesmas potências nas barras 18, 25 e 30, multiplicamos todas as cargas

e gerações de potência do sistema por um fator de 4,5, quando aumentaremos a geração com o carregamento e por um fator de 3,8 quando manteremos a geração fixa. Estes são valores de λ que deixam a rede muito próxima ao colapso na configuração inicial, conforme vemos na Tabela 6.2. Com a rede carregada aplicamos a metodologia de reconfiguração e verificamos que a mesma sequência de chaveamentos foi obtida e os resultados encontram-se na Tabela 6.3.

Verificando que o λ^{max} da configuração final apresentada na Tabela 6.3 em relação ao caso base equivale a 6,892 e 5,495 respectivamente para os casos de aumento da geração e geração fixa, verificamos que obtivemos resultados com maiores λ^{max} em comparação aos resultados da Tabela 6.2, além de que verificamos o aumento contínuo dos valores de λ^{max} em cada chaveamento quando mantemos a geração fixa, o que não ocorreu quando a metodologia foi aplicada no caso base.

Até agora somente a inserção de geradores injetando potência ativa no sistema foi avaliada. Verificaremos no próximo exemplo a aplicabilidade da metodologia proposta com a inserção de potência ativa e reativa no sistema.

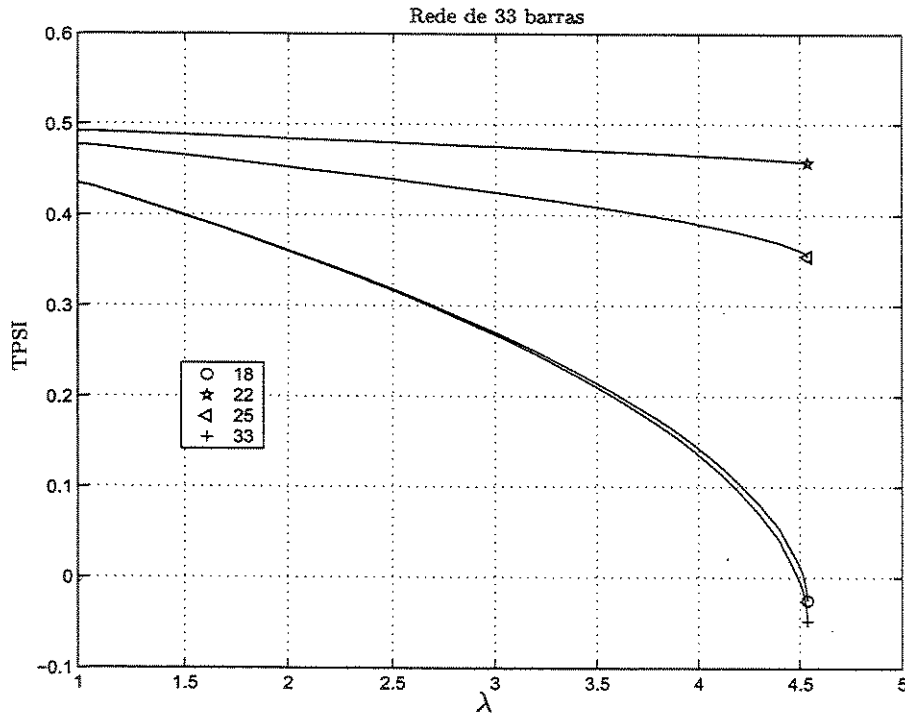


Figura 6.1: TPSI para a rede de 33 barras com a configuração inicial da Tabela 6.2.

Tabela 6.3: Resultados para a rede de 33 barras.

Conf.	a/f (*)	Linhas Abertas	$\lambda_{inicial} = 4,5$ $\lambda^{max}(**)$	Perdas [kW]	$\lambda_{inicial} = 3,8$ $\lambda^{max}(***)$	Perdas [kW]
CI		33 34 35 36 37	1,008	6979,3	1,011	3184,4
01	26/37	26 33 34 35 36	1,271	3739,7	1,235	2316,6
02	07/35	07 26 33 34 36	1,277	3335,8	1,292	2093,3
03	10/33	07 10 26 34 36	1,355	2889,4	1,308	1850,6
04	32/36	07 10 26 32 34	1,437	2817,7	1,370	1816,3
05	17/32	07 10 17 26 34	1,440	2721,0	1,373	1764,1
06	14/34	07 10 14 17 26	1,531	2528,1	1,446	1656,2

(*) **aberta/fechada** em relação à configuração anterior

(**) Em relação à rede carregada e aumentando a geração proporcionalmente à carga

(***) Em relação à rede carregada e mantendo a geração fixa

6.2.2 Rede de 202 barras

Para a rede de 202 barras, conectamos uma geração de 5075 kVA na barra 173, ou seja, 5000 kVA são exportadas para a rede. O alimentador que possui o caminho mais carregado (caminho 132) é o alimentador cuja primeira barra após a subestação é a barra 59. Notemos que não inserimos a geração nesse alimentador e sim no alimentador cuja primeira barra após a subestação é a barra 133. Na Tabela 6.4 mostramos os resultados da aplicação da metodologia proposta.

Tabela 6.4: Resultados para a rede de 202 barras.

Conf.	a/f (*)	Linhas Abertas	$\lambda^{max}(**)$	Perdas [kW]
CI		202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216	6,349	385,74
01	200/215	200 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 216	8,027	342,17
02	183/210	183 200 202 203 204 205 206 207 208 209 211 212 213 214 216	8,182	340,25
02	177/209	177 183 200 202 203 204 205 206 207 208 211 212 213 214 216	8,288	338,11

(*) **aberta/fechada** em relação à configuração anterior

(**) Aumento da geração proporcional à carga

Pelos resultados da Tabela 6.4 verificamos que mesmo injetando potência num alimentador que não o crítico, conseguimos aumentar o valor de λ^{max} em relação aos resultados da Tabela 5.6 pois conseguimos um chaveamento que sem a injeção de potência deste caso não resultaria num aumento do menor índice pós-reconfiguração.

6.3 Inserção de geradores com controle de tensão

Nesta seção verificaremos o impacto na reconfiguração da rede utilizando o método proposto com a inserção de geradores com controle de tensão. Com isso, temos mais uma variável no sistema que é a geração de potência reativa em função da tensão na barra na qual o gerador é conectado. Por isso, nesses casos utilizamos o fluxo de carga exato em todas as análises de reconfigurações já que o método aproximado não prevê a presença de barras PV. Além da quantidade e limite de potência reativa injetada pelo gerador na rede, influenciam no valor de λ^{max} a localização do gerador e a quantidade de potência ativa gerada. Desta forma, a análise da rede como um todo torna-se muito mais complexa e nosso objetivo neste trabalho é o de apenas verificarmos a validade da metodologia apresentada em casos como esse.

6.3.1 Rede de 16 barras

Na Fig. 6.2 apresentamos um exemplo da variação de λ^{max} com a variação da potência ativa gerada pelo gerador, porém mantendo-a fixa com o aumento do carregamento, variando-se também a localização do mesmo para a rede de 16 barras e mantendo fixo o limite de reativos em 10 MVar e a tensão desejada no gerador em 1 pu. A legenda na figura indica as barras nas quais o gerador é conectado. Percebemos que conectando o gerador na barra de menor índice TPSI de estabilidade, que é a barra 12, obtemos um maior valor para λ^{max} e esse valor é tanto maior quanto maior é a geração de potência ativa. Esse mesmo comportamento é observado com o gerador na barra 9, que pertence ao alimentador que possui o caminho mais carregado, que é o alimentador 2. Com o gerador na barra 7 (alimentador 1) ou na barra 15 (alimentador 3) observa-se que nenhum ganho se obtém em termos de λ^{max} , o que era de se esperar uma vez que o determinante do valor de λ^{max} encontra-se no alimentador 2. Porém, com a inserção do gerador na barra 7 ou 15, poderíamos encontrar uma reconfiguração que aumentasse ainda mais o valor de λ^{max} em comparação com os resultados da Tabela 5.1, conforme verificamos no exemplo anterior para a rede de 202 barras. No gráfico da Fig. 6.2 os marcadores das barras 7 e 15 estão separados apenas para facilitar a visualização.

Observamos na Fig. 6.3 a variação de λ^{max} com a variação do limite de geração de reativos do gerador para a rede de 16 barras. Para isso, fixamos a localização do gerador na barra 12, a potência ativa gerada pelo mesmo em 3 MW e a tensão desejada no gerador em 1 pu. Verificamos que existe um ponto ótimo para o limite de reativos em relação ao valor de λ^{max} próximo de 100 MVar. A partir desse valor o valor de λ^{max} decresce até que a partir de uma dada injeção de reativos o fluxo de carga não converge mais para um determinado carregamento, limitando o valor de λ^{max} para a rede. Porém, casos como esse em que o limite de reativos é muito alto, maior até do que toda a carga de reativos do alimentador, não são observados na prática e portanto nesse trabalho nos concentraremos apenas em geração de potência de um gerador somente um pouco maior que o consumo nas barras vizinhas (somando-se o consumo da própria barra na qual o gerador é conectado). Com isso mantemos a validade da análise dos índices TPSI, ou seja, o valor do menor índice no colapso de tensão é próximo de 0.

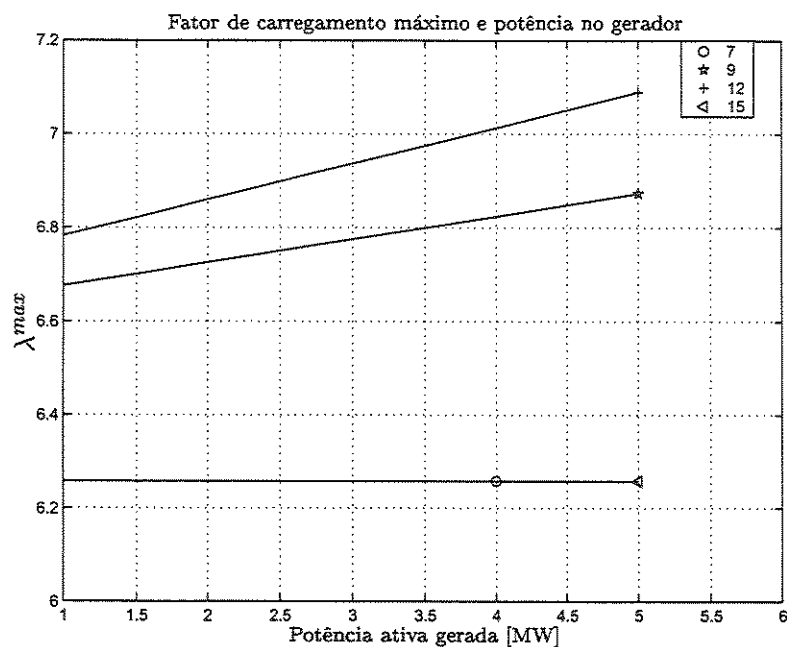


Figura 6.2: Máximo fator de carregamento em função da potência ativa gerada e da localização dos geradores para a rede de 16 barras.

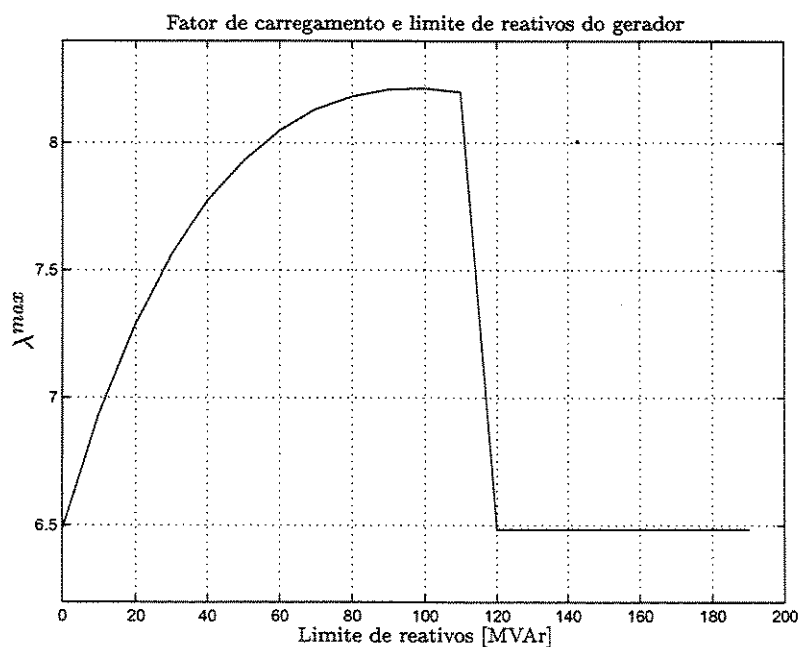


Figura 6.3: Máximo fator de carregamento em função do limite de geração de reativos do gerador para a rede de 16 barras.

Na Fig. 6.4 mostramos o comportamento dos índices TPSI para a rede de 16 barras, configuração inicial (Tabela 5.1), com um gerador na barra 12, gerando 3 MW (fixos), limite de reativos de 10 MVar e 1 pu de tensão desejada no terminal do gerador. Observamos que no colapso de tensão o menor dos índices (caminho 12) é próximo de 0. Nas Figs. 6.5 e 6.6 verificamos respectivamente o momento (λ) em que o gerador atinge seu limite de reativos e a consequência no perfil de tensão na barra 12.

Com um alto valor para o limite de reativos, como por exemplo de 100 MVar, muito maior que o consumo das barras do alimentador 2, mostramos na Fig. 6.7 o comportamento do índice TPSI mantendo-se as outras condições do exemplo anterior. Percebemos que perdemos um pouco da noção de proximidade ao colapso de tensão pois o menor dos índices em tal situação apresenta um valor próximo de 0,1 e não de 0. Mesmo assim ainda podemos utilizar o valor dos índices para definirmos as reconfigurações em nossa metodologia. O mesmo comportamento se verifica quando injetamos grande quantidade de potência ativa em relação ao consumo do alimentador. Na Fig. 6.8 observamos o comportamento do índice TPSI com apenas uma geração de potência ativa fixa igual a 180 MW na barra 12, sem controle de tensão.

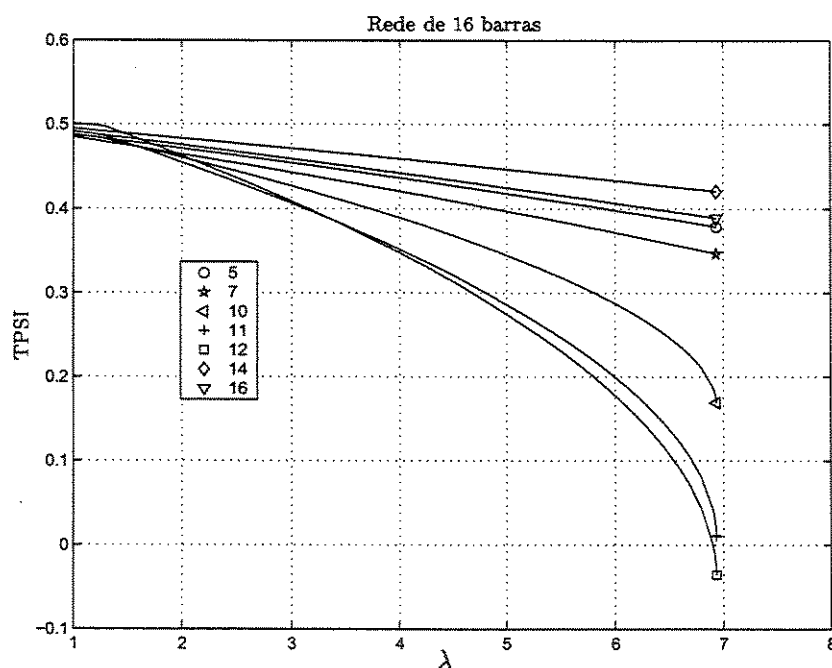


Figura 6.4: TPSI para a rede de 16 barras.

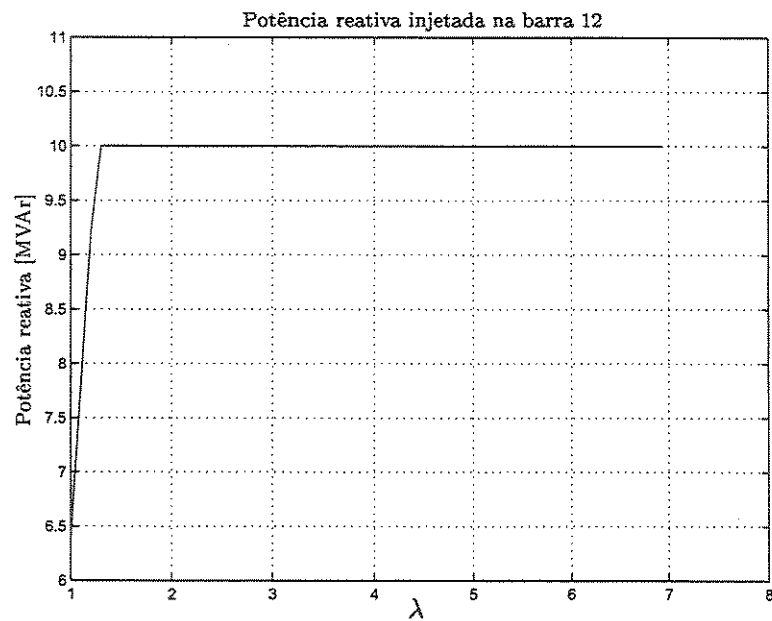


Figura 6.5: Potência reativa injetada na barra 12 pelo gerador em função do carregamento.

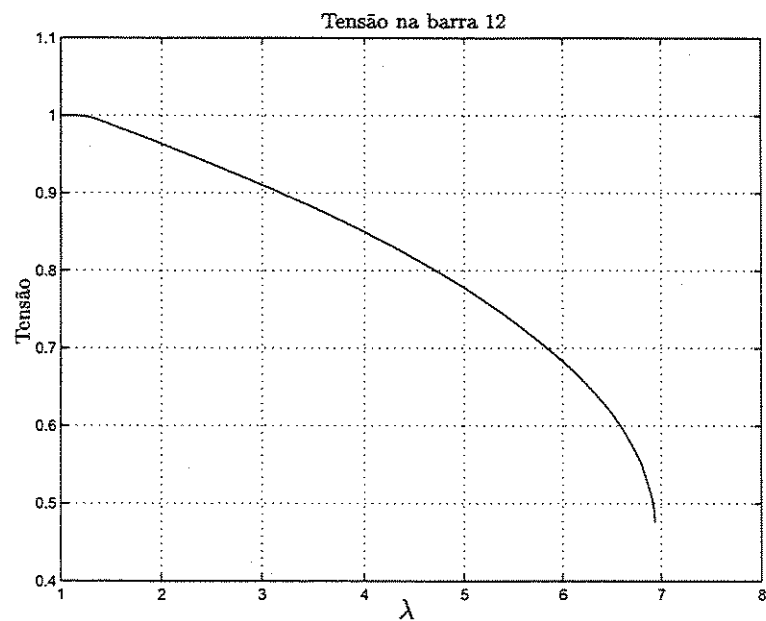


Figura 6.6: Tensão na barra 12 em função do carregamento.

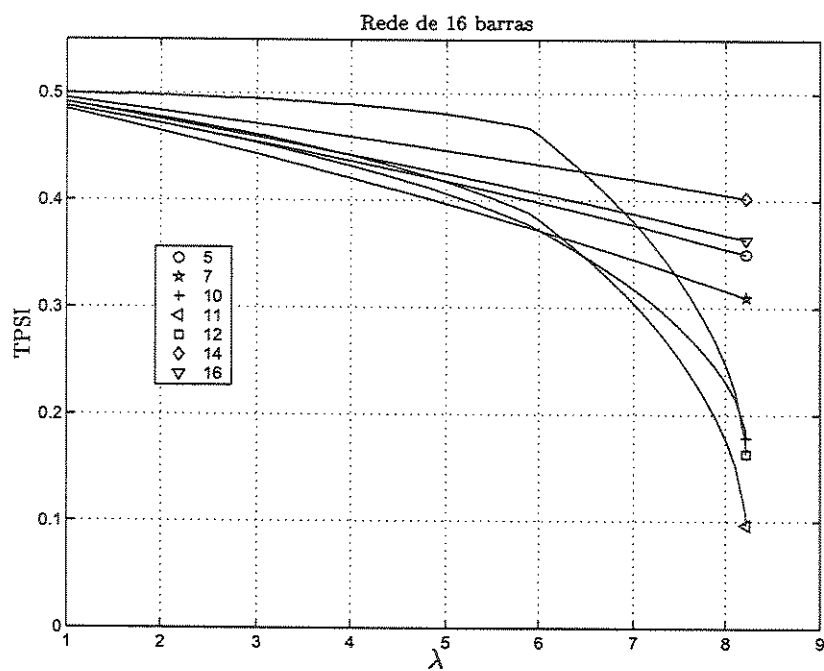


Figura 6.7: TPSI para a rede de 16 barras.

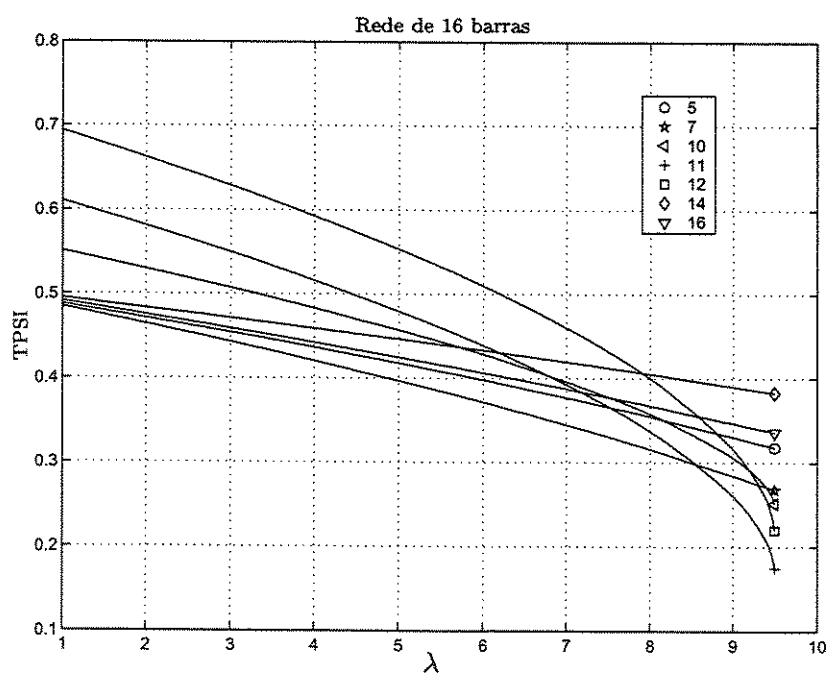


Figura 6.8: TPSI para a rede de 16 barras.

Observamos na Fig. 6.8 que o menor dos índices no colapso de tensão possui um valor próximo de 0,2. Novamente aqui perdemos a noção de proximidade ao colapso de tensão. Porém, como já dissemos, em nosso trabalho utilizaremos apenas gerações de potência não muito superiores ao consumo das barras vizinhas ao ponto de conexão do gerador, que são mais reais do ponto de vista prático, além de não perdermos a noção de proximidade ao colapso de tensão conforme observamos nas Figs. 6.1 e 6.4. Verificamos também na Fig. 6.8 o que havíamos dito anteriormente quanto à mudança na situação dos índices com uma geração fixa com o aumento do carregamento, acarretando muitos cruzamentos entre eles.

Demonstrada a influência da injeção de reativos e do limite da mesma sobre o máximo carregamento da rede, observaremos agora a validade da aplicação do algoritmo proposto em sistemas com geração distribuída com controle de tensão. Com o mesmo gerador que resultou no comportamento dos índices conforme a Fig. 6.4, ou seja, conectado na barra 12, gerando 3 MW, limite de reativos de 10 MVar e tensão terminal desejada de 1 pu, aplicamos a metodologia de reconfiguração proposta e obtivemos os resultados da Tabela 6.5.

Verificamos pelos resultados da Tabela 6.5 que ocorreu um chaveamento que resultou num aumento do valor de λ^{max} , tanto quando aumentamos a geração de ativos com a carga quanto quando a mantemos fixa, ou seja, a metodologia é válida neste caso. Aumentamos então a geração de potência ativa do gerador para 15 MW mantendo os outros parâmetros e temos os resultados da aplicação do algoritmo na Tabela 6.6.

Tabela 6.5: Resultados para a rede de 16 barras.

Conf.	a/f (*)	Linhas		$\lambda^{max}(**)$	$\lambda^{max}(***)$	Perdas [kW]
		Abertas				
CI		14 15 16		8,563	6,936	273,71
01	<u>07 15</u>	07 14 16		9,018	7,208	259,53

(*) aberta/fechada em relação à configuração anterior

(**) Aumento da geração de potência ativa proporcional à carga

(***) Mantendo a geração de potência ativa fixa

Tabela 6.6: Resultados para a rede de 16 barras.

Conf.	a/f (*)	Linhas		$\lambda^{max}(**)$	$\lambda^{max}(***)$	Perdas [kW]
		Abertas				
CI		14 15 16		11,203	7,826	438,90
01	<u>02 14</u>	02 15 16		9,396	6,371	334,70
02	<u>07 15</u>	02 07 16		9,853	6,704	349,32

(*) aberta/fechada em relação à configuração anterior

(**) Aumento da geração de potência ativa proporcional à carga

(***) Mantendo a geração de potência ativa fixa

Pelos resultados da Tabela 6.6 percebemos que ocorreu uma reconfiguração (da configuração inicial para a configuração 01) que diminuiu o valor de λ^{max} , ou seja, não foi uma reconfiguração que atendeu aos nossos propósitos de aumentar o valor da margem de estabilidade da rede. Neste

caso, nem mesmo a configuração final (configuração 02) possui um λ^{max} maior que o da configuração inicial. Nas Figs. 6.9 e 6.10 mostramos o comportamento do índice TPSI em função do carregamento para as configurações inicial e final respectivamente, mantendo a geração de potência ativa fixa.

Se não sabemos quando o gerador irá atingir o seu limite de reativos e qual será o comportamento do índice após isso ocorrer, corremos o risco de realizarmos um chaveamento que é bom para o carregamento base ($\lambda = 1$) mas que ao se atingir o limite de reativos do gerador aquela configuração encontrada passe a ser ruim, pois os índices influenciados pelo gerador passam a cair de valor mais rapidamente que os outros, o que faz com que ocorram cruzamentos entre os valores dos índices com o aumento do carregamento. Com isso, a exemplo do que foi visto com a rede de 136 barras no capítulo anterior e com a geração de potência ativa fixa, nós obteremos melhores resultados quanto mais próxima do colapso a metodologia de reconfiguração for aplicada, ou seja, quanto menor for o número de cruzamentos entre os valores dos índices após a aplicação do algoritmo.

Uma vez que a aplicação da metodologia de reconfiguração a cada atualização do estado de operação da rede é impraticável do ponto de vista de gerenciamento e operação do sistema, devemos utilizar uma estratégia que minimize o número de chaveamentos realizados (reconfigurações), mas que também garanta uma certa segurança ao sistema.

No caso do exemplo anterior poderemos adotar a estratégia de apenas aplicar a metodologia quando o menor dos índices atingir o valor de 0,2 ou menos, por exemplo, em que o sistema já encontra-se muito próximo do colapso de tensão. Com um carregamento de 6,7 ($\lambda = 6,7$) esta condição é satisfeita para este caso na configuração inicial da rede e então após aplicarmos o algoritmo proposto teremos os resultados expressos pela Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Resultados para a rede de 16 barras.

Conf.	a/f (*)	Linhas			Perdas [MW]
		Abertas	λ^{max} (**)	λ^{max} (***)	
CI		14 15 16	11,203	7,826	32,575
01	07 <u>15</u>	07 14 16	11,859	8,143	29,343
02	08 <u>14</u>	07 08 16	12,111	8,438	27,499

(*) aberta/fechada em relação à configuração anterior

(**) Em relação ao caso base e aumentando a geração de potência ativa proporcionalmente à carga

(***) Em relação ao caso base e mantendo a geração de potência ativa fixa

Pelos resultados da Tabela 6.7 verificamos que obtivemos configurações que possuem um valor de λ^{max} maiores que as configurações anteriores. Dessa forma, conseguimos bons resultados. Na Fig. 6.11 observamos a mudança de comportamento dos índices após as reconfigurações com a geração de ativos fixa em 15 MW. Antes de $\lambda = 6,7$, temos 7 barras terminais para a configuração inicial da rede e após $\lambda = 6,7$, quando já realizamos as reconfigurações, temos apenas 5 barras terminais para a configuração 02 (final) da Tabela 6.7. Quando λ atinge um valor próximo de 7,2 observamos que o menor dos índices volta a atingir o valor de 0,2 pu. Nessa hora voltamos a aplicar a metodologia porém nenhuma reconfiguração que atenda aos nossos propósitos é encontrada e a rede permanece com a configuração final da Tabela 6.7 até seu máximo fator de carregamento.

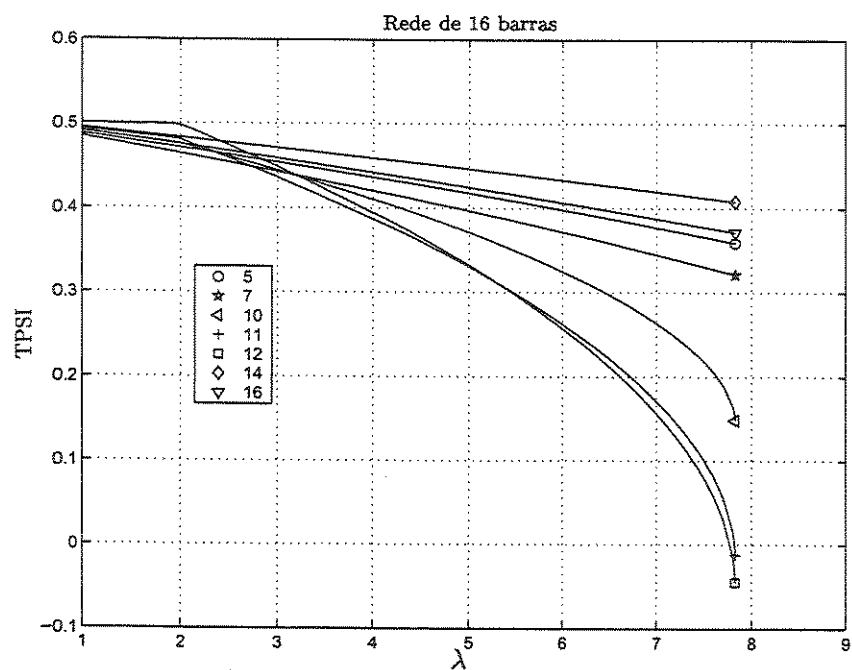


Figura 6.9: TPSI para a rede de 16 barras (configuração inicial, Tabela 6.6).

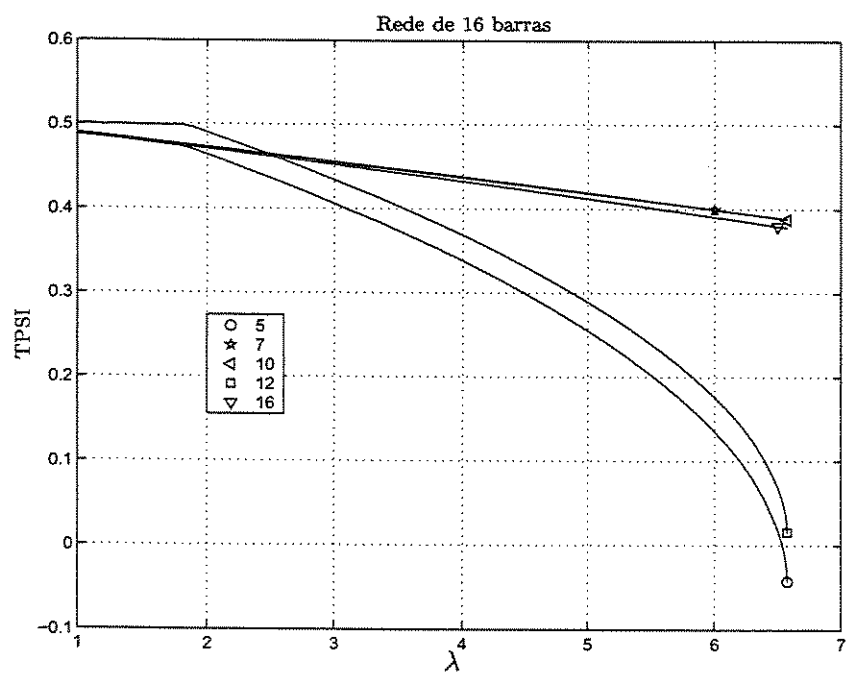


Figura 6.10: TPSI para a rede de 16 barras (configuração final, Tabela 6.6).

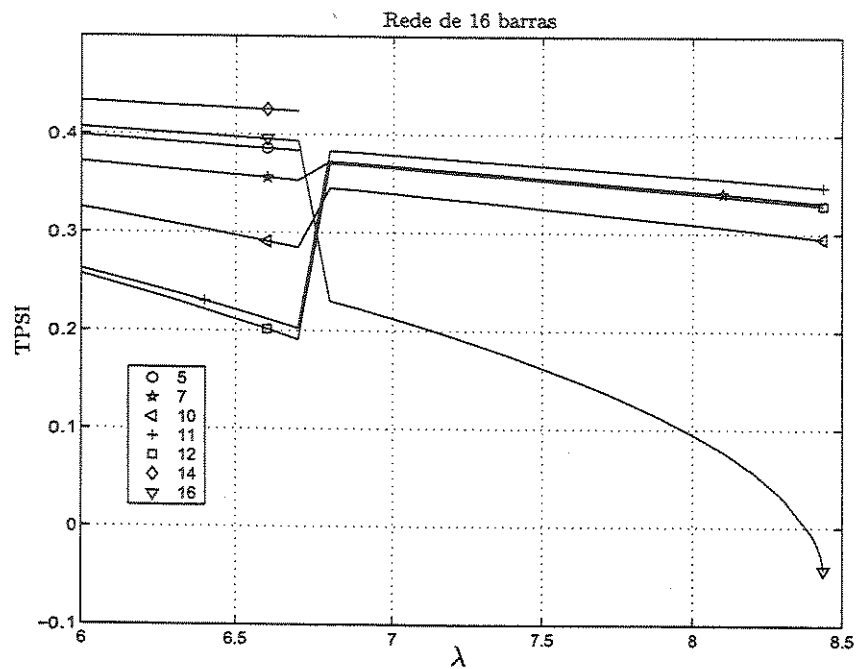


Figura 6.11: TPSI para a rede de 16 barras (configuração final, Tabela 6.7).

Pelos resultados mostrados, podemos dizer que assim como para o caso de reconfiguração da rede com a inserção de geradores com potência fixa, também para o caso da inserção de geradores com controle de tensão, obteremos melhores resultados com a aplicação da metodologia proposta quanto mais próximos estivermos do colapso de tensão, pois nesses casos a relação entre os valores dos índices pode mudar bastante do caso base até o seu máximo fator de carregamento, principalmente em redes que possuem grandes margens de estabilidade de tensão.

Capítulo 7

Tensões nas barras e índice TPSI

Ao longo do nosso trabalho percebemos a relação existente entre a magnitude de tensão na barra e o próprio valor do índice de estabilidade TPSI. Vemos pelas Figs. 7.1 e 7.2 os comportamentos das tensões nas barras para a rede de 16 barras relativos às situações nas quais o comportamento dos índices TPSI são mostrados nas Figs. 2.6 e 6.9 respectivamente e verificamos grande semelhança em tais comportamentos. Por conta disso, realizamos os mesmos testes apresentados em todo o trabalho porém, em vez de compararmos os valores dos índices na análise de cada reconfiguração, comparamos agora apenas os valores das magnitudes das tensões, mantendo toda a metodologia de reconfiguração. Dentre todos os resultados desse trabalho, inclusive com geração distribuída, apenas em dois casos não se verificou o mesmo resultado: com a análise das tensões a última reconfiguração dos resultados apresentados pela Tabela 5.1 (configuração 02) para a rede de 16 barras não foi realizada, sendo a configuração 01 a configuração final da rede; e também a última reconfiguração dos resultados apresentados pela Tabela 5.8 (configuração 06) não é realizada, sendo a configuração 05 a configuração final. Em todos os outros casos apresentados neste trabalho os resultados foram os mesmos.

No primeiro caso, uma diferença muito pequena entre os valores das tensões em relação aos valores dos índices faz com que a última reconfiguração da Tabela 5.1 não seja realizada. No segundo caso apenas não é realizado o último chaveamento que não acarretaria em ganho algum no valor de λ^{max} naquela situação, diminuiria apenas um pouco as perdas no sistema. Portanto, praticamente nenhuma diferença foi encontrada quando apenas comparamos as tensões nas barras em vez de compararmos os índices e ainda temos um ganho computacional que se refere ao tempo necessário ao cálculo dos índices em cada análise de reconfiguração. Uma explicação para este fato é que o índice de estabilidade de tensão TPSI depende apenas de fasores de tensão. Existe uma relação direta entre aumento da queda de tensão ao longo do caminho e diminuição do índice, pois maior será o fator $\Delta U'_d$ da Eq. (2.8).

Na Tabela 7.1 comparamos o tempo computacional necessário desde a leitura dos dados até a apresentação da configuração final para todas as redes cujos dados encontram-se nos apêndices, exceto para a rede de 16 barras, pois como obtivemos resultados diferentes, o número de configurações analisadas é também diferente em cada caso. Para todas as outras redes o número de configurações analisadas é o mesmo, tanto com a análise dos índices quanto com a análise das tensões. Utilizamos um computador com processador Intel/Pentium 4, 1,8 GHz e programa em linguagem Matlab.

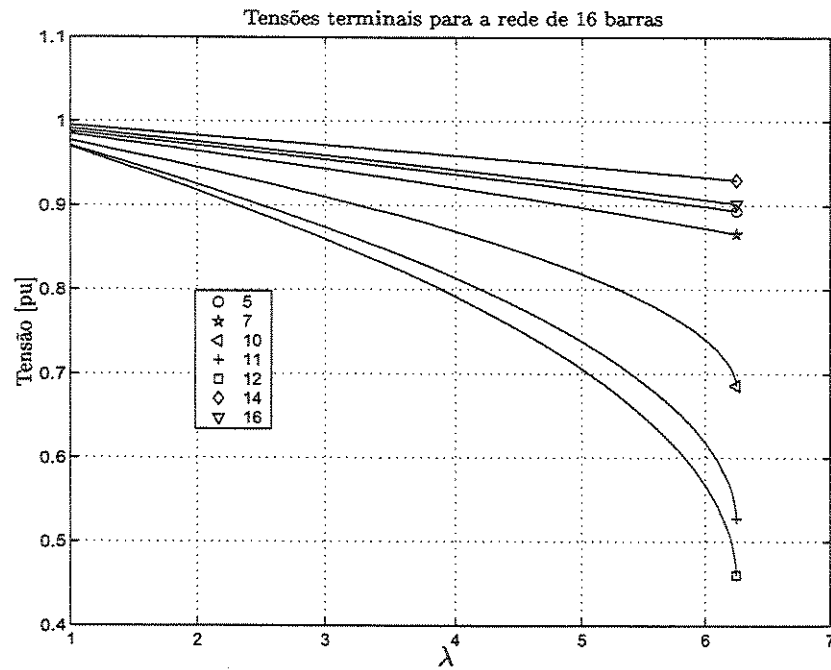


Figura 7.1: Tensões nas barras terminais para a rede de 16 barras.

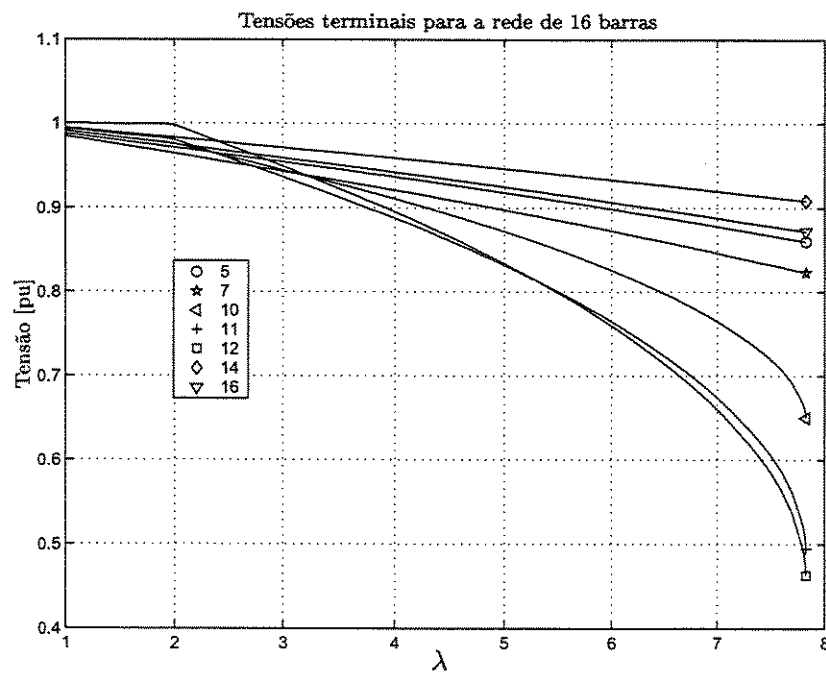


Figura 7.2: Tensões nas barras terminais para a rede de 16 barras.

Tabela 7.1: Tempo computacional.

Rede (número de barras)	33	70	136	202
Tempo com análise dos índices [s]	2,00	4,56	33,50	36,64
Tempo com análise das tensões [s]	1,63	3,81	26,35	30,05

Podemos concluir que quando trabalharmos na operação de sistemas com grandes restrições de tempo podemos realizar somente a análise das magnitudes das tensões e, com isso, conseguirmos um ganho no esforço computacional com a aplicação da metodologia. Se as restrições de tempo não forem muito grandes ou estivermos com a rede muito próxima ao colapso de tensão realizamos a análise das possíveis reconfigurações com os índices, pois além de maior segurança, eles nos dão uma noção da proximidade ao colapso em cada reconfiguração analisada.

Capítulo 8

Conclusão

O método proposto para a reconfiguração de redes de distribuição para melhorar as condições de estabilidade mostrou-se rápido e eficiente, podendo ser utilizado no planejamento da operação, admitindo-se até mesmo a sua utilização em tempo real.

Devido ao tratamento heurístico da nossa metodologia, não podemos garantir que as configurações finais encontradas em cada caso são as melhores possíveis no que diz respeito à margem de estabilidade de tensão da rede, porém os resultados obtidos são coerentes com os encontrados na literatura.

O método funciona melhor para sistemas carregados, com pouca margem de estabilidade de tensão, justamente onde a importância de se tentar elevar essa margem é maior, aumentando a segurança de operação do mesmo. Isto ocorre devido ao comportamento de maior não-linearidade na região de carregamento próxima ao colapso de tensão ou ainda e principalmente, no caso da inserção de geração distribuída com controle de tensão, devido à variação da injeção de reativos na rede e a rápida queda nos índices envolvidos com tal geração após o gerador atingir o limite de geração de potência reativa.

Situação semelhante ocorre com a inserção de geração distribuída sem controle de tensão (ou mesmo sem geração de potência reativa) quando se mantém fixa a geração, pois com o aumento do carregamento da rede a influência da geração vai diminuindo, mudando o comportamento dos índices numa situação de alto carregamento da rede em relação à rede pouco carregada. Portanto, quanto mais próximos do colapso aplicarmos o algoritmo, menores as chances de ocorrerem cruzamentos entre os índices após tal aplicação, ou seja, de alterarmos a proporcionalidade das diferenças entre os índices, como por exemplo, de um índice que no momento da reconfiguração é o menor passar a não ser no ponto de máximo carregamento.

Comparando o método proposto com os métodos de reconfiguração visando redução de perdas, nota-se que com o método proposto obtêm-se em geral configurações com λ^{max} significativamente maiores e perda de potência um pouco maiores também. Isto pode indicar que o método é mais adequado para ser utilizado em horários de pico de demanda, em que os fatores de segurança são mais importantes. Por outro lado, a reconfiguração para redução de perdas pode ser utilizada em horários em que a margem de segurança com relação à estabilidade de tensão já é suficientemente alta e fatores econômicos tornam-se mais importantes.

Apêndice A

Dados das redes testadas

A.1 Sistema de 16 barras

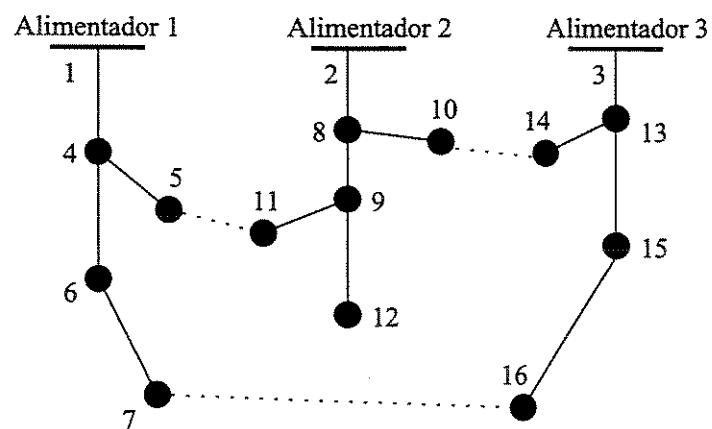


Figura A.1: Sistema de 16 barras.

Tabela A.2: Dados do sistema de 33 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (KW)	Carga barra final (KVAr)
01	01	02	0,0922	0,0470	100,0	60,0
02	02	03	0,4930	0,2511	90,0	40,0
03	03	04	0,3660	0,1864	120,0	80,0
04	04	05	0,3811	0,1941	60,0	30,0
05	05	06	0,8190	0,7070	60,0	20,0
06	06	07	0,1872	0,6188	200,0	100,0
07	07	08	0,7114	0,2351	200,0	100,0
08	08	09	1,0300	0,7400	60,0	20,0
09	09	10	1,0440	0,7400	60,0	20,0
10	10	11	0,1966	0,0650	45,0	30,0
11	11	12	0,3744	0,1238	60,0	35,0
12	12	13	1,4680	1,1550	60,0	35,0
13	13	14	0,5416	0,7129	120,0	80,0
14	14	15	0,5910	0,5260	60,0	10,0
15	15	16	0,7463	0,5450	60,0	20,0
16	16	17	1,2890	1,7210	60,0	20,0
17	17	18	0,7320	0,5440	90,0	40,0
18	02	19	0,1640	0,1565	90,0	40,0
19	19	20	1,5042	1,3554	90,0	40,0
20	20	21	0,4095	0,4784	90,0	40,0
21	21	22	0,7089	0,9373	90,0	40,0
22	03	23	0,4512	0,3083	90,0	50,0
23	23	24	0,8980	0,7091	420,0	200,0
24	24	25	0,8960	0,7011	420,0	200,0
25	06	26	0,2030	0,1034	60,0	25,0
26	26	27	0,2842	0,1447	60,0	25,0
27	27	28	1,0590	0,9337	60,0	20,0
28	28	29	0,8042	0,7006	120,0	70,0
29	29	30	0,5075	0,2585	200,0	600,0
30	30	31	0,9744	0,9630	150,0	70,0
31	31	32	0,3105	0,3619	210,0	100,0
32	328	33	0,3410	0,5301	60,0	40,0
33	08	21	2,0000	2,0000		
34	09	15	2,0000	2,0000		
35	12	22	2,0000	2,0000		
36	18	33	0,5000	0,5000		
37	25	29	0,5000	0,5000		

A.3 Sistema de 70 barras

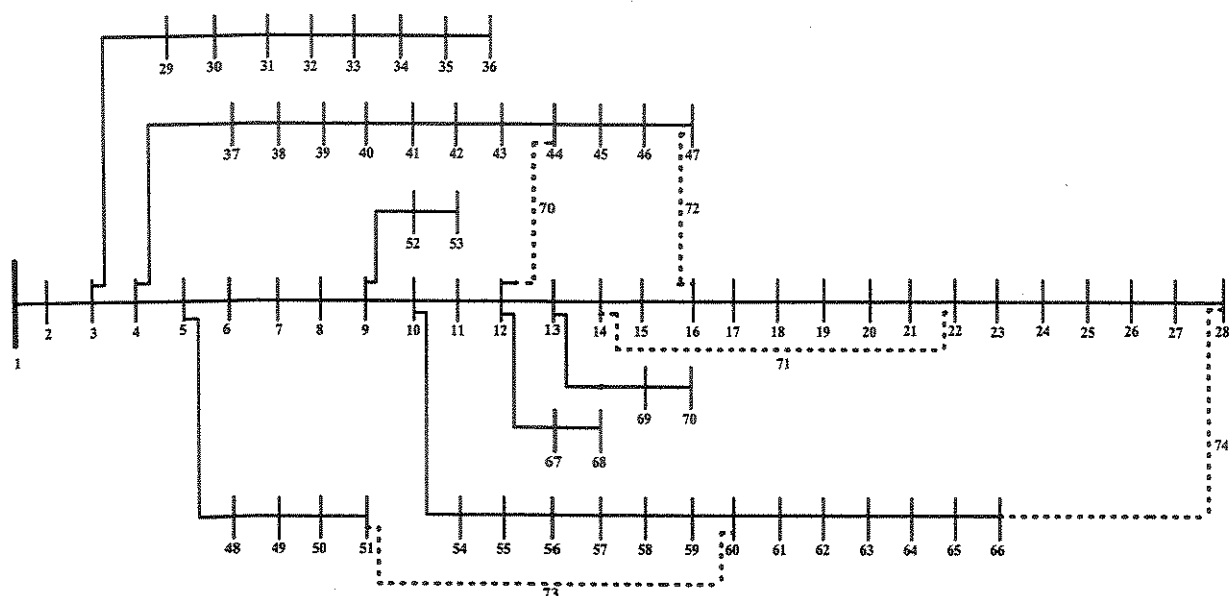


Figura A.3: Sistema de 70 barras .

Tabela A.3: Dados do sistema de 70 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Pu)	Reatância do ramo (Pu)	Carga barra final (KW)	Carga barra final (KVar)
1	1	2	0,0005	0,0012	0,0000	0,0000
2	2	3	0,0005	0,0012	0,0000	0,0000
3	3	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	4	5	0,0015	0,0036	0,0000	0,0000
5	5	6	0,0251	0,0294	0,0000	0,0000
6	6	7	0,3660	0,1864	0,8780	0,7200
7	7	8	0,3811	0,1941	13,4550	0,7200
8	8	9	0,0922	0,0470	24,8870	17,8100
9	9	10	0,0493	0,0251	10,0000	7,2080
10	10	11	0,8190	0,2707	9,3330	6,6660
11	11	12	0,1872	0,0619	48,5000	34,6090
12	12	13	0,7114	0,2351	48,5000	34,6090
13	13	14	1,0300	0,3400	2,7100	1,8210
14	14	15	1,0440	0,3450	2,7100	1,5210
15	15	16	1,0580	0,3496	0,0000	0,0000
16	16	17	0,1966	0,0650	15,1760	10,1980
17	17	18	0,3744	0,1238	16,5000	11,7750
18	18	19	0,0047	0,0016	16,5000	11,7750
19	19	20	0,3276	0,1083	0,0000	0,0000
20	20	21	0,2106	0,0696	0,3160	0,2120
21	21	22	0,3416	0,1129	37,9830	27,1000

Tabela A.4: Continuação - Dados do sistema de 70 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (pu)	Reatância do ramo (pu)	Carga barra final (KW)	Carga barra final (KVAr)
22	22	23	0,0140	0,0046	1,7620	1,1840
23	23	24	0,1591	0,0526	0,0000	0,0000
24	24	25	0,3463	0,1145	9,3900	6,6700
25	25	26	0,7488	0,2475	0,0000	0,0000
26	26	27	0,3089	0,1021	4,6670	3,3300
27	27	28	0,1732	0,0572	4,6670	3,3301
28	3	29	0,0044	0,0108	8,6670	6,1850
29	29	30	0,0640	0,1565	8,6670	6,1850
30	30	31	0,3978	0,1315	0,0000	0,0000
31	31	32	0,0702	0,0232	0,0000	0,0000
32	32	33	0,3510	0,1160	0,0000	0,0000
33	33	34	0,8390	0,2816	4,5820	3,2600
34	34	35	1,7080	0,5646	6,5010	5,5490
35	35	36	1,4740	0,4873	1,9200	1,2900
36	4	37	0,0044	0,0108	8,6670	6,1850
37	37	38	0,0640	0,1565	8,6670	6,1850
38	38	39	0,1053	0,1230	0,0000	0,0000
39	39	40	0,0304	0,0355	8,0000	5,7090
40	40	41	0,0018	0,0021	8,0000	5,7090
41	41	42	0,7283	0,8509	0,3920	0,3250
42	42	43	0,3100	0,3623	0,0000	0,0000
43	43	44	0,0410	0,0478	2,0000	1,4270
44	44	45	0,0092	0,0116	0,0000	0,0000
45	45	46	0,1089	0,1373	3,0760	8,7870
46	46	47	0,0009	0,0012	3,0760	8,7870
47	5	48	0,0034	0,0084	0,0000	0,0000
48	48	49	0,0851	0,2083	26,3500	18,8000
49	49	50	0,2898	0,7091	28,2260	91,4920
50	50	51	0,0822	0,2011	128,2260	91,4920
51	9	52	0,0928	0,0473	13,5120	9,4420
52	52	53	0,3319	0,1114	1,2020	0,8940
53	10	54	0,1740	0,0886	1,4490	1,1620
54	54	55	0,2030	0,1034	8,7870	6,3220
55	55	56	0,2842	0,1447	8,0000	5,7080
56	56	57	0,2813	0,1433	0,0000	0,0000
57	57	58	1,5900	0,5337	0,0000	0,0000
58	58	59	0,7837	0,2630	0,0000	0,0000
59	59	60	0,3042	0,1006	0,6670	24,0250
60	60	61	0,3861	0,1172	0,0000	0,0000
61	61	62	0,5075	0,2555	414,6670	295,9100
62	62	63	0,9740	0,0496	10,6670	7,6120
63	63	64	0,1450	0,0738	0,0000	0,0000
64	64	65	0,7105	0,3619	75,6700	53,8730
65	65	66	1,0410	0,5302	19,6700	13,9120
66	12	67	0,2012	0,0611	6,0000	4,2820
67	67	68	0,0047	0,0014	6,0000	4,2820
68	13	69	0,7394	0,2444	9,3330	6,6600
69	69	70	0,0047	0,0016	9,3330	6,6604
70	12	44	0,5000	0,5000		
71	14	22	0,5000	0,5000		
72	16	47	1,0000	1,0000		
73	51	60	2,0000	2,0000		
74	28	66	1,0000	1,0000		

A.4 Sistema de 136 barras

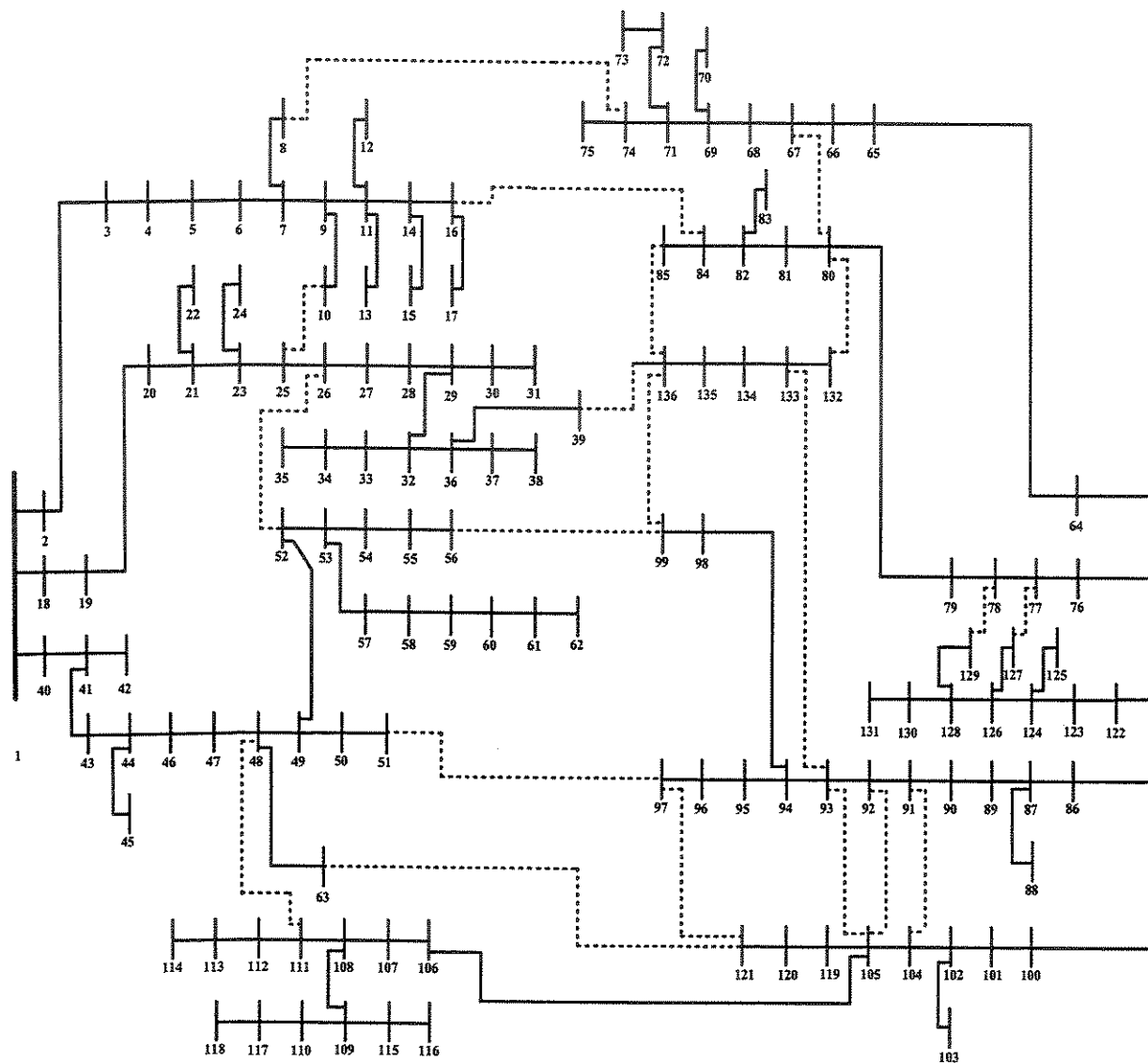


Figura A.4: Sistema de 136 barras.

Tabela A.5: Dados do sistema de 136 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (KW)	Carga barra final (KVAr)
1	1	2	0,33205	0,76653	0	0
2	2	3	0,00188	0,00433	47,780	19,009
3	3	4	0,22340	0,51535	42,551	16,929
4	4	5	0,09943	0,22953	87,0220	34,622
5	5	6	0,15571	0,35945	311,310	123,855
6	6	7	0,16321	0,37677	148,869	59,228
7	7	8	0,11444	0,26417	238,672	94,956
8	7	9	0,05675	0,05666	62,299	24,786
9	9	10	0,52124	0,27418	124,598	49,571
10	9	11	0,10877	0,10860	140,175	55,768
11	11	12	0,39803	0,20937	116,813	46,474
12	11	13	0,91744	0,31469	249,203	99,145
13	11	14	0,11823	0,11805	291,447	115,592
14	14	15	0,50228	0,26421	303,720	120,835
15	14	16	0,05675	0,05666	215,396	85,695
16	16	17	0,29379	0,15454	198,586	79,007
17	1	18	0,33205	0,76653	0	0
18	18	19	0,00188	0,00433	0	0
19	19	20	0,22324	0,51535	0	0
20	20	21	0,10881	0,25118	30,127	14,729
21	21	22	0,71078	0,37388	230,972	112,920
22	21	23	0,18197	0,42008	60,256	29,459
23	23	24	0,30326	0,15952	230,972	112,920
24	23	25	0,02439	0,05630	120,507	58,915
25	25	26	0,04502	0,10394	0	0
26	26	27	0,01876	0,04331	56,981	27,857
27	27	28	0,11823	0,11230	364,665	178,281
28	28	29	0,02365	0,02361	0	0
29	29	30	0,18954	0,09970	124,647	60,939
30	30	31	0,39803	0,20937	56,981	27,857
31	29	32	0,05675	0,05666	0	0
32	32	33	0,09477	0,04985	85,473	41,787
33	33	34	0,41699	0,21934	0	0
34	34	35	0,11372	0,05982	396,735	193,960
35	32	36	0,07566	0,07555	0	0
36	36	37	0,36960	0,19442	181,152	88,563
37	37	38	0,26536	0,13958	242,172	118,395
38	36	39	0,05675	0,05660	75,316	36,821
39	1	40	0,33205	0,76653	0	0
40	40	41	0,11819	0,27283	1,254	0,531
41	41	42	2,96288	1,01628	6,274	2,660
42	41	43	0,00188	0,00433	0	0
43	43	44	0,06941	0,16024	117,880	49,971
44	44	45	0,81502	0,42872	62,668	25,566
45	44	46	0,06378	0,14724	172,285	73,034
46	46	47	0,13132	0,30315	458,556	194,388
47	47	48	0,06191	0,14291	262,962	111,473
48	48	49	0,11444	0,26417	235,761	99,942

Tabela A.6: Continuação - Dados do sistema de 136 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (KW)	Carga barra final (KVar)
49	49	50	0,28374	0,28331	0	0
50	50	51	0,28374	0,28321	109,215	46,298
51	49	52	0,04502	0,10394	0	0
52	52	53	0,02626	0,06063	72,809	30,865
53	53	54	0,06003	0,13858	258,473	109,570
54	54	55	0,03002	0,06929	69,169	29,322
55	55	56	0,02064	0,04764	21,843	9,260
56	53	57	0,10881	0,25118	0	0
57	57	58	0,25588	0,13460	20,527	8,702
58	58	59	0,41699	0,21934	150,548	63,819
59	59	60	0,50228	0,26421	220,687	93,552
60	60	61	0,33170	0,17448	92,384	39,163
61	61	62	0,20849	0,10967	0	0
62	48	63	0,13882	0,32047	226,693	96,098
63	1	64	0,00750	0,01732	0	0
64	64	65	0,27014	0,62362	294,016	116,974
65	65	66	0,38270	0,88346	83,015	33,028
66	66	67	0,33018	0,76220	83,015	33,028
67	67	68	0,32830	0,75787	103,77	41,285
68	68	69	0,17072	0,39409	176,408	70,184
69	69	70	0,55914	0,29412	83,015	33,028
70	69	71	0,05816	0,13425	217,917	86,698
71	71	72	0,70130	0,36890	23,294	9,267
72	72	73	1,02352	0,53839	5,075	2,019
73	71	74	0,06754	0,15591	72,638	28,899
74	74	75	1,32352	0,45397	405,99	161,523
75	1	76	0,01126	0,02598	0	0
76	76	77	0,72976	1,68464	100,182	42,468
77	77	78	0,22512	0,51968	142,523	60,417
78	78	79	0,20824	0,48071	96,042	40,713
79	79	80	0,04690	0,10827	300,454	127,366
80	80	81	0,61950	0,61857	141,238	59,873
81	81	82	0,34049	0,33998	279,847	118,631
82	82	83	0,56862	0,29911	87,312	37,013
83	82	84	0,10877	0,10860	243,849	103,371
84	84	85	0,56862	0,29911	247,75	105,025
85	1	86	0,01126	0,02598	0	0
86	86	87	0,41835	0,96575	89,878	38,101
87	87	88	0,10499	0,13641	1137,280	482,108
88	87	89	0,43898	1,01338	458,339	194,296
89	89	90	0,07520	0,02579	385,197	163,290
90	90	91	0,07692	0,17756	0	0
91	91	92	0,33205	0,76653	79,608	33,747
92	92	93	0,08442	0,19488	87,312	37,013
93	93	94	0,13320	0,30748	0	0
94	94	95	0,29320	0,29276	74,001	31,370
95	95	96	0,21753	0,21721	232,05	98,369
96	96	97	0,26482	0,26443	141,819	60,119
97	94	98	0,10318	0,23819	0	0

Tabela A.7: Continuação - Dados do sistema de 136 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (KW)	Carga barra final (KVAr)
98	98	99	0,13507	0,31181	76,449	32,408
99	1	100	0,00938	0,02165	0	0
100	100	101	0,16884	0,38976	51,322	21,756
101	101	102	0,11819	0,27283	59,874	25,381
102	102	103	2,28608	0,78414	9,065	3,843
103	102	104	0,45587	1,05236	2,092	0,887
104	104	105	0,69600	1,60669	16,735	7,094
105	105	106	0,45774	1,05669	1506,522	638,634
106	106	107	0,20298	0,26373	313,023	132,694
107	107	108	0,21348	0,27737	79,831	33,842
108	108	109	0,54967	0,28914	51,322	21,756
109	109	110	0,54019	0,28415	0	0
110	108	111	0,04550	0,05911	202,435	85,815
111	111	112	0,47385	0,24926	60,823	25,874
112	112	113	0,86241	0,45364	45,618	19,338
113	113	114	0,56862	0,29911	0	0
114	109	115	0,77711	0,40878	157,070	66,584
115	115	116	1,08038	0,56830	0	0
116	110	117	1,06633	0,57827	250,148	106,041
117	117	118	0,47385	0,24926	0	0
118	105	119	0,32267	0,74488	68,809	28,593
119	119	120	0,14633	0,33779	32,072	13,596
120	120	121	0,12382	0,28583	61,084	25,894
121	1	122	0,01126	0,02598	0	0
122	122	123	0,64910	1,49842	94,622	46,26
123	123	124	0,04502	0,10394	49,858	24,375
124	124	125	0,52640	0,18056	123,164	60,214
125	124	126	0,02064	0,04764	78,350	38,304
126	126	127	0,53071	0,27917	145,475	71,121
127	126	128	0,09755	0,22520	21,369	10,447
128	128	129	0,11819	0,27283	74,789	36,564
129	128	130	0,13882	0,32047	227,926	111,431
130	130	131	0,04315	0,09961	35,614	17,411
131	131	132	0,09192	0,21220	249,295	121,877
132	132	133	0,16134	0,37244	316,722	154,842
133	133	134	0,37832	0,37775	333,817	163,199
134	134	135	0,39724	0,39664	249,295	121,877
135	135	136	0,29320	0,29276	0	0
136	8	74	0,13132	0,30315		
137	10	25	0,26536	0,13958		
138	16	84	0,14187	0,14166		
139	39	136	0,08512	0,08499		
140	26	52	0,04502	0,10394		
141	51	97	0,14187	0,14166		
142	56	99	0,14187	0,14166		
143	63	121	0,03940	0,09094		
144	67	80	0,12944	0,29882		
145	80	132	0,01688	0,03898		
146	85	136	0,33170	0,17448		

Tabela A.8: Continuação - Dados do sistema de 136 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (KW)	Carga barra final (KVar)
147	92	105	0,14187	0,17166		
148	91	130	0,07692	0,17756		
149	91	104	0,07692	0,17756		
150	93	105	0,07692	0,17756		
151	93	133	0,07692	0,17756		
152	97	121	0,26482	0,26443		
153	111	48	0,49696	0,64567		
154	127	77	0,17059	0,08973		
155	129	78	0,05253	0,12126		
156	136	99	0,29320	0,29276		

A.5 Sistema de 202 barras

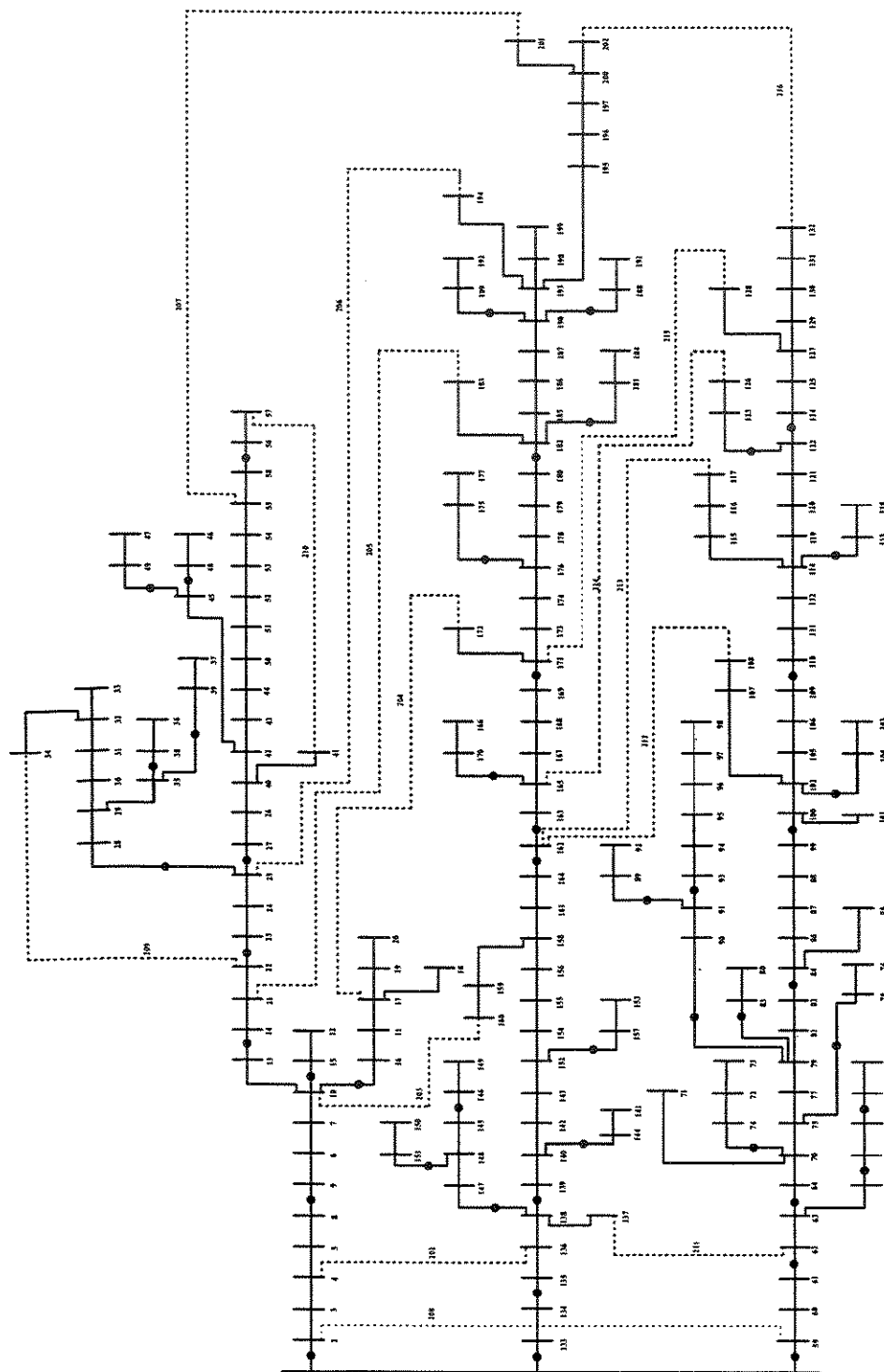


Figura A.5: Sistema de 202 barras.

Tabela A.9: Dados Sistema de 202 barras

Ramo	De	Para	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Status ramo	Barra	Carga (KW)	Carga (KVar)
1	2	3	0,018830	0,0423200	2	1	0	0
2	3	4	0,065905	0,1481200	2	2	0	0
3	4	5	0,037660	0,0846400	2	3	38,25	23,7
4	6	7	0,016947	0,0380880	2	4	0	0
5	7	10	0,018830	0,0423200	2	5	63,75	39,5
6	17	18	0,074728	0,0391200	2	6	38,25	23,7
7	17	19	0,186820	0,0978000	2	7	95,20	58,99
8	19	20	0,074728	0,0391200	2	8	0	0
9	21	22	0,041426	0,0931040	2	9	0	0
10	23	24	0,006590	0,0148120	2	10	63,75	39,50
11	24	25	0,006590	0,0148120	2	11	63,75	39,50
12	29	30	0,046705	0,0244500	2	12	510,00	316,02
13	30	31	0,046705	0,0244500	2	13	0	0
14	31	32	0,046705	0,0244500	2	14	0	0
15	32	33	0,059416	0,0202600	2	15	0	0
16	32	34	0,089124	0,0303900	2	16	0	0
17	29	35	0,093410	0,0489000	2	17	127,50	79,01
18	40	41	0,037135	0,0126625	2	18	63,75	39,50
19	40	26	0,009415	0,0211600	2	19	63,75	39,50
20	40	42	0,009415	0,0211600	2	20	255,00	158,01
21	42	45	0,059416	0,0202600	2	21	0	0
22	42	43	0,009415	0,0211600	2	22	0	0
23	43	44	0,009415	0,0211600	2	23	255,00	158,01
24	44	50	0,014122	0,0317400	2	24	255,00	158,01
25	50	51	0,013181	0,0296240	2	25	382,50	237,02
26	51	52	0,011298	0,0253920	2	26	191,25	118,51
27	52	53	0,011298	0,0253920	2	27	0	0
28	53	54	0,011298	0,0253920	2	28	0	0
29	54	55	0,011298	0,0253920	2	29	51,00	31,6
30	5	8	0,018830	0,0423200	2	30	95,63	59,25
31	9	6	0,018830	0,0423200	2	31	95,63	59,25
32	10	13	0,018830	0,0423200	2	32	0	0
33	14	21	0,037660	0,0846400	2	33	350,63	217,26
34	27	26	0,024479	0,0550160	2	34	350,63	217,26
35	15	12	0,059350	0,0465400	2	35	0	0
36	11	17	0,093410	0,0489000	2	36	95,63	59,25
37	16	11	0,046705	0,0244500	2	37	63,75	39,50
38	28	29	0,065387	0,0342300	2	38	0	0
39	36	38	0,037364	0,0195600	2	39	0	0
40	39	37	0,037364	0,0195600	2	40	0	0
41	48	46	0,037135	0,0126625	2	41	255,00	158,01
42	49	47	0,037135	0,0126625	2	42	0	0
43	58	55	0,074270	0,0253250	2	43	191,25	118,51
44	56	57	0,103978	0,0354550	2	44	95,63	59,25
45	59	60	0,015970	0,0409500	2	45	0	0
46	62	63	0,041522	0,1064700	2	46	605,63	375,27
47	63	65	0,019164	0,0491400	2	47	63,75	39,50
48	70	71	0,111405	0,0379875	2	48	0	0

Tabela A.10: Continuação - Dados Sistema de 202 barras

Ramo	De	Para	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Status ramo	Barra	Carga (KW)	Carga (KVar)
49	72	73	0,081697	0,0278575	2	49	0	0
50	70	75	0,020713	0,0465520	2	50	573,75	355,52
51	75	77	0,011298	0,0253920	2	51	191,25	118,51
52	77	79	0,007532	0,0169280	2	52	255,00	158,01
53	93	94	0,056046	0,0279240	2	53	765,00	474,03
54	94	95	0,028023	0,0139620	2	54	255,00	158,01
55	95	96	0,028023	0,0139620	2	55	0	0
56	96	97	0,028023	0,0139620	2	56	318,75	197,51
57	97	98	0,051375	0,0255970	2	57	318,75	197,51
58	79	81	0,009415	0,0211600	2	58	0	0
59	84	85	0,013181	0,0296240	2	59	0	0
60	84	86	0,004707	0,0105800	2	60	25,50	15,80
61	86	87	0,005649	0,0126960	2	61	0	0
62	87	88	0,009415	0,0211600	2	62	0	0
63	88	99	0,020713	0,0465520	2	63	0	0
64	100	102	0,005649	0,0126960	2	64	0	0
65	100	101	0,014122	0,0317400	2	65	95,63	59,25
66	102	107	0,006590	0,0148120	2	66	0	0
67	107	108	0,010356	0,0232760	2	67	38,25	23,70
68	102	105	0,004707	0,0105800	2	68	0	0
69	105	106	0,005649	0,0126960	2	69	102,00	63,20
70	106	109	0,011298	0,0253920	2	70	0	0
71	110	111	0,007532	0,0169280	2	71	89,25	55,30
72	111	112	0,007532	0,0169280	2	72	0	0
73	112	114	0,007532	0,0169280	2	73	38,25	23,70
74	114	115	0,005649	0,0126960	2	74	0	0
75	115	116	0,007532	0,0169280	2	75	0	0
76	116	117	0,009415	0,0211600	2	76	510,00	316,02
77	114	119	0,007532	0,0169280	2	77	595,00	368,69
78	119	120	0,007532	0,0169280	2	78	0	0
79	120	121	0,006590	0,0148120	2	79	0	0
80	121	122	0,005649	0,0126960	2	80	350,63	217,26
81	124	125	0,015064	0,0338560	2	81	382,5	237,02
82	125	127	0,009415	0,0211600	2	82	0	0
83	127	128	0,009415	0,0211600	2	83	0	0
84	127	129	0,015064	0,0338560	2	84	0	0
85	129	130	0,013181	0,0296240	2	85	38,25	23,70
86	130	131	0,013181	0,0296240	2	86	255,00	158,01
87	60	61	0,099014	0,2538900	2	87	446,25	276,52
88	64	70	0,018830	0,0423200	2	88	382,50	237,02
89	81	82	0,011298	0,0253920	2	89	0	0
90	126	123	0,065387	0,0300300	2	90	0	0
91	66	67	0,015970	0,0409500	2	91	0	0
92	68	69	0,133686	0,0455850	2	92	95,63	59,25
93	74	72	0,133686	0,0455850	2	93	191,25	118,51
94	78	76	0,163394	0,0557150	2	94	216,75	134,31
95	83	80	0,126259	0,0430525	2	95	95,63	59,25
96	90	91	0,178248	0,0607800	2	96	191,25	118,51

Tabela A.11: Continuação - Dados Sistema de 202 barras

Ramo	De	Para	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Status ramo	Barra	Carga (KW)	Carga (KVAR)
97	89	92	0,111405	0,037987	2	97	63,75	39,50
98	103	104	0,074270	0,025325	2	98	382,50	237,02
99	113	118	0,051989	0,017727	2	99	0	0
100	131	132	0,016947	0,038088	2	100	0	0
101	135	136	0,015064	0,033856	2	101	63,75	39,50
102	136	138	0,060256	0,135424	2	102	0	0
103	139	140	0,020713	0,046552	2	103	63,75	39,50
104	140	142	0,009415	0,021160	2	104	0	0
105	142	143	0,005649	0,012696	2	105	127,50	79,01
106	143	152	0,005649	0,012696	2	106	95,63	59,25
107	152	154	0,005649	0,012696	2	107	106,25	65,84
108	154	155	0,005649	0,012696	2	108	127,50	79,01
109	155	156	0,005649	0,012696	2	109	95,63	59,25
110	156	158	0,005649	0,012696	2	110	0	0
111	158	159	0,028023	0,014670	2	110	127,50	79,01
112	159	160	0,046705	0,024450	2	112	127,50	79,01
113	158	161	0,009415	0,021160	2	113	0	0
114	163	165	0,018830	0,042320	2	114	0	0
115	165	167	0,005649	0,012696	2	115	318,75	197,51
116	167	168	0,005649	0,012696	2	116	350,63	217,26
117	168	169	0,007532	0,016928	2	117	446,25	276,52
118	171	172	0,071220	0,055848	2	118	63,75	39,50
119	171	173	0,009415	0,021160	2	119	127,50	79,01
120	173	174	0,009415	0,021160	2	120	63,75	39,50
121	174	176	0,009415	0,021160	2	121	382,50	237,02
122	176	178	0,003766	0,008464	2	122	0	0
123	178	179	0,003766	0,008464	2	123	76,50	47,40
124	179	180	0,005649	0,012696	2	124	255,00	158,01
125	182	183	0,046705	0,024450	2	125	191,25	118,51
126	182	185	0,005649	0,012696	2	126	255,00	158,01
127	185	186	0,005649	0,012696	2	127	233,75	144,84
128	186	187	0,005649	0,012696	2	128	573,75	355,52
129	187	190	0,005649	0,012696	2	129	276,25	171,18
130	190	193	0,022596	0,050784	2	130	255,00	158,01
131	193	194	0,065387	0,034230	2	131	393,13	243,60
132	193	195	0,046705	0,024450	2	132	510,00	316,02
133	195	196	0,046705	0,024450	2	133	0	0
134	196	197	0,046705	0,024450	2	134	0	0
135	197	200	0,046705	0,024450	2	135	0	0
136	200	201	0,112092	0,058680	2	136	0	0
137	200	202	0,093410	0,048900	2	137	0	0
138	193	198	0,009415	0,021160	2	138	0	0
139	198	199	0,009415	0,021160	2	139	63,75	39,50
140	137	138	0,009415	0,021160	2	140	0	0
141	133	134	0,069671	0,156584	2	141	63,75	39,50
142	161	164	0,011298	0,025392	2	142	38,25	23,70
143	147	148	0,074728	0,039120	2	143	38,25	23,70

Tabela A.12: Continuação - Dados Sistema de 202 barras

Ramo	De	Para	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Status ramo	Barra	Carga (KW)	Carga (KVAr)
144	148	145	0,0560460	0,029340	2	144	0	0
145	151	150	0,0467050	0,024450	2	145	0	0
146	144	141	0,0280230	0,014670	2	146	0	0
147	157	153	0,0373640	0,019560	2	147	0	0
148	166	170	0,0653870	0,034230	2	148	63,75	39,50
149	175	177	0,0747280	0,039120	2	149	95,63	59,25
150	181	184	0,0607165	0,031785	2	150	63,75	39,50
151	189	192	0,0504475	0,039559	2	151	0	0
152	188	191	0,0385775	0,030251	2	152	0	0
153	146	149	0,0373640	0,019560	2	153	63,75	39,50
154	1	2	0	0	1	154	63,75	39,50
155	1	133	0	0	1	155	212,50	131,68
156	134	135	0	0	1	156	63,75	39,5
157	138	147	0	0	1	157	0	0
158	146	145	0	0	1	158	0	0
159	148	151	0	0	1	159	63,75	39,50
160	138	139	0	0	1	160	38,25	23,70
161	140	144	0	0	1	161	63,75	39,50
162	152	157	0	0	1	162	0	0
163	164	162	0	0	1	163	95,63	59,25
164	162	163	0	0	1	164	0	0
165	165	170	0	0	1	165	0	0
166	169	171	0	0	1	166	605,63	375,27
167	176	175	0	0	1	167	446,25	276,52
168	180	182	0	0	1	168	191,25	118,51
169	182	181	0	0	1	169	255,00	158,01
170	190	188	0	0	1	170	0	0
171	190	189	0	0	1	171	63,75	39,50
172	8	9	0	0	1	172	127,50	79,01
173	10	16	0	0	1	173	63,75	39,50
174	10	15	0	0	1	174	191,68	118,77
175	13	14	0	0	1	175	0	0
176	22	23	0	0	1	176	0	0
177	25	28	0	0	1	177	208,25	129,04
178	35	38	0	0	1	178	191,25	118,51
179	35	39	0	0	1	179	127,50	79,01
180	25	27	0	0	1	180	127,50	79,01
181	45	48	0	0	1	181	0	0
182	45	49	0	0	1	182	0	0
183	58	56	0	0	1	183	255,00	158,01
184	1	59	0	0	1	184	127,50	79,01
185	61	62	0	0	1	185	850,00	526,70
186	65	66	0	0	1	186	127,50	79,01
187	67	68	0	0	1	187	510,00	316,02
188	63	64	0	0	1	188	0	0
189	70	74	0	0	1	189	0	0
190	75	78	0	0	1	190	0	0
191	79	83	0	0	1	191	127,50	79,01

Tabela A.13: Continuação - Dados Sistema de 202 barras

Ramo	De	Para	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Status ramo	Barra	Carga (KW)	Carga (KVAr)
192	79	90	0	0	1	192	448,38	277,83
193	91	89	0	0	1	193	255,00	158,01
194	91	93	0	0	1	194	510,00	316,02
195	99	100	0	0	1	195	382,50	237,02
196	102	104	0	0	1	196	255,00	158,01
197	109	110	0	0	1	197	191,25	118,51
198	114	113	0	0	1	198	446,25	276,52
199	122	123	0	0	1	199	133,88	82,96
200	122	124	0	0	1	200	95,63	59,25
201	84	82	0	0	1	201	382,50	237,02
202	4	136	0	0	0	202	180,20	111,68
203	10	160	0	0	0			
204	17	172	0	0	0			
205	21	183	0	0	0			
206	25	194	0	0	0			
207	55	201	0	0	0			
208	2	59	0	0	0			
209	34	22	0	0	0			
210	57	41	0	0	0			
211	62	137	0	0	0			
212	108	162	0	0	0			
213	117	162	0	0	0			
214	126	165	0	0	0			
215	128	171	0	0	0			
216	132	202	0	0	0			

Status do ramo

- 1 - Indica a presença de chave seccionadora fechada.
- 2 - Indica um ramo sem a presença de chave.
- 0 - Indica a presença de uma chave de interconexão aberta.

Referências Bibliográficas

- [1] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, Washington, D. C., EUA, CRC Press, 2002.
- [2] M. Chakravorty, D. Das, "Voltage Stability Analysis of Radial Distribution Networks", *Electrical Power and Energy Systems*, 4(2), 2000, 129-135.
- [3] M.E. Baran, F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2), 1989, 1401-1407.
- [4] M. A. Kashem, V. Ganapathy, G. B. Jasmon, "Network reconfiguration for enhancement of voltage stability in distribution networks", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 147(3), 2000, 171-175.
- [5] B. Venkatesh, R. Ranjan, H. B. Gooi, "Optimal Reconfiguration of Radial Distribution Systems to Maximize Loadability", *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(1), 2004, 260-266.
- [6] F. Gubina, B. Strmčnic, "Voltage Collapse Proximity Index Determination Using Voltage Factors Approach", *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(2), 1995, 788-794.
- [7] D. Shirmohammadi, H.W. Hong, A. Semlyen, G. X. Luo, "A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(2), 1988, 753-762.
- [8] A. Mohamed, G. B. Jasmon, "Determining the weak segment of a power system with voltage stability considerations", *Electric Machines and Power Systems*, 24, 1996, 555-568.
- [9] C. W. Taylor, *Power System Voltage Stability*, Palo Alto, California, EUA, McGraw-Hill, 1994.
- [10] O. M. S. Nema, C. A. Castro, "Índice de proximidade ao colapso de tensão baseado nas perdas de potência ativa - potencial de utilização na operação em tempo real", III SIMPASE, 1996, 1-7.
- [11] A. S. Quintela, *Estudo de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e aplicação na seleção de contingências*, Tese de Mestrado, UNICAMP, 2002.
- [12] M. Moghavvemi, G. B. Jasmon, "New method for indicating voltage stability condition in power system", *Proceedings IEE International Power Engineering Conference (IPEC)*, Singapore, 1997, 223-227.

- [13] S. Civanlar, J. J. Grainger, S.S.H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3), 1988, 1217- 1223.
- [14] C. S. Cheng, D. Shirmohammadi. "A three-phase power flow method for real time distribution system analysis", *IEEE Transactions on Power Systems* , 10(2), 1995, 671-679.
- [15] T. Ackermann, G. Andersson, L. Soder, "Distributed generation: a definition", *Electric Power Systems Research*, 57, 2001, 195-204.
- [16] M. A. Q. Duarte, *Algoritmo de Busca Tabu usado no Problema da Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radial*, Tese de Mestrado, UNESP, 1999.
- [17] José R. S. Mantovani, Fernando Casari, Rubén Romero, "Reconfiguração de Sistemas Radiais utilizando o critério de queda de tensão", *SBA Controle e Automação*, 11(3), 2000, 150-159.
- [18] S. K. Goswami, S. K. Basu., "A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(3), 1992.
- [19] H. Chiang, R. Jean-Jumeau, "Optimal Network Reconfiguration in Distributions Systems. Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(3), 1990.