

Universidade Federal de Juiz de Fora
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica

ARLEI LUCAS DE SOUZA ROSA

**AVALIAÇÃO DO REFORÇO DAS CONDIÇÕES DA SEGURANÇA DE
TENSÃO UTILIZANDO A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE**

Juiz de Fora
2009

ARLEI LUCAS DE SOUZA ROSA

AVALIAÇÃO DO REFORÇO DAS CONDIÇÕES DA SEGURANÇA DE TENSÃO
UTILIZANDO A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Vander Menengoy da Costa, D.Sc.

Juiz de Fora

2009

Rosa, Arlei Lucas de Souza.

Avaliação do reforço das condições da segurança de tensão utilizando a análise de sensibilidade / Arlei Lucas de Souza Rosa. – 2009.

133 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.

1. Sistemas elétricos de potência. I. Título

CDU 621.3.02:31

AVALIAÇÃO DO REFORÇO DAS CONDIÇÕES DA SEGURANÇA DE TENSÃO
UTILIZANDO A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

ARLEI LUCAS DE SOUZA ROSA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Vander Menengoy da Costa, D.Sc.

(Orientador)

UFJF

Prof. Ricardo Bernardo Prada, Ph.D.

PUC – RIO

Dr. João Alberto Passos Filho, D.Sc.

CEPEL

Prof. Márcio Pinho Vinagre, D.Sc.

UFJF

Juiz de Fora, MG – Brasil.

MAIO DE 2009

*Aos meus pais José Cassiano e Nair Cleuzza pelo amor e
dedicação, aos meus amigos que me ajudaram ao longo do
mestrado e principalmente a Deus*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me abençoar durante toda a trajetória de estudos na engenharia.

Aos meus pais Nair Cleuza de Souza Rosa e José Cassiano Rosa pela compreensão, dedicação, amor e carinho durante toda a minha vida.

Ao professor Vander Menengoy da Costa pelo empenho e seriedade como orientador deste trabalho e pela sua amizade.

Ao meu amigo Filipe Magno Mayrink Niquini pelo companheirismo, ajuda nos momentos complicados e amizade durante todo mestrado.

As minhas amigas da graduação Ingrid, Aline e Dayana pela força nos momentos difíceis e alegria nos momentos de descontração.

Aos meus amigos Edyson e Jean pelas horas de diversão tão necessárias para renovar as forças e manter o equilíbrio para continuar este trabalho.

Aos meus colegas do Labspot pela paciência, compreensão e incentivo.

E, finalmente, a todas as pessoas que torceram e me incentivaram na conquista desta vitória.

A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.

Albert Einstein

RESUMO

Durante décadas, problemas relacionados à estabilidade de tensão ou, segurança de tensão, têm despertado a atenção crescente de pesquisadores do setor elétrico. O crescimento da economia e o aumento do consumo de energia elétrica, aliados à falta de investimentos nos setores de geração e transmissão, têm levado o sistema elétrico de potência a operar muito próximo de seus limites. Desta forma, a habilidade do sistema em manter um nível operacional satisfatório, após a ocorrência de alguma contingência, pode ficar comprometida.

Este trabalho avalia a segurança de tensão através de um método simples, eficiente e rápido computacionalmente, além de propor ações de reforço para melhorar a margem de carregamento do sistema elétrico. A análise da rede é função dos caminhos de transmissão de potência ativa e um modelo matemático muito simples é utilizado. Quanto às ações de reforço, a análise de sensibilidade fornece as barras mais adequadas ao redespacho de potência ativa e reativa. Um processo iterativo é estabelecido com o intuito de recomendar ações de controle e fornecer condições de segurança de tensão menos severas. Os resultados apresentados para um sistema real de 34 barras demonstram a eficácia da metodologia desenvolvida.

Palavras-chave: Análise de Sistemas Elétricos de Potência. Estabilidade de Tensão. Margem de Carregamento. Análise de Sensibilidade.

ABSTRACT

Voltage stability or voltage security analysis has motivated an expressive attention of power systems researchers. The economy growth and the increased electric energy consumption, allied to the lack of investments in generation and transmission areas, have led electrical power systems to operate very close to their limits. Therefore, they cannot be able to operate in a secure way after some contingencies.

In this work, a simple and fast method evaluates voltage security and proposes conditions to improve the loading margin. System analysis is carried out in terms of active power transmission path. Sensitivity analysis provides the most adequate buses to active and reactive power redispatch. A sequential iterative methodology to reinforce system conditions is presented. The results for a real 34-bus system demonstrate the efficiency of proposed methodology.

Keywords: Electrical Power System Analysis. Voltage Stability. Loading Margin. Sensitivity Analyses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Margem de Segurança	21
Figura 2-2 -Circuito Duas Barras Genérico.....	23
Figura 2-3 - Localização do Ponto de Operação	28
Figura 2-4 - Curva PV para Fator de Potência Constante	29
Figura 2-5 - Limite de Estabilidade de Tensão no Plano PV	29
Figura 2-6 - Curvas PQ constantes no Plano $V \times \theta$	30
Figura 2-7 - Caminho Genérico de Transmissão.....	31
Figura 3-1 - Sistema com 8 Barras	40
Figura 3-2 - Diagrama do Fluxo de Potência Ativa.....	41
Figura 3-3 - Busca do Primeiro Caminho de Transmissão.....	42
Figura 3-4 - Busca do Segundo Caminho de Transmissão.....	43
Figura 3-5 - Mudança de Estado dos Apontadores.....	43
Figura 3-6 - Final da Busca de 2 Caminhos de Transmissão	44
Figura 3-7 - Mudança dos Estados dos Apontadores	44
Figura 3-8 - Análise do Quinto Caminho de Transmissão	45
Figura 3-9 - Análise do Sexto Caminho	45
Figura 3-10 - Análise do Último Caminho e Encerramento do Processo de Busca.....	46
Figura 3-11 - Sistema de 5 Barras	55
Figura 4-1 - Diagrama unifilar do sistema IEEE 14 barras	67
Figura 4-2 – Diagrama unifilar do sistema de 34 Barras.....	81
Figura 4-3 - Sistema 34 Barras Reduzido a 31 Barras	82
Figura A.1 - Sinal do $\det[D']$ na Curva SV	112
Figura A.2 - Localização do Vetor Gradiente no Plano $V \times \theta$	114
Figura A.3 - Sinal dos Índices S_i e S_m na Curva SV para um Sistema Duas Barras	115
Figura A.4 - Sinal dos Índices S_i e S_m na Curva SV para um Sistema Multi-Nó.....	116
Figura A.5 - Curva SV para Análise do Índice de Influência.....	120
Figura B.1 - Tipos de Grafos	122
Figura B.2 - Grafo para Exemplo de Busca.....	127
Figura B.3 - Busca em Largura	128
Figura B.4 - Busca em Profundidade	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Lista de Adjacências para o Sistema com 8 Barras	40
Tabela 3-2 - Caminhos de Transmissão	46
Tabela 3-3 - Dados da Barra.....	55
Tabela 3-4 – Dados dos Ramos	55
Tabela 3-5 - Resultados do Fluxo de Potência para as Barras	56
Tabela 3-6 – Resultados do Fluxo de Potência para os Ramos	56
Tabela 3-7 - Resultados do Fluxo de Potência para as Barras na 1ª Iteração da Análise de Sensibilidade.....	61
Tabela 3-8 – Resultados do Fluxo de Potência para os Ramos na 1ª Iteração da Análise de Sensibilidade.....	62
Tabela 3-9 - Resultados do Fluxo de Potência para as Barras na 2ª Iteração da Análise de Sensibilidade.....	65
Tabela 3-10 – Resultados do Fluxo de Potência para os Ramos na 2ª Iteração da Análise de Sensibilidade.....	65
Tabela 4-1 – Resultado do Fluxo de Potência e Índices de Estabilidade de Tensão para o Sistema IEEE 14 Barras	68
Tabela 4-2 - Resultado do Fluxo de Potência e Determinação dos Caminhos de Transmissão mais Carregados para o Sistema IEEE 14 Barras.....	70
Tabela 4-3 – Determinação do Ramo de Transmissão Mais Carregado para o Sistema IEEE 14 Barras.....	75
Tabela 4-4 – Resultados para a Análise de Sensibilidade Iterativa Considerando Todas as Barras de Geração para o Sistema IEEE 14 Barras	78
Tabela 4-5 – Resultado do Fluxo de Potência e Índices de Estabilidade de Tensão para o Sistema Sul Brasileiro Equivalente	83
Tabela 4-6 – Resultado do Fluxo de Potência e Determinação dos Caminhos de Transmissão mais Carregados para o Sistema Sul Brasileiro Equivalente	86
Tabela 4-7 – Determinação do Ramo de Transmissão Mais Carregado para o Sistema Sul Brasileiro Equivalente	92
Tabela 4-8 – Resultados para a Análise de Sensibilidade Iterativa Considerando Todas as Barras de Geração para o Sistema Sul Brasileiro Equivalente.....	97

Tabela 4-9 – Resultados para a Análise de Sensibilidade Iterativa Ignorando a Barra de Geração 23 para o Sistema Sul Equivalente.....	101
Tabela B.1 - Lista de Adjacências para o Grafo Não-Orientado.....	123
Tabela B.2 - Lista de Adjacências para o Grafo Orientado.....	123
Tabela B.3 - Matriz de Adjacências para o Grafo Não Orientado	124
Tabela B.4 - Matriz de Adjacências para o Grafo Orientado	124
Tabela B.5 - Matriz de Incidências do Grafo Não Orientado.....	125
Tabela B.6 - Matriz de Incidências do Grafo Orientado	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

SEP's	Sistemas elétricos de potência
S_m	Máxima potência injetada numa determinada barra
S_i	Potência injetada no ponto de operação
PMC	Ponto de máximo carregamento
LET	Limite de estabilidade de tensão
M	Margem de carregamento
β	Ângulo entre os vetores gradiente de potência ativa e reativa
V_L	Módulo da tensão na carga no ponto de operação
θ_L	Ângulo da tensão na carga no ponto de operação
V_L^C	Módulo da tensão crítica na carga
θ_L^C	Ângulo da tensão crítica na carga
ϕ	Ângulo do fator de potência da carga
LEA	Limite de estabilidade angular
S_{io}	Estimativa da máxima potência injetada na barra i
H_i	Índice de influência da barra i
M_{0_i}	Margem de potência na barra i no ponto de operação de referência
M_{1_i}	Margem de potência na barra i num outro ponto de operação
$\mathbf{Y}_{\text{barra}}$	Matriz admitância
V_G	Módulo da tensão na geração no ponto de operação
θ_{GL}	Diferença angular entre a barra de geração e a carga no ponto de operação
V_G^C	Módulo da tensão crítica na geração
θ_{GL}^C	Diferença angular crítica entre a barra de geração e a carga
V_G^{C*}	Módulo da tensão crítica na geração calculado com θ_{GL}
$\underline{\mathbf{g}}$	Vetor constituído pelas equações de equilíbrio de potência ativa e reativa nas barras
$\underline{\mathbf{u}}$	Vetor constituído pelas variáveis de controle
$\underline{\mathbf{x}}$	Vetor constituído pelas variáveis de estado

\underline{p}	Vetor constituído pelas cargas ativas e reativas
J_x	Matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional.
J_u	Matriz com as derivadas das equações de fluxo de potência em relação às variáveis de controle
J_p	Matriz com derivadas das equações de fluxo de potência em relação às equações das cargas ativas e reativas
J_v	Matriz com as derivadas das equações de fluxo de potência em relação ao módulo das tensões nas barras PV
J_{P_G}	Matriz com as derivadas das equações de fluxo de potência em relação à potência ativa das barras PV
J_{P_L}	Matriz com as derivadas das equações de fluxo de potência em relação à potência ativa e reativa das barras de carga
P_{km}	Fluxo de potência ativa para um ramo $k-m$
P_i	Potência ativa injetada na barra i
Q_i	Potência reativa injetada na barra i
$\Delta \underline{v}$	Variação das tensões das barras de geração
$\Delta \underline{P}_G$	Variação da potência ativa das barras PV
$\Delta \underline{P}_L$	Variação da potência ativa e reativa das barras de carga
\underline{C}^i	Coefficiente para as variáveis das tensões nas barras de geração
\underline{C}^j	Coefficiente para as variáveis de potência ativa das barras PV
\underline{C}^k	Coefficiente para as variáveis de potência ativa e reativa das barras de carga.
nb	Número de barras.
ng	Número de geradores.
A	Representa a matriz Jacobiana original do sistema, excluindo as linhas e colunas referentes à barra i em análise.
B	Representa as derivadas das equações de potência ativa e reativa do sistema em relação às variáveis dependentes da barra i em análise.
C	Representa as derivadas das equações de potência ativa e reativa da barra i em análise em relação às demais variáveis dependentes do sistema.

D Representa as derivadas das equações de potência ativa e reativa da barra i em análise em relação às suas próprias variáveis dependentes.

As matrizes serão apresentadas em negrito e os vetores em negrito sublinhado.

SUMÁRIO

1 Introdução	17
1.1 Considerações Gerais	17
1.1 Objetivos.....	18
1.2 Estrutura do Trabalho	19
2 Fundamentos da Estabilidade de Tensão.....	20
2.1 Introdução.....	20
2.2 Modelo Básico Duas Barras [16]	22
2.2.1 Desenvolvimento Matemático.....	22
2.2.2 Aplicação Prática.....	28
2.3 Metodologia para Reforço das Condições de Segurança de Tensão [2]	30
2.3.1 Identificação dos Caminhos de Transmissão	31
2.3.1.1 Identificação da sub-rede.....	31
2.3.1.2 Identificação dos Caminhos de Transmissão.....	32
2.3.1.3 Identificação do Caminho de Transmissão Mais Carregado.....	33
2.3.2 Determinação do Ramo Crítico	34
2.3.3 Reforço das Condições de Segurança de Tensão	34
3 Novas Proposições	36
3.1 Introdução.....	36
3.2 Proposição para a Identificação dos Caminhos de Transmissão	36
3.2.1 Montagem da Lista de Adjacências.....	37
3.2.2 Busca em Profundidade por Caminhos de Transmissão na Lista de Adjacências [18]...	38
3.2.3 Exemplo.....	39
3.3 Proposição para Reforço das Condições da Segurança de Tensão.....	47
3.3.1 Introdução [19]	47
3.3.2 Análise de Sensibilidade [28,29].....	47
3.3.3 Modelo Proposto para Reforço.....	49
3.3.3.1 Considerações Iniciais	49
3.3.3.2 Algoritmo	52
3.3.4 Exemplo.....	54
4 Resultados	66
4.1 Introdução.....	66

4.2 Sistema IEEE 14 barras	66
4.2.1 Identificação da Barra Crítica.....	67
4.2.2 Identificação dos Caminhos de Transmissão e do Caminho de Transmissão Mais Carregado.....	69
4.2.3 Determinação do Ramo Crítico	74
4.2.4 Análise de Sensibilidade.....	77
4.3 Sistema Sul Brasileiro Equivalente	81
4.3.1 Identificação da Barra Crítica.....	82
4.3.2 Identificação dos Caminhos de Transmissão e do Caminho de Transmissão Mais Carregado.....	85
4.3.3 Determinação do Ramo Crítico	91
4.3.4 Análise de Sensibilidade.....	96
4.3.4.1 Barras de Geração Consideradas Integralmente.....	96
4.3.4.2 Barra de Geração 23 Ignorada	100
4.4 Comentários Finais	104
5 Conclusões	105
5.1 Considerações Finais	105
5.2 Proposta para Trabalhos Futuros	106
Apêndice A	107
Índices de Avaliação de Segurança de Tensão.....	107
A.1 A Ferramenta Analítica [31].....	107
A.2 Sistema Multi-nó	110
A.3 Sinal do Determinante D' [32]	113
A.4 Interpretação dos Índices S_m e M [33].....	115
A.4.1 Análise da Curva SV para um Sistema Duas Barras	115
A.4.2 Análise da Curva SV para um Sistema Multi-nó.....	116
A.5 Margem de Potência	117
A.6 Índice de Influência	119
Apêndice B	121
Teoria de Grafos	121
B.1 Introdução	121
B.2 Representação de Grafos	123
B.2.1 Lista de Adjacências	123
B.2.2 Matriz de Adjacências.....	124

B.2.3 Matriz de Incidências	125
B.3 Métodos de Busca em Grafos	126
B.3.1 Introdução	126
B.3.2 Busca em Largura	126
B.3.3 Busca em Profundidade	129
REFERÊNCIAS	131

Capítulo I

Introdução

1.1 Considerações Gerais

A falta de recursos e a necessidade de explorar ao máximo as características das redes elétricas contribuem para o aumento da complexidade operacional do SEP. A principal preocupação dos operadores, responsáveis pelo seu funcionamento, é elevar os níveis de segurança sem aumentar consideravelmente o custo com a operação. Deste modo, há um grande empenho, por parte dos órgãos reguladores do setor energético, em fazer o correto planejamento da operação com o intuito de garantir o bom funcionamento dos sistemas em situações normais ou de contingências.

A análise de estabilidade de tensão está relacionada ao comportamento do sistema quando sujeito a distúrbios. Um sistema elétrico está sujeito a distúrbios quando exposto a variações de carga e ações de controle de tensão e frequência. Grandes distúrbios são, geralmente, verificados quando ocorre a perda de uma linha de transmissão ou de um gerador. Para ambos os casos, o sistema deve voltar a operar em condição segura após o distúrbio. O principal fator responsável pela instabilidade de tensão está relacionado à incapacidade em se obter um novo ponto de operação estável que atenda a demanda de potência reativa necessária e mantenha os níveis de tensão em valores aceitáveis após a ocorrência de distúrbios [1].

O SEP assume um novo ponto de operação após a ocorrência de um distúrbio. Atualmente, existem diversos métodos computacionais que calculam e avaliam este novo ponto de operação. Entretanto, alguns dos procedimentos de solução demandam tempo computacional elevado, mais especificamente se há a necessidade de avaliar

vários tipos de distúrbios diferentes. Portanto, é de fundamental importância o estudo e desenvolvimento de ferramentas e técnicas que possibilitem a avaliação do estado do sistema e as possíveis ações de controle que devem ser tomadas, caso este esteja operando de modo insatisfatório.

1.2 Objetivos

A análise da estabilidade de tensão, ou da segurança de tensão, pode ser dividida nas etapas de avaliação e, se necessário, de reforço. A avaliação em barras de tensão controlada pode identificar resultado oposto ao esperado no que se refere ao efeito de ações de controle. Adicionalmente, indica se o fluxo de potência injetado em barras de carga está próximo do máximo. A partir da identificação da barra de carga crítica, para um determinado ponto de operação, a etapa de reforço consiste no cálculo de ações de controle, de modo a aumentar a distância entre a carga da barra crítica e o novo ponto máximo permitido. Este aumento de distância pode ser obtido através da alteração do perfil de tensão e, até mesmo, através do redespacho de potência ativa. Neste contexto, em [2] é apresentada uma metodologia sequencial iterativa para reforçar as condições de um sistema elétrico de potência.

Basicamente, a metodologia apresentada em [2] pode ser ilustrada através dos seguintes passos: i) identificar, a partir da rede completa, a sub-rede realmente utilizada para transmitir potência ativa dos geradores até a barra crítica; ii) identificar todos os caminhos de transmissão radiais entre a barra de carga e cada gerador e eliminar as barras intermediárias; iii) identificar o caminho de transmissão mais carregado, ou seja, aquele que apresenta a menor margem entre a carga no ponto de operação em análise e a carga máxima a ser atendida na barra; iv) identificar o ramo crítico do caminho mais carregado, através da análise dos sub-caminhos que começam no gerador até a barra de carga em análise, com a inclusão de um novo ramo a cada vez. Esta metodologia envolve, a cada iteração, a utilização em seqüência de três programas computacionais. Um para determinar a barra crítica, outro que determina os caminhos e ramos de transmissão críticos e um terceiro programa, de fluxo de potência ótimo, que diminui o fluxo de potência no ramo de transmissão crítico, através do redespacho de potência reativa e, se necessário, de potência ativa.

Portanto, o objetivo deste trabalho é implementar um único programa computacional que contemple tanto a busca dos caminhos e ramos críticos, quanto a diminuição do fluxo de potência ativa no ramo crítico. Além disto, este programa apresenta duas idéias principais. A primeira é o fato de se utilizar a teoria dos grafos na busca dos ramos críticos. A segunda é uma solução inovadora que emprega a técnica de análise de sensibilidade para definir as barras de geração mais adequadas ao redespacho de potência ativa e reativa. O fato de agregar a análise de sensibilidade, que é, em essência, muito rápida computacionalmente, a uma metodologia já consagrada, propicia uma ferramenta de análise de segurança de tensão muito eficaz, apta a ser utilizada na operação em tempo real.

1.3 Estrutura do Trabalho

O Capítulo II apresenta os conceitos e definições básicas relacionadas ao estudo da estabilidade de tensão.

O Capítulo III apresenta o desenvolvimento de um algoritmo para a identificação de ramos críticos. É desenvolvida uma metodologia para encontrar os caminhos de transmissão existentes, através da análise do fluxo de potência ativa entre as barras utilizando os conceitos da Teoria dos Grafos. Além disso, apresenta o modelo matemático para análise de sensibilidade, com três tipos básicos de variáveis de controle, utilizado neste trabalho para melhorar o fluxo de potência no ramo crítico.

O Capítulo IV apresenta os resultados para um sistema real de 34 barras, com análises e explicações de cada parte dos cálculos realizados.

O Capítulo V apresenta as conclusões sobre este trabalho e propõe possíveis estudos futuros.

O Apêndice A apresenta as deduções matemáticas dos índices e margens de estabilidade de tensão que propiciam a avaliação das condições de segurança.

O Apêndice B apresenta a Teoria dos Grafos utilizada no algoritmo de busca de caminhos de transmissão.

Capítulo II

Fundamentos da Estabilidade de Tensão

2.1 Introdução

A estabilidade de tensão está relacionada ao carregamento da rede de transmissão ou ocorrência de contingências. A instabilidade de tensão é caracterizada por um grande afundamento das tensões e o desligamento em cascata de linhas e geradores. O colapso de tensão ocorre pela característica das cargas do tipo potência constante tentar recuperar a demanda de potência pré-falta. Desta forma, a queda de tensão devido a um distúrbio qualquer, exige uma corrente maior para este tipo de carga. O acréscimo de corrente provoca o aumento das perdas nos elementos série da rede, reduzindo ainda mais o nível de tensão nas barras com deficiência de potência reativa, o que causa o aumento da corrente na carga e assim sucessivamente [3,4].

A análise de estabilidade pode ser feita basicamente através de duas abordagens, a dinâmica e a estática. A análise dinâmica é modelada por um sistema de equações não-lineares no domínio do tempo. Este método proporciona uma análise minuciosa, levando ao perfeito entendimento dos fenômenos que conduzem à instabilidade de tensão. Porém, exige um elevado esforço computacional. Como a maioria dos equipamentos possui um comportamento dinâmico lento, frente a fenômenos de instabilidade de tensão, a análise é feita, geralmente, considerando apenas suas equações algébricas. Ademais, estudos mostram que ambas abordagens produzem resultados similares [5].

A análise da estabilidade de tensão pode ser realizada através do traçado do perfil de tensão das barras em função do seu carregamento (curvas PV, QV e SV). Estas curvas têm sido recomendadas pelas empresas do setor elétrico nacional [6] e internacional [7] para avaliação das margens de estabilidade de tensão, sendo obtidas por sucessivas soluções do fluxo de potência, a partir de um caso base até o ponto de máximo carregamento. Um dos métodos utilizados para a obtenção destas curvas é o fluxo de potência continuado [8-11].

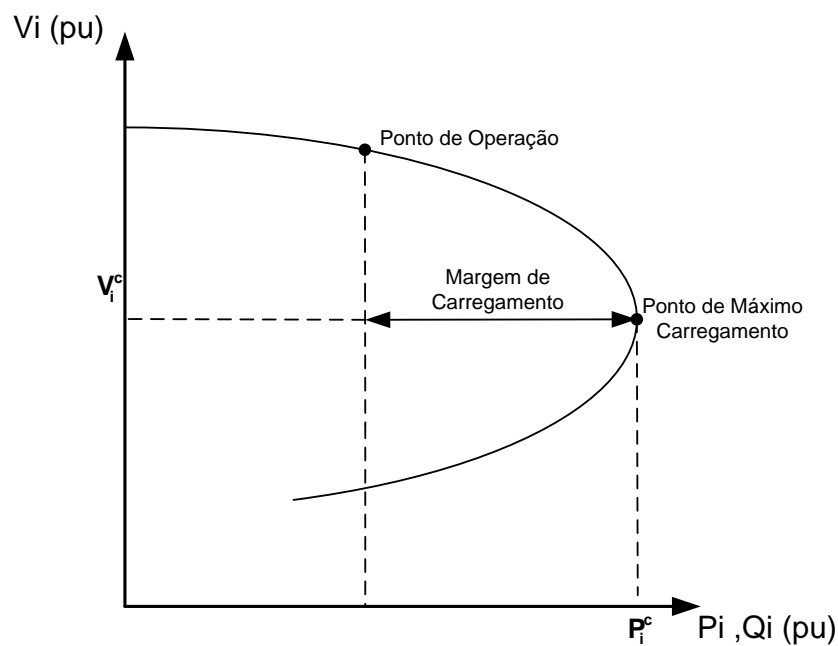


Figura 2-1 - Margem de Segurança

O ponto de máximo carregamento (PMC) significa o carregamento adicional máximo que o sistema suporta sem perder a estabilidade de tensão, sendo caracterizado pela singularidade da matriz Jacobiana quando a carga é do tipo potência constante. O método do ponto de colapso obtém diretamente o ponto de máximo carregamento, ou bifurcação, sem a necessidade de traçar as curvas de continuação [12]. Essa metodologia acrescenta, ao conjunto de equações do fluxo de potência, novas equações que caracterizam o ponto de máximo carregamento. Este ponto corresponde ao extremo da curva PV, como mostra a Figura 2-1, e define a fronteira entre as regiões de operação estável e instável. Para carregamentos maiores que o correspondente a este ponto, as equações do fluxo de potência não possuem solução, significando que o sistema não consegue suprir a carga especificada.

A margem de carregamento, ou margem de estabilidade de tensão, define a distância existente entre os pontos de operação e de máximo carregamento da rede. Esta distância pode ser representada através da potência ativa, reativa ou aparente [13]. Portanto, representa um valor de segurança para manter a operação do sistema na região estável. Existem, na literatura, métodos de cálculos de índices que indicam a proximidade entre tais pontos [14] e métodos de cálculo de margem que fornecem o acréscimo necessário em grandezas físicas (potência demandada, admitância conectada, dentre outras) de modo a alcançar o ponto de máximo carregamento [15].

2.2 Modelo Básico Duas Barras [16]

2.2.1 Desenvolvimento Matemático

Para a identificação de todos os caminhos de transmissão radiais entre a barra de carga e cada gerador, um dos passos é transformar as cargas das barras intermediárias em admitâncias e, posteriormente, eliminar tais barras. Portanto, o circuito equivalente é constituído por duas barras. Assim, são obtidos vários circuitos compostos de gerador, circuito π equivalente de transmissão e barra de carga. O mesmo gerador pode estar conectado à barra de carga por mais de um circuito de transmissão. Os ramos de transmissão não possuem parâmetros semelhantes aos de uma linha de transmissão. Os circuitos equivalentes de duas barras deverão ser recalculados toda vez que o ponto de operação é alterado.

A carga de cada um dos vários circuitos de duas barras resultantes é o fluxo de potências ativa e reativa injetada na barra de carga através do caminho de transmissão correspondente. A geração de cada um dos vários circuitos de duas barras resultantes é o fluxo de potência ativa e reativa que deixa a barra de geração através do caminho de transmissão correspondente.

Para ilustrar tal situação, seja o circuito de duas barras mostrado na Figura 2-2.

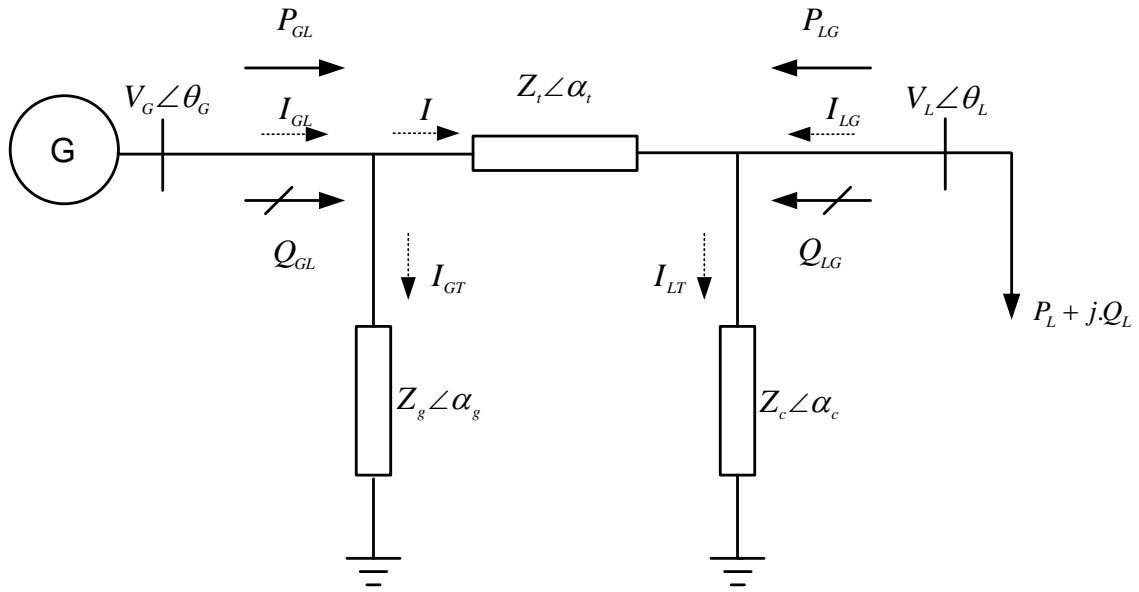


Figura 2-2 -Circuito Duas Barras Genérico

A potência aparente gerada é dada por:

$$\dot{S}_{GL}^* = P_{GL} - jQ_{GL} = \dot{V}_G^* (\dot{I} + \dot{I}_{GT}) \quad (2.1)$$

onde:

$$\dot{V}_G^* = V_G \angle -\theta_G \quad (2.2)$$

$$\dot{I} = \frac{V_G \angle \theta_G - V_L \angle \theta_L}{Z_t \angle \alpha_t} \quad (2.3)$$

$$\dot{I}_{GT} = \frac{V_G \angle \theta_G}{Z_g \angle \alpha_g} \quad (2.4)$$

Substituindo-se (2.2), (2.3) e (2.4) em (2.1) e separando em partes real e imaginária:

$$P_{GL} = V_G^2 \cdot \left[\frac{\cos(\alpha_t)}{Z_t} + \frac{\cos(\alpha_g)}{Z_g} \right] - \left(\frac{V_L \cdot V_G}{Z_t} \right) \cdot \cos(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (2.5)$$

$$Q_{GL} = V_G^2 \cdot \left[\frac{\text{sen}(\alpha_t)}{Z_t} + \frac{\text{sen}(\alpha_g)}{Z_g} \right] - \left(\frac{V_L \cdot V_G}{Z_t} \right) \cdot \text{sen}(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (2.6)$$

onde $\theta_{GL} = \theta_G - \theta_L$. Expressando a relação $\frac{Q_{GL}}{P_{GL}}$ por $\tan \phi$, então é possível obter a

tensão na barra de geração V_G em função desta relação:

$$V_G = V_L \cdot \frac{\text{sen}(\theta_{GL} + \alpha_t) - \tan(\phi) \cdot \cos(\theta_{GL} + \alpha_t)}{\text{sen}(\alpha_t) - \tan(\phi) \cdot \cos(\alpha_t) - \tan(\phi) \cdot \frac{Z_t}{Z_g} \cdot \cos(\alpha_g) + \frac{Z_t}{Z_g} \cdot \cos(\alpha_g)} \quad (2.7)$$

Os fluxos de potência ativa P_{GL} e reativa Q_{GL} que correspondem à máxima potência saindo da barra de geração podem ser determinados através dos vetores gradientes de ∇P_{GL} e ∇Q_{GL} quando alinhados na mesma direção, ou seja, quando $\nabla P_{GL} - \lambda \cdot \nabla Q_{GL} = 0$. Então:

$$\left(\frac{\partial P_{GL}}{\partial \theta_G} * \frac{\partial Q_{GL}}{\partial V_G} \right) - \left(\frac{\partial P_{GL}}{\partial V_G} * \frac{\partial Q_{GL}}{\partial \theta_G} \right) = 0 \quad (2.8)$$

O vetor gradiente de potência ativa e reativa, em relação ao módulo e ângulo da tensão na barra de geração, é dado por:

$$\frac{\partial P_{GL}}{\partial \theta_G} = \left(\frac{V_L V_G}{Z_t} \right) \cdot \text{sen}(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial P_{GL}}{\partial V_G} = 2 \cdot V_G \cdot \left(\frac{\cos(\alpha_t)}{Z_t} + \frac{\cos(\alpha_g)}{Z_g} \right) - \left(\frac{V_L}{Z_t} \right) \cos(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial Q_{GL}}{\partial \theta_G} = - \left(\frac{V_L V_G}{Z_t} \right) \cdot \cos(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial Q_{GL}}{\partial V_G} = 2 \cdot V_G \cdot \left(\frac{\cos(\alpha_t)}{Z_t} + \frac{\cos(\alpha_g)}{Z_g} \right) - \left(\frac{V_L}{Z_t} \right) \text{sen}(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (2.12)$$

Substituindo as equações (2.9), (2.10), (2.11) e (2.12) em (2.8), obtém-se o módulo da tensão na barra de geração para o máximo fluxo de potência:

$$V_G^C = \frac{V_L}{2 \cdot \left(\cos(\theta_{GL}) + \frac{Z_t}{Z_g} \cos(\theta_{GL} + \alpha_t + \alpha_g) \right)} \quad (2.13)$$

Para obter o ângulo θ_{GL} nestas mesmas condições, substitui-se (2.13) em (2.7).

Assim:

$$\tan(2\theta_{GL}^C) = \frac{\text{sen}(-\phi + \alpha_t) + \left(\frac{Z_t}{Z_g} \right) \cdot \text{sen}(-\phi + 2 \cdot \alpha_t - \alpha_g)}{-\cos(-\phi + \alpha_t) - \left(\frac{Z_t}{Z_g} \right) \cdot \cos(-\phi + 2 \cdot \alpha_t - \alpha_g)} \quad (2.14)$$

A equação (2.14) retorna os valores da defasagem angular θ_{GL} nos quatro quadrantes, mas somente um destes corresponde ao máximo fluxo de potência. Logo, verificam-se os resultados para avaliar qual está associado ao máximo fluxo de potência substituindo os valores calculados nas equações (2.5) e (2.7). Se o valor substituído retornar valores positivos de potência ativa e tensão na barra de geração, este será o valor da defasagem angular θ_{GL} . Utilizando (2.13) e (2.14) é possível calcular, a partir de (2.5) e (2.6), os valores máximos da geração.

$$P_{GL}^C = V_G^{C^2} \cdot \left[\frac{\cos(\alpha_t)}{Z_t} + \frac{\cos(\alpha_g)}{Z_g} \right] - \left(\frac{V_L \cdot V_G^C}{Z_t} \right) \cdot \cos(\theta_{GL}^C + \alpha_t) \quad (2.15)$$

$$Q_{GL}^C = V_G^{C^2} \cdot \left[\frac{\text{sen}(\alpha_t)}{Z_t} + \frac{\text{sen}(\alpha_g)}{Z_g} \right] - \left(\frac{V_L \cdot V_G^C}{Z_t} \right) \cdot \text{sen}(\theta_{GL}^C + \alpha_t) \quad (2.16)$$

A potência aparente que sai da barra de carga é dada por:

$$\dot{S}_{LG}^* = P_{LG} - jQ_{LG} = \dot{V}_L^* (-\dot{I} + \dot{I}_{LT}) \quad (2.17)$$

onde:

$$\dot{I}_{LT} = \frac{V_L \angle \theta_L}{Z_c \angle \alpha_c} \quad (2.18)$$

Substituindo (2.3) e (2.18) em (2.17) obtém-se:

$$\begin{aligned} S_{LG}^* &= \left[\frac{V_L^2}{Z_t} \cdot \cos(-\alpha_t) - \frac{V_L V_G}{Z_t} \cdot \cos(-\theta_{LG} - \alpha_t) + \frac{V_L^2}{Z_c} \cos(-\alpha_c) \right] \\ &- j \left[-\frac{V_L^2}{Z_t} \cdot \text{sen}(-\alpha_t) + \frac{V_L V_G}{Z_t} \cdot \text{sen}(-\theta_{LG} - \alpha_t) - \frac{V_L^2}{Z_c} \text{sen}(-\alpha_c) \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

Logo:

$$P_{LG} = \frac{V_L^2}{Z_t} \cdot \cos(-\alpha_t) - \frac{V_L V_G}{Z_t} \cdot \cos(-\theta_{LG} - \alpha_t) + \frac{V_L^2}{Z_c} \cos(-\alpha_c) \quad (2.20)$$

$$Q_{LG} = -\frac{V_L^2}{Z_t} \cdot \text{sen}(-\alpha_t) + \frac{V_L V_G}{Z_t} \cdot \text{sen}(-\theta_{LG} - \alpha_t) - \frac{V_L^2}{Z_c} \text{sen}(-\alpha_c) \quad (2.21)$$

Expressando a relação $\frac{Q_{LG}}{P_{LG}}$ por $\tan \phi'$, então é possível obter a tensão na barra

de carga V_L em função desta relação. Assim:

$$\tan \phi' = \frac{-V_L \cdot Z_c \cdot \text{sen}(-\alpha_t) + V_G \cdot Z_c \cdot \text{sen}(-\theta_{LG} - \alpha_t) - V_L \cdot Z_t \cdot \text{sen}(-\alpha_c)}{V_L \cdot Z_c \cdot \cos(-\alpha_t) - V_G \cdot Z_c \cdot \cos(-\theta_{LG} - \alpha_t) + V_L \cdot Z_t \cdot \cos(-\alpha_c)} \quad (2.22)$$

Portanto:

$$\begin{aligned} \left[V_L \cdot Z_c \cdot \cos(-\alpha_t) - V_G \cdot Z_c \cdot \cos(-\theta_{LG} - \alpha_t) + V_L \cdot Z_t \cdot \cos(-\alpha_c) \right] \tan \phi' = \\ -V_L \cdot Z_c \cdot \text{sen}(-\alpha_t) + V_G \cdot Z_c \cdot \text{sen}(-\theta_{LG} - \alpha_t) - V_L \cdot Z_t \cdot \text{sen}(-\alpha_c) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Rearranjando os termos:

$$V_L \left[Z_c \cdot \cos(-\alpha_t) \cdot \tan \phi' + Z_t \cdot \cos(-\alpha_c) \cdot \tan \phi' + Z_c \cdot \sin(-\alpha_t) + Z_t \cdot \sin(-\alpha_c) \right] = V_G \left[Z_c \cdot \cos(-\theta_{LG} - \alpha_t) \cdot \tan \phi' + Z_c \cdot \sin(-\theta_{LG} - \alpha_t) \right] \quad (2.24)$$

Finalmente:

$$V_L = V_G \frac{Z_c \cdot \cos(-\theta_{LG} - \alpha_t) \cdot \tan \phi' + Z_c \cdot \sin(-\theta_{LG} - \alpha_t)}{Z_c \cdot \left[\cos(-\alpha_t) \cdot \tan \phi' + \sin(-\alpha_t) \right] + Z_t \cdot \left[\cos(-\alpha_c) \cdot \tan \phi' + \sin(-\alpha_c) \right]} \quad (2.25)$$

ou ainda:

$$V_L = V_G \frac{\cos(-\theta_{LG} - \alpha_t) \cdot \tan \phi' + \sin(-\theta_{LG} - \alpha_t)}{\cos(-\alpha_t) \cdot \tan \phi' + \sin(-\alpha_t) + \frac{Z_t}{Z_c} \cdot \left[\cos(-\alpha_c) \cdot \tan \phi' + \sin(-\alpha_c) \right]} \quad (2.26)$$

Se a impedância shunt Z_c é muito maior do que Z_t :

$$V_L = V_G \frac{\cos(-\theta_{LG} - \alpha_t) \cdot \tan \phi' + \sin(-\theta_{LG} - \alpha_t)}{\cos(-\alpha_t) \cdot \tan \phi' + \sin(-\alpha_t)} \quad (2.27)$$

As tensões geradas no ponto de operação e a tensão máxima completam a análise, pois determinam a região de operação. Assim, θ_{GL} no ponto de operação é substituído em (2.13) referente ao módulo da tensão crítica V_G^C .

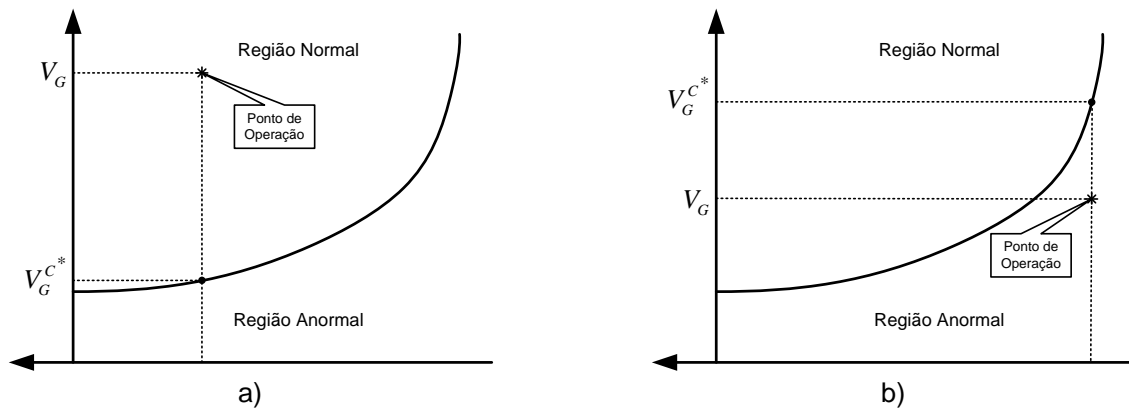


Figura 2-3 - Localização do Ponto de Operação

Quando $V_G > V_G^{C*}$ o ponto de operação pertence à parte superior da curva SV, Figura 2-3(a). Caso contrário, o ponto de operação pertence à parte inferior, Figura 2-3(b). Se $V_G = V_G^{C*}$ o ponto corresponde à máxima potência que sai da barra do gerador e $\theta_{GL} = \theta_{GL}^C$ e $V_G = V_G^{C*} = V_G^C$.

2.2.2 Aplicação Prática

Seja um sistema com duas barras onde a tensão na barra geradora V_G é $1 \angle 0^\circ$ pu, a impedância série da linha de transmissão Z_l é $0,3 \angle 75^\circ$ pu e as impedâncias shunts do modelo π são desprezadas. A Figura 2-4 apresenta a curva PV correspondente a $\phi' = 45^\circ$ indutivo.

À medida que a potência ativa cresce mantendo ϕ' constante, uma tensão única na barra de carga é dada por $V_L = 0,517$ pu. A potência ativa correspondente a esta tensão, $P_{LG} = 0,632$ pu, representa o ponto de máximo carregamento. Para cargas maiores que este ponto, não existe solução para a tensão. Logo, existe um limite máximo de carregamento para cada fator de potência da carga.

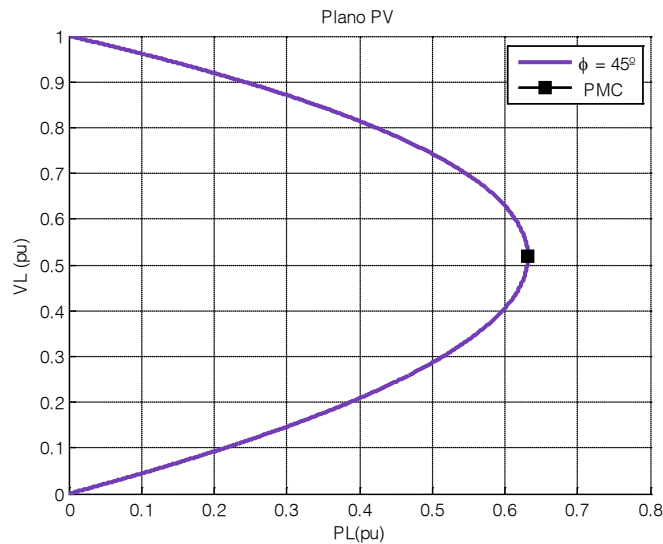


Figura 2-4 - Curva PV para Fator de Potência Constante

A Figura 2-5 apresenta várias curvas PV para diferentes fatores de potência da carga. O limite de estabilidade de tensão (LET) descreve a variação dos pontos de máximo carregamento, à medida que o fator de potência da carga varia.

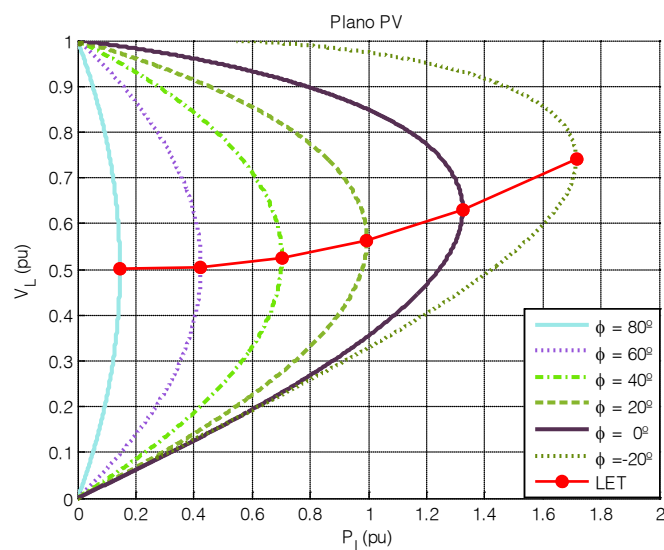


Figura 2-5 - Limite de Estabilidade de Tensão no Plano PV

A Figura 2-6 apresenta várias curvas P e Q constantes no plano θV . Quanto mais interna é a curva, maior a potência ativa transmitida para a carga. Há sete níveis diferentes de carga ativa e reativa constante a partir de $P_{LG} = 3,22$ pu e $Q_{LG} = -12,02$ pu, até $P_{LG} = 0,22$ pu e $Q_{LG} = 0,80$ pu. O ponto de máximo fluxo de potência ativa para a carga é $P_{LG} = 3,22$ pu e $Q_{LG} = -12,02$ pu, correspondendo a um ângulo de fator de

potência igual a -75° . Neste caso, a impedância de carga é o conjugado da impedância série da linha de transmissão.

O limite de estabilidade de tensão representado no gráfico da Figura 2-6 é a união dos pontos onde as curvas P e Q se interceptam num único ponto no plano θV . Cada um destes pontos representa o máximo carregamento e seu valor depende do ângulo do fator de potência. O limite de estabilidade angular (LEA), representado por uma reta paralela ao eixo V_{LG} passando por $\theta_{LG} = -75^\circ$, define o ponto onde ocorre a máxima transferência de potência ativa para a carga. As curvas correspondentes ao LET e LEA se interceptam num único ponto onde $P_{LG} = 3,22$ pu e $Q_{LG} = -12,02$ pu.

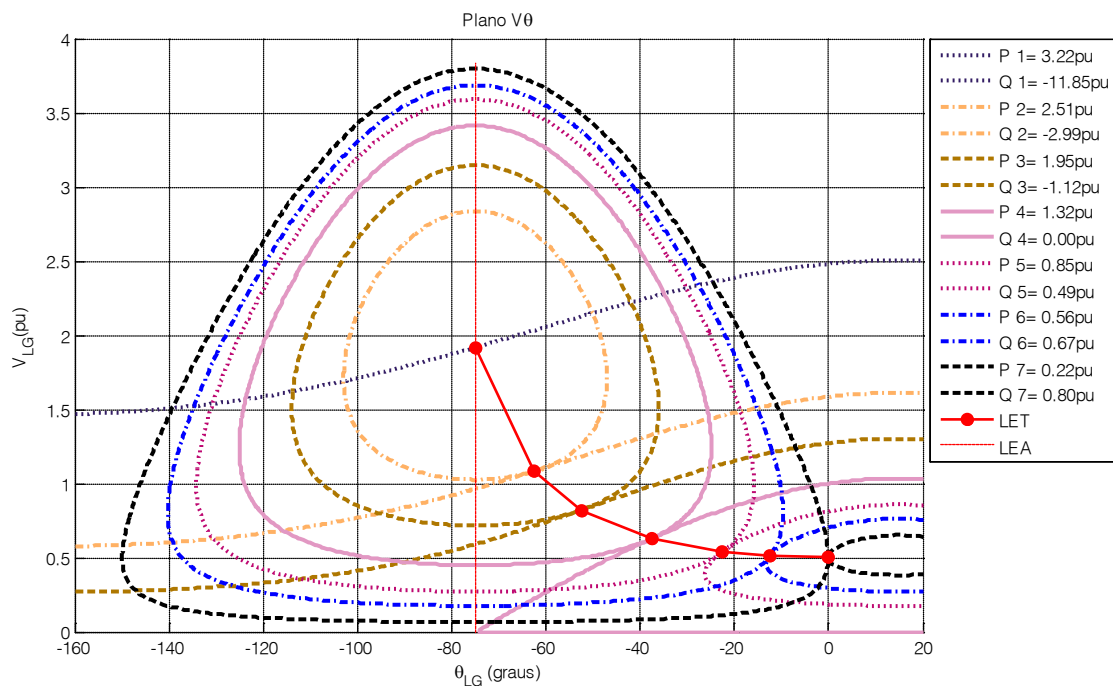


Figura 2-6 - Curvas PQ constantes no Plano V x θ

2.3 Metodologia para Reforço das Condições de Segurança de Tensão [2]

De modo geral, uma barra de carga pode receber potência de mais de um caminho de transmissão. Se dois geradores estão conectados por duas linhas de transmissão a uma única carga e toda a geração necessária vem de um único gerador, à

medida que a carga cresce a potência ativa por este caminho atinge seu máximo. Obviamente, a carga pode continuar a crescer, desde que a potência necessária seja produzida por outro gerador e flua por outro caminho de transmissão.

2.3.1 Identificação dos Caminhos de Transmissão

A metodologia desenvolvida em [2] analisa os fluxos de potência ativa em todos os ramos e identifica a sua direção a partir da barra de carga crítica até cada barra de geração. Existem diferentes caminhos de transmissão que levam a potência de cada gerador até a barra crítica. O procedimento é isolar e identificar cada um destes caminhos de transmissão radiais entre a barra crítica e cada gerador. Deste modo, pode-se ter mais de um caminho de transmissão entre um determinado gerador e a barra crítica em análise. De modo análogo, um mesmo ramo pode pertencer a mais de um caminho de transmissão.

Na Figura 2-7 é mostrado um caminho de transmissão genérico onde estão representados os fluxos de potência ativa e reativa de uma barra de geração m até uma barra de carga i , incluindo os fluxos de potência intermediários. Cada ramo pode transmitir quantidades diferentes de potência.

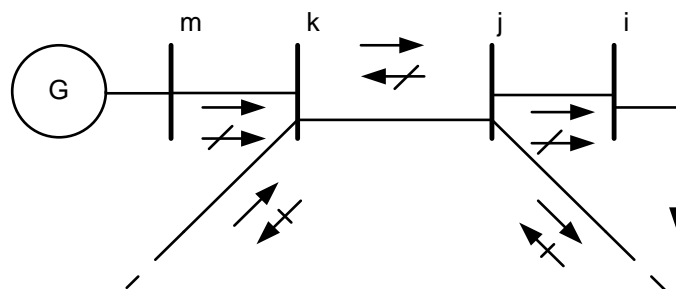


Figura 2-7 - Caminho Genérico de Transmissão

2.3.1.1 Identificação da sub-rede

O primeiro passo determina a porção da rede de transmissão realmente utilizada para transmitir potência ativa dos geradores até a barra crítica. Os seguintes passos estão envolvidos na execução dessa idéia:

1. Para definir a sub-rede, basta verificar o sinal do fluxo de potência ativa. As barras j conectadas a barra de carga crítica i pertencem a sub-rede se $P_{ij} < 0$. A barra k , conectada a barra j , pertence à sub-rede se $P_{jk} < 0$. A barra l , conectada a barra k , pertence à sub-rede se $P_{lk} < 0$. A busca termina quando o fluxo de potência ativa chega na barra de geração m .
2. Para isolar a sub-rede do resto do sistema é necessário transformar em admitâncias os fluxos de potência ativa que deixam a sub-rede a partir dos nós intermediários, assim como os fluxos de potência reativa que deixam e que chegam à sub-rede nos nós intermediários. Por definição, não há fluxos de potência ativa chegando na sub-rede.

Um sistema reduzido composto de uma barra de carga ligada por uma rede de transmissão com vários nós intermediários a um ou mais geradores é obtido.

2.3.1.2 Identificação dos Caminhos de Transmissão

O segundo procedimento é determinar todos os caminhos de transmissão radiais entre o gerador e cada barra de carga e, em seguida, eliminar as barras intermediárias. Estes caminhos sempre contêm a barra crítica e uma das barras de geração que lhe forneça potência ativa. Estes caminhos radiais devem ser reduzidos a circuitos duas barras equivalentes. Para isto, os fluxos de potência ativa e reativa, que chegam ou saem das barras intermediárias dos caminhos de transmissão, são transformados em admitâncias. Assim, vários circuitos equivalentes de transmissão são obtidos, onde um mesmo gerador pode conectar-se à barra de carga através de circuitos distintos.

Posteriormente, as barras intermediárias são eliminadas através do processo de redução de rede [17], transformando a rede num circuito duas barras. Este trabalho utiliza a própria matriz de admitâncias $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ referente às barras de um determinado caminho. A matriz de admitâncias é decomposta nas matrizes A, B, C e D, como mostrado no Apêndice A, equação (A.2). Utilizando a equação (A.4), uma matriz de admitâncias, reduzida de ordem 2×2 , é facilmente calculada, propiciando as impedâncias de ramo série e em derivação na geração e na carga.

O módulo e o ângulo da tensão nas barras de geração e carga, assim como os fluxos de potência, saindo da barra de geração e que entram na barra de carga do

circuito reduzido, possuem os mesmos valores daqueles calculados para a rede completa.

A carga de cada circuito duas barras resultante corresponde ao fluxo de potência ativa e reativa que chega à barra de carga, enquanto a geração de cada circuito duas barras resultante corresponde ao fluxo de potência ativa e reativa que sai da barra de geração através do caminho de transmissão correspondente.

As admitâncias dos circuitos reduzidos representam o comportamento do sistema às quais as barras de geração e carga pertence. Desta forma, as admitâncias da rede completa, tensões nodais das barras intermediárias e seus fluxos de potência ativa e reativa já são considerados. Conseqüentemente, a mudança do ponto de operação altera o valor destas variáveis, o que restringe a validade do circuito reduzido a apenas um determinado ponto de operação.

Um fator relevante na representação dos caminhos de transmissão radiais, em circuitos reduzidos a duas barras, é o fato de seus ramos série e em derivação não possuírem parâmetros semelhantes aos das linhas de transmissão. A explicação está no fato da transformação dos fluxos de potências que deixam ou entram nas barras intermediárias em admitâncias e a posterior redução do sistema. Logo, o objetivo desta redução é avaliar o comportamento dos caminhos de transmissão, através da margem de carregamento e análise das variações no módulo e ângulo das tensões.

2.3.1.3 Identificação do Caminho de Transmissão Mais Carregado

O terceiro procedimento é a identificação do caminho de transmissão mais carregado, feito pela comparação da geração no ponto de operação e a geração máxima calculada.

A margem de potência pode ser expressa em valores por unidade ou percentual. Se o ponto de operação está na parte superior da curva SV, utiliza-se a equação (A.28) ou (A.29). Porém, se o ponto está na parte inferior da curva SV, utiliza-se a equação (A.30) ou (A.31). O caminho de transmissão crítico é aquele que possui a menor margem, dentre todos os circuitos duas barras que representam os caminhos de transmissão existentes entre a barra crítica e as barras de geração.

2.3.2 Determinação do Ramo Crítico

A identificação do ramo crítico de transmissão inicia-se avaliando os ramos do caminho crítico de transmissão, começando do gerador e incluindo um ramo por vez até chegar à barra crítica. De modo análogo, os fluxos de potência ativa e reativa que saem das barras intermediárias são transformados em admitâncias. Posteriormente, é realizada a redução do caminho radial para um circuito duas barras. A margem na barra de geração é calculada para cada ramo incluído.

Considere a Figura 2-7 para exemplificar o procedimento de identificação do ramo de transmissão crítico. Primeiramente, analisa-se o ramo $m-k$ composto pela barra de geração m e pela barra de carga intermediária k , cuja carga é dada pelo somatório dos fluxos de potência que entram ou saem dela. Através de um circuito duas barras reduzido, calcula-se a margem do ramo M_{mk} . A seguir, o ramo $k-j$ é incluído e a barra k é eliminada pela decomposição da matriz $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ desta rede radial. Obtêm-se um outro circuito duas barras reduzido composto pelo gerador m e a barra de carga intermediária j , cuja carga é dada pelo somatório dos fluxos de potência que entram ou saem dela. Calcula-se a margem do ramo M_{kj} . Finalmente, o ramo $j-i$ é incluído e a barra j é eliminada obtendo-se um circuito duas barras reduzido composto pelo gerador m e a barra de carga crítica i . Calcula-se a margem do ramo M_{ji} . O ramo crítico é aquele que possui a menor margem dentre todas as margens calculadas (M_{mk} , M_{kj} e M_{ji}).

2.3.3 Reforço das Condições de Segurança de Tensão

O último passo da análise é tentar diminuir o fluxo de potência com o objetivo de reforçar as condições de estabilidade e segurança do sistema. Para isso, são identificadas as variáveis mais relevantes, como a geração de potência ativa e a tensão em barras de geração, empregadas para diminuir o fluxo de potência no ramo crítico.

Em [2] isso é conseguido através do programa computacional de fluxo de potência ótimo. Assim, na primeira iteração de reforço, o redespacho de potência reativa é proibido em todas as barras, exceto na barra $V\theta$ responsável por absorver a variação das perdas ativas. Se todas as margens nodais de potência são consideradas aceitáveis, o procedimento termina. Os valores da margem de carregamento para contingências

simples deve ser maior ou igual a 6% [6]. Considerando-se não aceitáveis valores inferiores a esta margem, redespachos de potência ativa são realizados nas próximas iterações.

Neste trabalho, o método utilizado para realizar a diminuição do fluxo de potência no ramo crítico e, conseqüentemente, elevar a margem de segurança é a análise de sensibilidade. Esta ferramenta é eficaz para a determinação do tipo de controle a ser implementado, além de ser de fácil compreensão e exigir pouco esforço computacional. No próximo capítulo, a análise de sensibilidade será estudada em detalhes.

Capítulo III

Novas Proposições

3.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar duas novas proposições a serem incorporadas na metodologia apresentada em [2]. A primeira é a utilização da teoria de grafos com o objetivo de buscar os ramos críticos num sistema elétrico de potência. A segunda emprega a técnica da análise de sensibilidade para definir as barras de geração mais adequadas ao redespacho de potência ativa e reativa.

3.2 Proposição para a Identificação dos Caminhos de Transmissão

Esta proposição utiliza a teoria dos grafos, estando baseada na montagem da lista de adjacências e na busca em profundidade por caminhos de transmissão na lista de adjacências. Estes dois tópicos estão ilustrados a seguir:

3.2.1 Montagem da Lista de Adjacências

Com os resultados do fluxo de potência, uma matriz denominada Lista de Adjacências é obtida, (Apêndice B, Seção B.2) contendo todas as barras associadas as suas respectivas barras adjacentes que lhes fornecem potência ativa. A seguir, serão listados alguns passos úteis para a concepção desta idéia:

- i. A lista de adjacências é determinada a partir do sinal dos fluxos de potência ativa, calculados através do fluxo de potência convencional. Considere a barra j conectada a uma barra i . Esta barra pertence a um caminho de transmissão que começa na barra de geração m e termina em i . Como o fluxo de potência ativa no ramo $i-j$ é negativo ($P_{ij} < 0$), adiciona-se j na linha referente à barra i da lista de adjacências. Assim, este processo se repete até que todas as barras que fornecem potência ativa para a barra i sejam identificadas e armazenadas na lista de adjacências;
- ii. Analogamente, todas as outras barras são analisadas individualmente. As barras conectadas que fornecem potência ativa são inseridas na linha da lista de adjacências correspondente a barra que recebe essa potência;
- iii. Após a análise de todo o sistema, obtém-se a lista de adjacências com todas as barras. Cada linha desta lista representa uma barra e os elementos que a compõem são as barras conectadas que fornecem potencia ativa. Deste modo, constrói-se uma matriz contendo a conexão das barras da rede orientada pelo fluxo de potência do sistema.

A montagem da lista de adjacências fornece dados importantes para entender o comportamento do fluxo de potência. De modo geral, todas as barras de carga possuem ao menos uma barra conectada, enquanto as barras de geração não possuem, comprovando que esta lista retrata consistentemente o comportamento do fluxo entre os ramos.

Com esta matriz, é possível seguir uma lógica para a determinação de todos os caminhos de transmissão existentes que levam à barra de carga crítica pré-determinada. Para isto, podem ser utilizados os conceitos de busca em largura (Apêndice B, Seção B.3) e em profundidade (Apêndice B, Seção B.4). Este trabalho utiliza os conceitos do

segundo, visto possuir maior facilidade de aplicação e eficiência para buscar os caminhos de transmissão.

3.2.2 Busca em Profundidade por Caminhos de Transmissão na Lista de Adjacências [18]

A presente subseção aplica os conceitos de busca em profundidade na lista de adjacências para obter os caminhos de transmissão. Por comodidade, um caminho de transmissão inicia-se sempre a partir da barra crítica e termina logo após o algoritmo ter encontrado uma barra de geração. Este fato repete-se até que sejam encontrados todos os possíveis caminhos, sendo desprezadas as barras que não contribuem com potência ativa para a barra crítica. Daí decorre a separação do subsistema que realmente interessa na determinação do caminho crítico. Portanto, somente a área de interesse para a solução do problema de estabilidade de tensão é analisada.

Todos os caminhos de transmissão encontrados são colocados na linha de uma matriz que armazena o resultado da busca. O método envolve vários estágios, estando o primeiro e básico listado a seguir para a melhor compreensão dos processos utilizados:

- i. A busca sempre se inicia a partir de uma barra crítica. Logo este é o primeiro elemento em todas as linhas da matriz que, ao final do processo, contém todos os caminhos de transmissão que levam a potência ativa para esta barra;
- ii. O processo prossegue analisando, isoladamente, cada barra adjacente à barra crítica. Estas são colocadas numa determinada linha da matriz que contém os caminhos de transmissão;
- iii. Um zero na lista de adjacências significa que uma barra de geração é encontrada. Quando isto ocorre, há caminho de transmissão de potência e o programa verifica todas as barras para recomençar a busca por novos caminhos de transmissão.

Para garantir o funcionamento do método, faz-se necessário o uso de apontadores para indicar as barras percorridas. O primeiro apontador indica três estados distintos para as barras: não visitada, visitada e finalizada. As barras não visitadas e

visitadas são sempre percorridas para garantir que todos os caminhos sejam encontrados. A diferença entre ambas é que a segunda pode estar conectada somente a barras finalizadas, sendo necessária uma avaliação do estado de todas as suas barras adjacentes no final da busca de cada caminho. Em caso afirmativo, a barra considerada, até então como visitada, passa a condição de barra finalizada e não mais verificada pelo algoritmo.

É válido lembrar que as barras de geração não possuem outras barras lhes fornecendo potência ativa e, portanto, não possuem elementos ligados dentro da lista de adjacências, sendo suas linhas correspondentes completadas com zeros. Neste caso, o programa sempre as considera como finalizadas. Contudo, este estado pode alterar-se através de outro apontador utilizado para fazer o controle das buscas.

Como uma barra pode pertencer a vários caminhos distintos, há também a necessidade de verificar se realmente uma barra é finalizada, ou seja, se todos os caminhos de transmissão que incluem tal barra já são conhecidos. Para encontrá-los, é utilizado outro apontador que bloqueia a busca através das barras finalizadas quando suas barras adjacentes estão finalizadas. Desta forma, as barras adjacentes e as outras conectadas às adjacentes retornam a condição de barras não visitadas.

Finalmente, a determinação dos caminhos de transmissão termina quando todas as barras adjacentes à barra crítica encontram-se finalizadas. Assim, o algoritmo termina a sua busca e uma matriz contendo todos os caminhos de transmissão possíveis é definida.

3.2.3 Exemplo

A Figura 3-1 mostra o diagrama de um sistema elétrico de potência, 8 barras, sendo 5 de carga e 3 de geração. Para simplificar a análise dos caminhos de transmissão, o cálculo dos fluxos de potência ativa e dos índices que determinam a barra crítica será evitado. Seja a barra 4 crítica. As setas pontilhadas indicam o sentido dos fluxos de potência ativa nos ramos da rede.

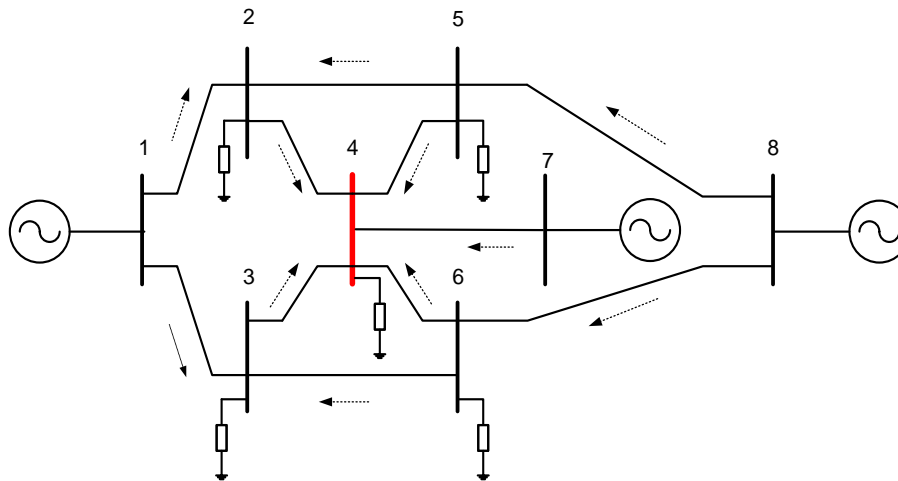


Figura 3-1 - Sistema com 8 Barras

A montagem da lista de adjacências é feita através das ligações existentes entre as barras considerando a direção do fluxo de potência ativa. Portanto, a lista de adjacências possui o número de linhas igual ao número de barras, estando nestas linhas alocadas todas as respectivas barras que lhes fornecem potência ativa. A Tabela 3-1 apresenta a lista de adjacências para a Figura 3-1.

Tabela 3-1 - Lista de Adjacências para o Sistema com 8 Barras

Nº da Barra	1º Adjacente	2º Adjacente	3º Adjacente	4º Adjacente	5º Adjacente
1	0	0	0	0	0
2	1	5	0	0	0
3	1	6	0	0	0
4	2	3	5	6	7
5	8	0	0	0	0
6	8	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0

Da Tabela 3-1, verifica-se claramente que as barras de geração 1, 7 e 8 não possuem nenhuma adjacente. As outras barras de carga possuem ao menos uma adjacente. Outro fato importante a ser destacado é a participação de todas as barras na lista de adjacências. Isto significa que todo o sistema participa fornecendo potência ativa para a barra crítica. Contudo, este fato pode não ocorrer em redes de grande porte.

A Figura 3-2 apresenta um diagrama extraído da lista de adjacências, onde são mostradas as ligações desde a barra crítica até as barras de geração que lhes fornece potência ativa. As setas indicam apenas a ligação entre as barras. O sentido do fluxo de potência é exatamente o oposto ao indicado pelas setas. Portanto, há sete caminhos de

transmissão de potência ativa dos geradores até a barra crítica, a serem definidos pelo algoritmo de busca em profundidade desenvolvido neste trabalho.

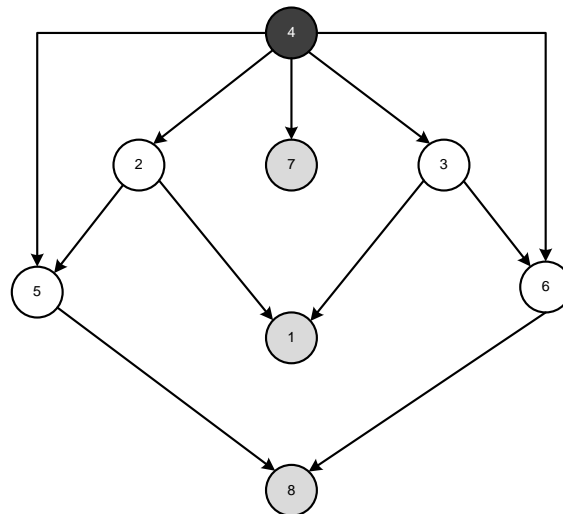


Figura 3-2 - Diagrama do Fluxo de Potência Ativa

A separação dos caminhos de transmissão possíveis será detalhada a seguir:

- i. Inicialmente, todas as barras são definidas como não-visitadas pelo apontador que indica os caminhos percorridos. Não há nenhuma barra bloqueada na lista de adjacências;
- ii. A busca pelos caminhos de transmissão inicia-se sempre pela barra 4 que corresponde ao primeiro elemento do primeiro caminho a ser definido. Este, por sua vez, é determinado através da busca em profundidade pelos elementos da lista de adjacência, Figura 3-3(a);
- iii. O segundo elemento a compor este caminho é o primeiro elemento da lista de adjacências da barra 4, ou seja, a barra 2. Esta barra é marcada como visitada, Figura 3-3(b), e a busca prossegue através da primeira barra adjacente na lista de adjacências;
- iv. Deste modo, a barra 1 passa a pertencer ao primeiro caminho, sendo marcada como finalizada, Figura 3-3(c), já que em sua respectiva linha na lista de adjacências não existe nenhuma barra conectada;
- v. A busca por mais barras é encerrada, uma vez que é encontrada uma barra de geração. Neste ponto, o primeiro caminho é dado por 4 – 2 – 1.

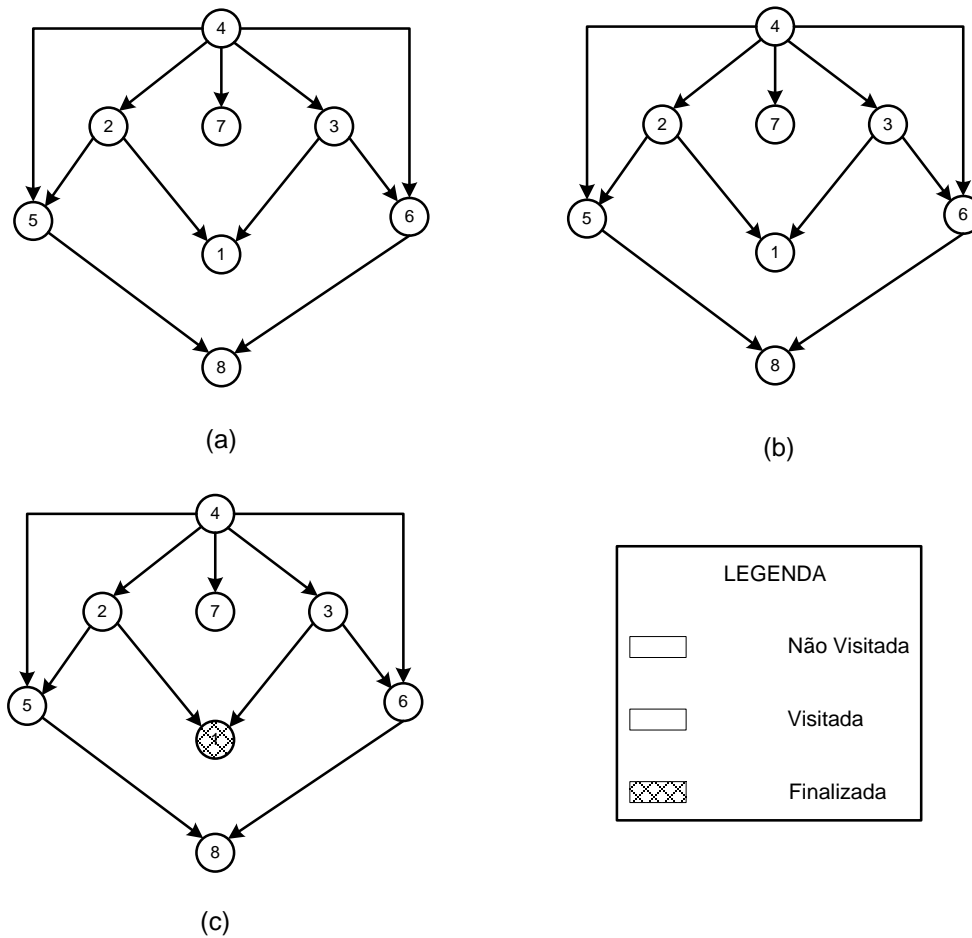


Figura 3-3 - Busca do Primeiro Caminho de Transmissão

A seguir, apresentam-se os passos para a busca do segundo caminho de transmissão:

- i. O algoritmo adiciona a barra 4 como o primeiro elemento do segundo caminho e busca na lista de adjacências barras adjacentes não marcadas como finalizadas;
- ii. Como a primeira barra adjacente é a 2, esta é novamente adicionada ao segundo caminho por ser uma barra visitada;
- iii. A primeira barra adjacente à 2 na lista de adjacências é a 1, porém está finalizada e não pode pertencer ao caminho em questão, Figura 3-3(c). Então, a opção é escolher a barra 5 e mudar a sua marcação para visitada, após adicioná-la ao caminho buscado, Figura 3-4(a);

- iv. A barra 8 é de geração, além de ser a única que fornece potência ativa a 5, Figura 3-4(b). Logo, o segundo caminho de transmissão é dado por 4 – 2 – 5 – 8.

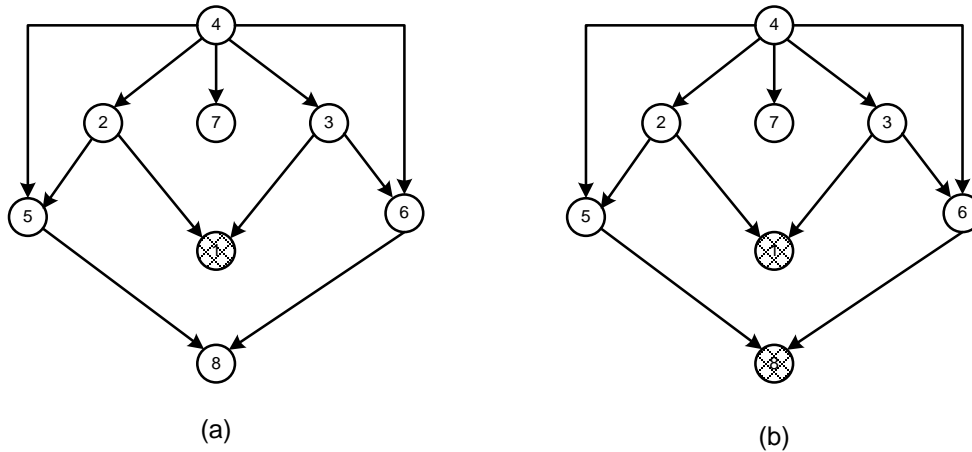


Figura 3-4 - Busca do Segundo Caminho de Transmissão

O algoritmo muda o estado da barra de visitada para finalizada quando todas as suas barras adjacentes também são consideradas finalizadas. A barra 5 ao final do processo de busca do segundo caminho é um exemplo, pois é adjacente a uma barra de geração finalizada. Conseqüentemente, seu estado muda para finalizada como indica a Figura 3-5(a).

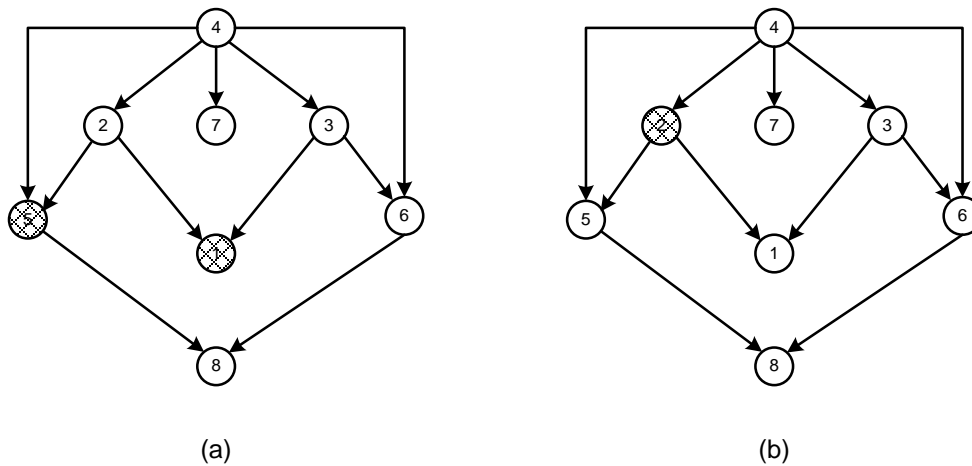


Figura 3-5 - Mudança de Estado dos Apontadores

O mesmo procedimento é realizado para a barra 2, que agora possui as barras 1 e 5 finalizadas. A objetivo desta ação é impedir que a barra 2 seja verificada novamente pelo algoritmo e liberar as barras adjacentes para possível análise posterior. A Figura 3-5(b) ilustra o estado dos indicadores antes do início de uma nova busca.

Os outros caminhos são determinados de forma análoga. Assim, o terceiro e quarto caminhos de transmissão são, respectivamente, $4 - 3 - 1$ e $4 - 3 - 6 - 8$. A Figura 3-6(a) representa o final da busca do terceiro caminho, enquanto a Figura 3-6(b) representa o quarto.

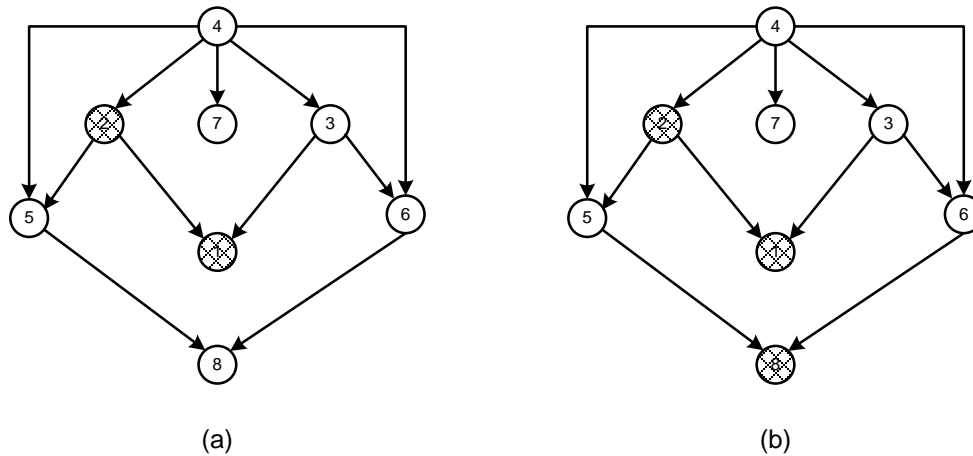


Figura 3-6 - Final da Busca de 2 Caminhos de Transmissão

Neste ponto, ocorre outra vez a mudança do estado dos apontadores de barras visitadas para finalizadas nas barras 3, Figura 3-7(a), e 6, Figura 3-7(b), assim como ocorreu para as barras 5 e 1.

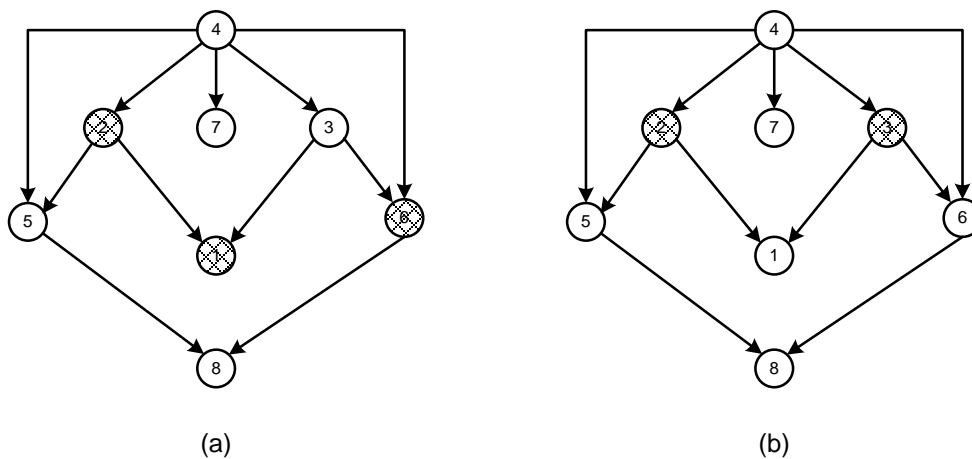


Figura 3-7 - Mudança dos Estados dos Apontadores

Os caminhos pelas barras 2 e 3 estão bloqueados e o algoritmo é obrigado a procurar na lista de adjacências outras barras adjacentes a 4, pois esta ainda possui barras não-visitadas. O quinto caminho, dado por $4 - 5 - 1$, é então identificado como mostrado na Figura 3-8(a). Após o fim da busca deste caminho a barra 5 muda seu estado para finalizada, Figura 3-8(b), e um novo caminho é determinado.

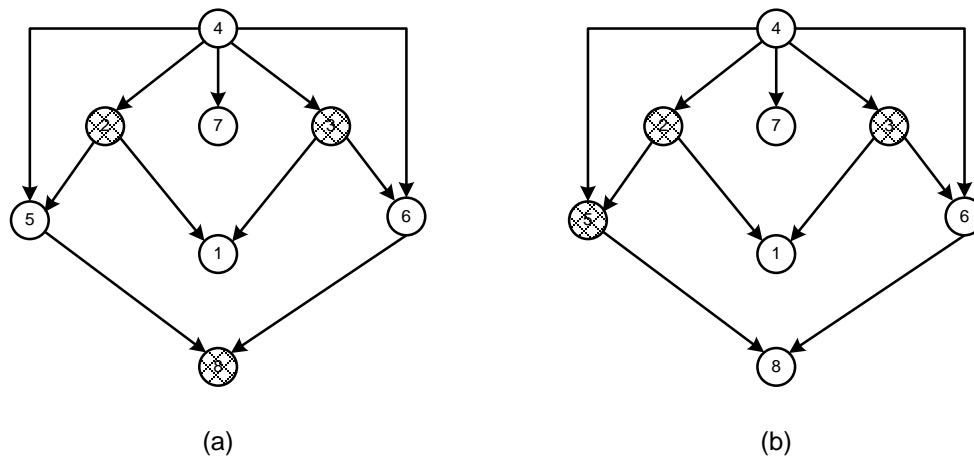


Figura 3-8 - Análise do Quinto Caminho de Transmissão

O sexto caminho de transmissão é determinado de modo semelhante. É importante verificar a importância dos apontadores em bloquear barras do caminho de transmissão já percorrido e retornar aquelas que são adjacentes à condição de barras não-visitadas para evitar que um caminho termine numa barra de geração, como ocorreria caso a barra 8 permanecesse finalizada. Assim, este caminho dado por 4 – 6 – 8 é mostrado na Figura 3-9(a). A barra 6 é indicada como finalizada pelo apontador, Figura 3-9(b).

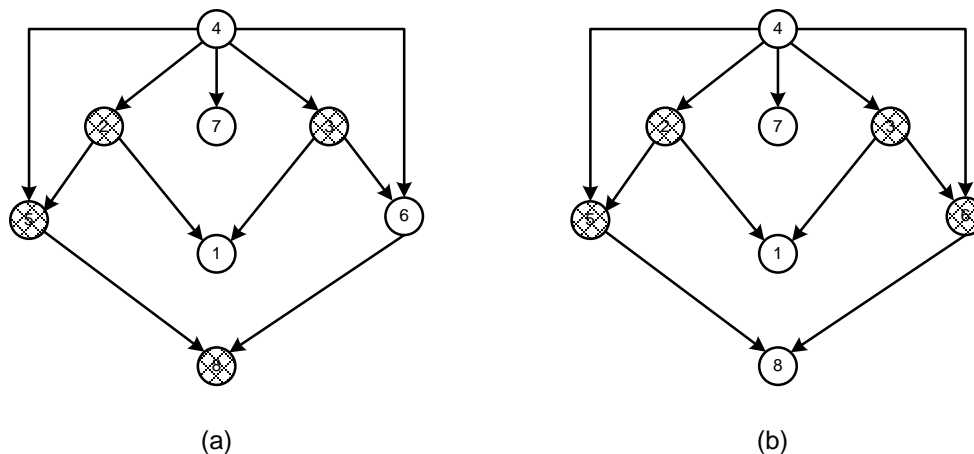


Figura 3-9 - Análise do Sexto Caminho

O sétimo e último caminho é determinado de forma bem direta, uma vez que a única barra adjacente a 4, indicada como não-visitada, é a barra de geração 7. Logo, este caminho, mostrado na Figura 3-10(a), é dado por 4 – 7.

Como todos os indicadores das barras adjacentes a 4 estão finalizados, a barra 4 é finalizada no fim da busca do sétimo caminho. A Figura 3-10(a) mostra como os apontadores ficam nesta etapa da busca.

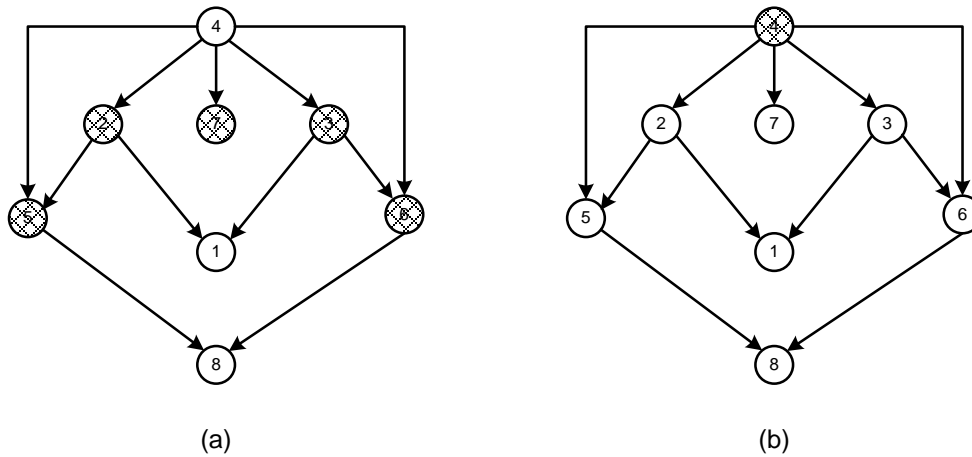


Figura 3-10 - Análise do Último Caminho e Encerramento do Processo de Busca

Quando a barra crítica torna-se finalizada, Figura 3-10(b), o algoritmo cessa a busca e determina todos os caminhos de transmissão existentes. O resultado para esta configuração é apresentado na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 - Caminhos de Transmissão

Nº do Caminho de Transmissão	1ª Barra	2ª Barra	3ª Barra	4ª Barra
1	4	2	1	-
2	4	2	5	8
3	4	3	1	-
4	4	3	6	8
5	4	5	8	-
6	4	6	8	-
7	4	7	-	-

3.3 Proposição para Reforço das Condições da Segurança de Tensão

3.3.1 Introdução [19]

Na análise de sistemas de potência, seja no planejamento ou na operação, um dos objetivos é verificar o comportamento do sistema frente à variações nos valores de determinadas grandezas. Por exemplo, pode ser necessário calcular o novo ponto de operação em função de alterações no perfil das cargas conectadas em uma ou mais barras. Pode-se também, no caso de ocorrência de violações nos limites operativos de uma determinada grandeza, definir as variáveis de controle mais indicadas para tentar eliminar tais violações através da re-especificação de seus valores.

Nos casos em que os distúrbios possam ser considerados pequenos em magnitude, o novo estado pode ser reavaliado prontamente através da análise de sensibilidade. Se, por exemplo, os resultados de um fluxo de potência retratando o estado da rede antes da ocorrência das variações são conhecidos, então o novo estado após a ocorrência é calculado simplesmente somando-se o estado anterior com as variações calculadas. A análise de sensibilidade vem sendo utilizada em diferentes situações na área de sistemas elétricos de potência [20-27].

Esta seção apresenta a abordagem matemática da análise de sensibilidade linear em SEP's. São analisadas variações de potência ativa na barra PV, módulos das tensões em barras de referência e PV e potência ativa e reativa nas barras de cargas.

3.3.2 Análise de Sensibilidade [28,29]

O modelo matemático para o sistema elétrico de potência em estado permanente pode ser descrito como segue:

$$\underline{g}(\underline{u}, \underline{x}, \underline{p}) = 0 \quad (3.1)$$

A forma diferencial da equação (3.1) é dada por:

$$\frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{u}} d\underline{u} + \frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{x}} d\underline{x} + \frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{p}} d\underline{p} = 0 \quad (3.2)$$

Considerando que a equação (3.2) estabelece uma relação exata entre os grupos das variáveis do sistema, é possível obter uma aproximação substituindo as variáveis diferenciais $d\underline{u}$, $d\underline{x}$ e $d\underline{p}$ pelas variáveis finitas $\Delta\underline{u}$, $\Delta\underline{x}$ e $\Delta\underline{p}$:

$$\frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{u}} \Delta\underline{u} + \frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{x}} \Delta\underline{x} + \frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{p}} \Delta\underline{p} = 0 \quad (3.3)$$

Portanto, o resultado da análise de sensibilidade será mais preciso quanto menor forem as perturbações. Entretanto, é difícil definir uma faixa de valores para as perturbações que produzem resultados próximos aos reais. Assim, somente o conhecimento do sistema pode ajudar na escolha de valores adequados de variações.

$\frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{u}}$, $\frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{x}}$ e $\frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{p}}$ são matrizes Jacobianas denotadas, respectivamente, por J_x , J_u

e J_p . Portanto, equação (3.3) pode ser reescrita como:

$$J_u \Delta\underline{u} + J_x \Delta\underline{x} + J_p \Delta\underline{p} = 0 \quad (3.4)$$

Isolando o vetor de estados $\overline{\Delta\underline{x}}$ obtém-se:

$$\Delta\underline{x} = -[J_x]^{-1} (J_u \Delta\underline{u} + J_p \Delta\underline{p}) \quad (3.5)$$

ou ainda:

$$\Delta\underline{x} = -S_{xu} \Delta\underline{u} - S_{xp} \Delta\underline{p} \quad (3.6)$$

onde:

$$S_{xu} = [J_x]^{-1} J_u \quad (3.7)$$

$$S_{xp} = [J_x]^{-1} J_p \quad (3.8)$$

As matrizes não esparsas S_{xu} e S_{xp} definem a sensibilidade das variáveis de estado \underline{x} em relação às variáveis de controle \underline{u} e às cargas \underline{p} . A equação (3.6) permite, através de simples multiplicações matriciais, avaliar as variações nas variáveis de estado devido a pequenas perturbações nas variáveis de controle e/ou carga.

3.3.3 Modelo Proposto para Reforço

3.3.3.1 Considerações Iniciais

O modelo de análise de sensibilidade para reforço das condições de segurança de tensão, considera três tipos básicos de variáveis de controle, notadamente

- i. módulo das tensões nas barras PV e V θ ,
- ii. potência ativa nas barras PV e
- iii. potência ativa e reativa nas barras de carga.

Deste modo, um modelo matemático, baseado em (3.4), é escrito da seguinte forma:

$$J_x \Delta \underline{x} + J_v \Delta \underline{v} + J_{P_G} \Delta \underline{P}_G + J_{P_L} \Delta \underline{P}_L = 0 \quad (3.9)$$

As matrizes Jacobianas J_v , J_{P_G} e J_{P_L} contêm as derivadas das equações do fluxo de potência em relação ao módulo das tensões nas barras de geração, à potência ativa geradas nas barras PV e à potencia ativa e reativa das barras de carga, respectivamente.

Isolando o vetor de estados:

$$\Delta \underline{x} = -[J_x]^{-1} (J_v \Delta \underline{v} + J_{P_G} \Delta \underline{P}_G + J_{P_L} \Delta \underline{P}_L) \quad (3.10)$$

ou ainda:

$$\Delta \mathbf{x} = -\mathbf{S}_{xv} \Delta \mathbf{v} - \mathbf{S}_{xP_G} \Delta \mathbf{P}_G - \mathbf{S}_{xP_L} \Delta \mathbf{P}_L \quad (3.11)$$

onde:

$$\mathbf{S}_{xv} = [\mathbf{J}_x]^{-1} \mathbf{J}_v \quad (3.12)$$

$$\mathbf{S}_{xP_G} = [\mathbf{J}_x]^{-1} \mathbf{J}_{P_G} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{S}_{xP_L} = [\mathbf{J}_x]^{-1} \mathbf{J}_{P_L} \quad (3.14)$$

A proposta deste trabalho é verificar a influência dos parâmetros de controle no fluxo de potência ativa do ramo crítico. A equação (3.15) define o fluxo de potência ativa para um ramo k - m genérico.

$$P_{km} = (a_{km} V_k)^2 g_{km} - (a_{km} V_k) V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.15)$$

Tomando-se a diferencial total para o fluxo de potência ativa para um ramo k - m , obtém-se:

$$dP_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} dV_k + \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} dV_m + \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} d\theta_k + \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} d\theta_m \quad (3.16)$$

A equação (3.16) estabelece a forma exata entre os grupos de variáveis e as variações infinitesimais. Por praticidade, uma relação aproximada é obtida substituindo as diferenciais por variações finitas.

$$\Delta P_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m \quad (3.17)$$

Para avaliar a influência das variáveis de controle, representadas por $\Delta \mathbf{v}$, $\Delta \mathbf{P}_G$ e $\Delta \mathbf{P}_L$, sobre o fluxo de potência do ramo crítico, os valores de ΔV_k , ΔV_m , $\Delta \theta_k$ e $\Delta \theta_m$

calculados em (3.11) são substituídos em (3.17). O resultado fornece a relação entre a variação no fluxo de potência e as variáveis de controle, através dos vetores de coeficientes associados a cada variável. Para ilustrar tal fato, a expansão da equação (3.17), considerando $x = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{nb}, V_1, V_2, \dots, V_{nb}]^t$, resulta:

$$\begin{aligned} \Delta P_{km} = & \begin{bmatrix} C_{1,1}^i, C_{1,2}^i, \dots, C_{1,ng}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_{ng} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{1,1}^j, C_{1,2}^j, \dots, C_{1,ng}^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{G2} \\ \vdots \\ \Delta P_{Gng} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} C_{1,1}^k, C_{1,2}^k, \dots, C_{1,nb}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{L1} \\ \Delta P_{L2} \\ \vdots \\ \Delta P_{Lnb} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.18)$$

onde, por exemplo:

$$\begin{aligned} C_{1,1}^i = & -\frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} \cdot S_{xv}(k+n, 1) - \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} \cdot S_{xv}(m+n, 1) - \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} \cdot S_{xv}(k, 1) \\ & - \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} \cdot S_{xv}(m, 1) \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} C_{1,1}^j = & -\frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} \cdot S_{xP_G}(k+n, 1) - \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} \cdot S_{xP_G}(m+n, 1) - \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} \cdot S_{xP_G}(k, 1) \\ & - \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} \cdot S_{xP_G}(m, 1) \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} C_{1,1}^k = & -\frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} \cdot S_{xP_L}(k+n, 1) - \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} \cdot S_{xP_L}(m+n, 1) - \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} \cdot S_{xP_L}(k, 1) \\ & - \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} \cdot S_{xP_L}(m, 1) \end{aligned} \quad (3.21)$$

De forma compacta, a equação (3.18) pode ser escrita do seguinte modo:

$$\Delta P_{km} = \underline{C}^i \cdot \Delta \underline{v} + \underline{C}^j \cdot \Delta \underline{P}_G + \underline{C}^k \cdot \Delta \underline{P}_L \quad (3.22)$$

Da equação (3.22), verifica-se a existência de um coeficiente associado a cada variável de controle que altera o fluxo de potência ativa do ramo. Assim, um único controle pode ser utilizado para obter uma determinada variação. Por outro lado, se mais de uma variável for alterada, o efeito produzido por cada uma se soma e promove uma variação final. A análise das possíveis combinações de variações para definir a de melhor desempenho é obtida através da avaliação dos coeficientes de cada variável. Logo, a atuação correta em variáveis específicas propicia um controle eficiente.

Para esta função, este trabalho utiliza um fator de participação onde todas as variáveis de controle são analisadas para a escolha daquela que tem maior relevância no fluxo de potência ativa no ramo crítico de transmissão. O objetivo é identificar e utilizar o controle mais eficiente para não sobrecarregar aqueles que possuem ação limitada.

Na subseção a seguir, é descrito o algoritmo do programa desenvolvido.

3.3.3.2 Algoritmo

O programa desenvolvido tem por objetivo fornecer dados rápidos e seguros sobre as condições de operação da rede. Além disso, propõe uma ferramenta para reforço das condições de segurança visando a melhorar a margem de carregamento, através da diminuição do fluxo de potência no ramo crítico.

O algoritmo alia os conhecimentos existentes sobre índices e margens de carregamento para a avaliação geral da rede. A análise de sensibilidade é utilizada para realizar o reforço das condições de segurança de tensão.

O algoritmo passo a passo é descrito a seguir:

- *Passo 1:* Cálculo do fluxo de potência convencional referente às condições de operação no caso base.
- *Passo 2:* Cálculo dos índices e margens de carregamento, através das equações apresentadas no Apêndice A, para a determinação da barra crítica.
- *Passo 3:* Definição dos caminhos de transmissão e identificação do caminho de transmissão crítico e do ramo crítico de transmissão. Esta etapa é realizada através da Teoria dos Grafos, apresentada no Apêndice

B. O modelo matemático desenvolvido na seção 2.2 para um sistema duas barras é utilizado.

- *Passo 4:* Processo iterativo sequencial para tentar reduzir o fluxo de potência ativa no ramo crítico. Este passo compreende as seguintes etapas:
 - *Etapa 1:* Cálculo das matrizes de sensibilidade para o ponto de operação, via equações (3.12) a (3.14).
 - *Etapa 2:* Cálculo dos fatores de participação das variáveis de controle utilizando os coeficientes de (3.22).

$$\begin{aligned}
 FP_{V_g}(\%) &= \frac{C_{1,g}^i}{\sum_{g=1}^{ng} C_{1,g}^i + \sum_{g=1}^{ng} C_{1,g}^j + \sum_{b=1}^{nb} C_{1,b}^k} \cdot 100\% \\
 FP_{PG_g}(\%) &= \frac{C_{1,g}^j}{\sum_{g=1}^{ng} C_{1,g}^i + \sum_{g=1}^{ng} C_{1,g}^j + \sum_{b=1}^{nb} C_{1,b}^k} \cdot 100\% \\
 FP_{PL_b}(\%) &= \frac{C_{1,b}^k}{\sum_{g=1}^{ng} C_{1,g}^i + \sum_{g=1}^{ng} C_{1,g}^j + \sum_{b=1}^{nb} C_{1,b}^k} \cdot 100\%
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

- *Etapa 3:* 1ª iteração: Determinação das variações dos parâmetros de controle utilizando os fatores de participação e o passo de tensão pré-definido. Neste caso, as variáveis de controle são as tensões nas barras de geração.

$$\Delta V_g = passo * FP_{V_g} \tag{3.24}$$

- *Etapa 4:* Cálculo do fluxo de potência para a determinação do novo ponto de operação.
- *Etapa 5:* Se a potência ativa de uma das barras de geração é negativa, ou a perda ativa total é maior que antes da operação de reforço, passe a etapa 8.

- *Etapa 6:* Demais iterações: Repete-se as etapas de 1 a 2 e determinam-se as variações dos parâmetros de controle utilizando os fatores de participação e o passo de potência ativa pré-definido. Neste caso, as variáveis de controle são as potências ativa das barras PV.

$$\Delta P_{Gg} = passo * FP_{pGg} \quad (3.25)$$

- *Etapa 7:* Retorne a etapa 4.
- *Etapa 8:* Fim do processo iterativo
- *Passo 5:* Impressão dos resultados

O método descrito no algoritmo não considera a variação da potência ativa e reativa nas barras de carga. Porém, o programa efetua os cálculos para estes casos através de variações realizadas manualmente pelo usuário. O processo iterativo considera a seguinte ordem de prioridade para realizar o reforço das condições do sistema: i) mudança do perfil de tensão na primeira iteração, ii) redespacho de potência ativa nas barras de geração nas demais iterações. Esta metodologia é a mesma efetuada em [2]. O objetivo é promover um reforço eficiente e, ao mesmo tempo, economicamente viável.

3.3.4 Exemplo

Considere um sistema simples e ilustrativo de 5 barras como mostrado na Figura 3-11. Os dados das barras e dos ramos são apresentados nas Tabelas 3.3 e 3.4.

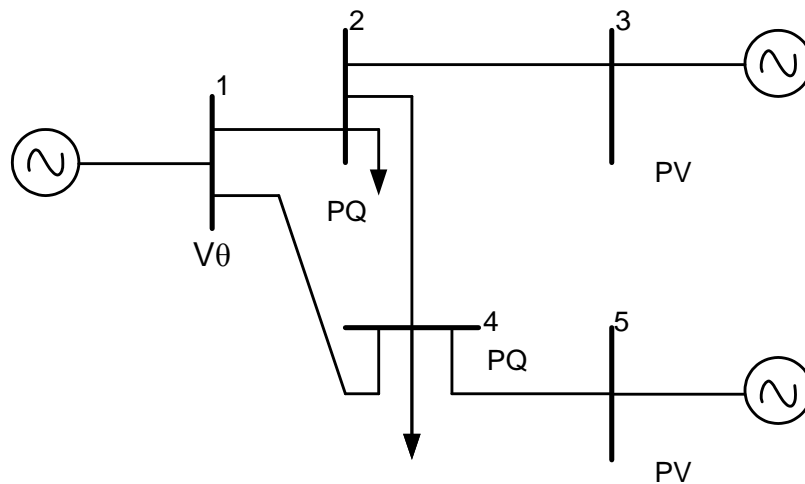


Figura 3-11 - Sistema de 5 Barras

Tabela 3-3 - Dados da Barra

Nº	Barra	Tipo	Tensão		Potência Ativa (MW)		Potência Reativa (MVar)	
			(p.u.)	(p.u.)	Geração	Carga	Geração	Carga
1	Vθ		1,06		0	0	0	0
2	PQ		1,00		0	50	0	25
3	PV		1,00		15	0	15	0
4	PQ		1,00		0	200	0	100
5	PV		1,00		5	0	10	0

Tabela 3-4 – Dados dos Ramos

De	Para	Barra		
		Resistência (p.u.)	Reatância (pu)	Susceptância shunt total (pu)
1	2	0,020	0,060	0,030
1	4	0,080	0,240	0,025
2	3	0,060	0,180	0,020
2	4	0,010	0,030	0,010
4	5	0,080	0,240	0,025

A Tabela 3-5 mostra o resultado do fluxo de potência. Os fluxos de potência e as perdas nos ramos são mostrados na Tabela 3-6.

Tabela 3-5 - Resultados do Fluxo de Potência para as Barras

Barra		Tensão		Potência Gerada		Potência Consumida		Margem
Nº	Tipo	Módulo (pu)	Ângulo(°)	MW	MVAr	MW	MVAr	(%)
1	Vθ	1,060	0,000	244,154	127,513	0,000	0	0
2	PQ	0,975	-4,954	0	0	50,000	25,000	97,43
3	PV	1,000	-3,688	15,000	8,124	0,000	0	95,92
4	PQ	0,943	-7,162	0	0	200,000	-100,000	85,43
5	PV	1,000	-7,513	5,000	20,970	0,000	0	93,10

Tabela 3-6 – Resultados do Fluxo de Potência para os Ramos

Barra		Fluxo de Potência		Perdas	
De	Para	MW	MVAr	MW	MVAr
1	2	180,916	94,936	7,488	19,353
1	4	63,238	32,577	3,670	8,493
2	3	-14,815	-9,520	0,185	-1,395
2	4	138,243	60,103	2,397	6,273
4	5	-4,585	-22,086	0,415	-1,116
Total de Perdas				14,155	31,608

A Tabela 3-5 também mostra a margem de carregamento para todas as barras. A análise deste resultado mostra que a barra crítica é a 4, uma vez que a sua margem é a menor dentre as barras de carga.

O conhecimento prévio dos valores das variáveis de estado no caso base, obtidos através do fluxo de potência, bem como as matrizes Jacobianas atualizadas, servem como partida para a análise de sensibilidade. Neste caso específico:

$$J_x = \left[\begin{array}{cccc|cc} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_4} & 0 & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_4} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} & 0 & 0 & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} & 0 \\ \frac{\partial P_4}{\partial \theta_2} & 0 & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_4}{\partial V_2} & \frac{\partial P_4}{\partial V_4} \\ 0 & 0 & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_5} & 0 & \frac{\partial P_5}{\partial V_4} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_4} & 0 & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_4} \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_2} & 0 & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_4} \end{array} \right]$$

$$J_v = \left[\begin{array}{cc|c} \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} & 0 \\ 0 & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} & 0 \\ \frac{\partial P_4}{\partial V_1} & 0 & \frac{\partial P_4}{\partial V_5} \\ 0 & 0 & \frac{\partial P_5}{\partial V_5} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_3} & 0 \\ \frac{\partial Q_4}{\partial V_1} & 0 & \frac{\partial Q_4}{\partial V_5} \end{array} \right]$$

$$J_{P_G} = \left[\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ \frac{\partial P_3}{\partial P_{G3}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial P_5}{\partial P_{G5}} \\ \hline 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right]$$

$$J_{P_L} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial P_{L_2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial P_4}{\partial P_{L_4}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & \frac{\partial Q_2}{\partial Q_{L_2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_4}{\partial Q_{L_4}} \end{bmatrix}$$

A substituição dos valores numéricos nas matrizes Jacobianas resulta:

$$J_x = \begin{bmatrix} 47,735 & -4,837 & -27,902 & 0 & | & 15,734 & -8,614 \\ -4,909 & 4,909 & 0 & 0 & | & -1,556 & 0 \\ -27,194 & 0 & 34,298 & -3,542 & | & -10,510 & 9,662 \\ 0 & 0 & -3,528 & 3,528 & | & 0 & -1,273 \\ \hline -16,338 & 1,732 & 8,120 & 0 & | & 48,455 & -29,598 \\ 10,245 & 0 & -13,108 & 1,157 & | & -27,896 & 34,262 \end{bmatrix}$$

$$(J_x)^{-1} = \begin{bmatrix} 0,052 & 0,054 & 0,047 & 0,049 & | & -0,008 & -0,005 \\ 0,057 & 0,258 & 0,052 & 0,051 & | & -0,004 & -0,005 \\ 0,047 & 0,048 & 0,073 & 0,076 & | & -0,003 & -0,008 \\ 0,052 & 0,048 & 0,082 & 0,362 & | & 0,009 & 0,011 \\ \hline 0,016 & 0,002 & 0,017 & 0,007 & | & 0,038 & 0,032 \\ 0,014 & 0,003 & 0,025 & 0,008 & | & 0,032 & 0,032 \end{bmatrix}$$

$$J_v = \begin{bmatrix} -6,119 & -1,732 & | & 0 \\ 0 & 1,817 & | & 0 \\ -1,610 & 0 & | & -1,157 \\ 0 & 0 & | & 1,300 \\ \hline -14,147 & -4,837 & | & 0 \\ -3,361 & 0 & | & -3,542 \end{bmatrix}$$

$$J_{P_G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{P_L} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

As matrizes de sensibilidade, de acordo com (3.12) a (3.14), são dadas por:

$$S_{xv} = \begin{bmatrix} -0,262 & 0,046 & 0,028 \\ -0,504 & 0,351 & -0,012 \\ -0,340 & 0,018 & 0,044 \\ -0,611 & -0,045 & 0,337 \\ -0,764 & -0,205 & -0,124 \\ -0,752 & -0,173 & -0,208 \end{bmatrix}$$

$$S_{xP_G} = \begin{bmatrix} -0,054 & -0,049 \\ -0,258 & -0,051 \\ -0,048 & -0,076 \\ -0,048 & -0,362 \\ -0,002 & -0,007 \\ -0,003 & -0,008 \end{bmatrix}$$

$$S_{xP_L} = \begin{bmatrix} 0,052 & 0,047 & -0,008 & -0,005 \\ 0,057 & 0,052 & 0,004 & 0,005 \\ 0,047 & 0,073 & -0,003 & -0,008 \\ 0,052 & 0,082 & 0,009 & 0,011 \\ 0,016 & 0,017 & 0,038 & 0,032 \\ 0,014 & 0,025 & 0,032 & 0,053 \end{bmatrix}$$

A solução para as variáveis de estado é dada pela equação (3.11):

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta\theta_4 \\ \Delta\theta_5 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_4 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -0,262 & 0,046 & 0,028 \\ -0,504 & 0,351 & -0,012 \\ -0,340 & 0,018 & 0,044 \\ -0,611 & -0,045 & 0,337 \\ -0,764 & -0,205 & -0,124 \\ -0,752 & -0,173 & -0,208 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_5 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,054 & -0,049 \\ -0,258 & -0,051 \\ -0,048 & -0,076 \\ -0,048 & -0,362 \\ -0,002 & -0,007 \\ -0,003 & -0,008 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta P_{G3} \\ \Delta P_{G5} \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} 0,052 & 0,047 & -0,008 & -0,005 \\ 0,057 & 0,052 & 0,004 & 0,005 \\ 0,047 & 0,073 & -0,003 & -0,008 \\ 0,052 & 0,082 & 0,009 & 0,011 \\ 0,016 & 0,017 & 0,038 & 0,032 \\ 0,014 & 0,025 & 0,032 & 0,053 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta P_{L2} \\ \Delta P_{L4} \\ \Delta Q_{L2} \\ \Delta Q_{L4} \end{bmatrix}$$

O objetivo é analisar o fluxo de potência ativa no ramo crítico. Considerando o ramo 1 – 2 crítico, então de (3.17):

$$\Delta P_{1-2} = 7,007\Delta V_1 - 3,9072\Delta V_2 + 15,89\Delta\theta_1 - 15,89\Delta\theta_2$$

Substituindo-se os valores solução de ΔV_1 , ΔV_2 , $\Delta\theta_1$ e $\Delta\theta_2$, obtêm-se a variação do fluxo de potência ativa no ramo crítico:

$$\Delta P_{1-2} = -0,137 \Delta V_1 - 0,068 \Delta V_3 - 0,045\Delta V_5 - 0,861 \Delta P_{G3} - 0,800 \Delta P_{G5} + 0,881 \Delta P_{L2} + 0,810 \Delta P_{L4} + 0,022 \Delta Q_{L2} + 0,042 \Delta Q_{L4}$$

Esta última equação possibilita que o algoritmo desenvolvido, analise os efeitos das ações de controle no fluxo de potência do ramo crítico. Na primeira iteração, considera-se apenas a sensibilidade do fluxo de potência ativa no ramo crítico com relação às variações de tensão nas barras de geração. Portanto.

$$\Delta P_{1-2} = -0,137 \Delta V_1 - 0,068 \Delta V_3 - 0,045\Delta V_5$$

Os módulos dos coeficientes fornecem os valores do fator de participação para as barras. Assim:

$$\begin{aligned}
 FP_{V_1}(\%) &= \frac{0,137}{0,137 + 0,068 + 0,045} = 54,86\% \\
 FP_{V_3}(\%) &= \frac{0,068}{0,137 + 0,068 + 0,045} = 27,17\% \\
 FP_{V_5}(\%) &= \frac{0,045}{0,137 + 0,068 + 0,045} = 17,97\%
 \end{aligned}
 \tag{3.26}$$

Com os valores dos fatores de participação, o algoritmo determina a variação de tensão nas barras de geração considerando a sensibilidade de cada uma no fluxo de potência ativa do ramo crítico. O passo máximo adotado para a variação de tensão é 0,05 pu. Logo, as variações de tensão são proporcionais ao fator de participação das barras.

$$\begin{aligned}
 \Delta V_1 &= 0,027 \text{ pu} \\
 \Delta V_3 &= 0,014 \text{ pu} \\
 \Delta V_5 &= 0,009 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

Assim, os novos valores de tensão nas barras de geração são dadas por:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_3 \\ V_5 \end{bmatrix}^{(1)} = \begin{bmatrix} 1,060 \\ 1,000 \\ 1,000 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,087 \\ 1,014 \\ 1,009 \end{bmatrix}$$

As Tabelas 3.7 e 3.8 apresentam os resultados do fluxo de potência para a 1ª iteração da análise de sensibilidade, considerando o novo perfil de tensão das barras de geração.

Tabela 3-7 - Resultados do Fluxo de Potência para as Barras na 1ª Iteração da Análise de Sensibilidade

Nº	Barra Tipo	Tensão		Potência Gerada		Potência Consumida		Margem (%)
		Módulo (pu)	Ângulo(°)	MW	MVAr	MW	MVAr	
1	Vθ	1,087	0,000	243,619	137,940	0,000	0	0,00
2	PQ	1,000	-4,608	0,000	0,000	50,000	25,000	97,56
3	PV	1,014	-3,184	15,000	2,019	0,000	0	96,48
4	PQ	0,967	-6,685	0,000	0,000	200,000	-100,000	86,21
5	PV	1,009	-6,723	5,000	14,541	0,000	0	95,17

Tabela 3-8 – Resultados do Fluxo de Potência para os Ramos na 1ª Iteração da Análise de Sensibilidade

Barra		Fluxo de Potência		Perdas	
De	Para	MW	MVAr	MW	MVAr
1	2	180,487	103,100	7,370	18,837
1	4	63,132	34,841	3,589	8,118
2	3	-14,863	-3,635	0,137	-1,616
2	4	137,981	62,898	2,308	5,955
4	5	-4,784	-16,335	0,216	-1,794
Total				13,620	29,500

Tabela 3-7 mostra a melhora da margem de carregamento da barra crítica 4. A Tabela 3-8 apresenta a redução do fluxo de potência ativa no ramo crítico 1 – 2 de 180,92 MW para 180,49 MW. De modo análogo, observa-se a redução da perda total ativa de 14,15 MW para 13,62 MW. Como as potências ativas geradas são positivas e ocorre uma redução na perda ativa total, o algoritmo procede a segunda iteração.

Na segunda iteração, considera-se apenas a sensibilidade do fluxo de potência ativa no ramo crítico com relação as variações de potência gerada nas barras de geração. Para este novo ponto de operação:

$$J_x = \begin{bmatrix} 50,180 & -5,022 & -29,342 & 0 & 16,160 & -8,902 \\ -5,106 & 5,106 & 0 & 0 & -1,563 & 0 \\ -28,641 & 0 & 36,067 & -3,661 & -10,720 & 10,025 \\ 0 & 0 & -3,686 & 3,660 & 0 & -1,264 \\ \hline -17,153 & 1,814 & 8,701 & 0 & 49,700 & -30,331 \\ 10,716 & 0 & -13,814 & 1,218 & -28,653 & 35,215 \end{bmatrix}$$

$$(J_x)^{-1} = \begin{bmatrix} 0,049 & 0,051 & 0,044 & 0,046 & -0,008 & -0,005 \\ 0,053 & 0,247 & 0,049 & 0,048 & 0,003 & 0,004 \\ 0,045 & 0,045 & 0,069 & 0,072 & -0,003 & -0,009 \\ 0,049 & 0,046 & 0,077 & 0,347 & 0,008 & 0,009 \\ \hline 0,015 & 0,002 & 0,016 & 0,006 & 0,037 & 0,031 \\ 0,013 & 0,002 & 0,024 & 0,006 & 0,031 & 0,052 \end{bmatrix}$$

$$J_v = \left[\begin{array}{cc|c} -6,186 & -1,790 & 0 \\ 0 & 1,837 & 0 \\ -1,623 & 0 & -1,201 \\ 0 & 0 & 1,311 \\ \hline -14,544 & -4,955 & 0 \\ -3,462 & 0 & -3,629 \end{array} \right]$$

As matrizes de sensibilidade, de acordo com (3.12) a (3.14), são dadas por:

$$S_{xv} = \left[\begin{array}{ccc} -0,242 & 0,045 & 0,026 \\ -0,474 & 0,342 & -0,012 \\ -0,314 & 0,018 & 0,041 \\ -0,571 & -0,041 & 0,328 \\ -0,759 & -0,205 & -0,124 \\ -0,744 & -0,172 & -0,207 \end{array} \right]$$

$$S_{xP_G} = \left[\begin{array}{cc} -0,051 & -0,046 \\ -0,247 & -0,048 \\ -0,045 & -0,072 \\ -0,046 & -0,347 \\ -0,002 & -0,006 \\ -0,002 & -0,007 \end{array} \right]$$

$$S_{xP_L} = \left[\begin{array}{cccc} 0,052 & 0,047 & -0,008 & -0,005 \\ 0,057 & 0,052 & 0,004 & 0,005 \\ 0,047 & 0,073 & -0,003 & -0,008 \\ 0,052 & 0,082 & 0,009 & 0,011 \\ 0,016 & 0,017 & 0,038 & 0,032 \\ 0,014 & 0,025 & 0,032 & 0,053 \end{array} \right]$$

A solução para as variáveis de estado é dada pela equação (3.11):

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta\theta_4 \\ \Delta\theta_5 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_4 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -0,242 & 0,045 & 0,026 \\ -0,474 & 0,342 & -0,012 \\ -0,314 & 0,018 & 0,041 \\ -0,571 & -0,041 & 0,328 \\ -0,759 & -0,205 & -0,124 \\ -0,744 & -0,172 & -0,207 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_5 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,051 & -0,046 \\ -0,247 & -0,048 \\ -0,045 & -0,072 \\ -0,046 & -0,347 \\ -0,002 & -0,006 \\ -0,002 & -0,007 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta P_{G3} \\ \Delta P_{G5} \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} 0,052 & 0,047 & -0,008 & -0,005 \\ 0,057 & 0,052 & 0,004 & 0,005 \\ 0,047 & 0,073 & -0,003 & -0,008 \\ 0,052 & 0,082 & 0,009 & 0,011 \\ 0,016 & 0,017 & 0,038 & 0,032 \\ 0,014 & 0,025 & 0,032 & 0,053 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta P_{L2} \\ \Delta P_{L4} \\ \Delta Q_{L2} \\ \Delta Q_{L4} \end{bmatrix}$$

Considerando o ramo 1 – 2 crítico, então de (3.17):

$$\Delta P_{1-2} = 7,10\Delta V_1 - 4,11\Delta V_2 + 16,69\Delta\theta_1 - 16,69\Delta\theta_2$$

Substituindo-se os valores solução de ΔV_1 , ΔV_2 , $\Delta\theta_1$ e $\Delta\theta_2$, obtêm-se a variação do fluxo de potência ativa no ramo crítico através das variações de potência ativa gerada:

$$\Delta P_{1-2} = -0,855 \Delta P_{G3} - 0,791\Delta P_{G5}$$

Os módulos dos coeficientes fornecem os valores do fator de participação para as barras. Assim:

$$FP_{PG3}(\%) = \frac{0,855}{0,855 + 0,791} = 51,95\%$$

$$FP_{PG5}(\%) = \frac{0,791}{0,855 + 0,791} = 48,05\%$$

Com os valores do fator de participação, o algoritmo determina a variação de potência ativa nas barras PV considerando a sensibilidade de cada uma no fluxo de potência ativa do ramo crítico. O passo máximo adotado para a variação de potência ativa é de 0,5 pu. Logo:

$$\Delta P_{G3} = 0,260 \text{ pu}$$

$$\Delta P_{G5} = 0,240 \text{ pu}$$

Assim, os novos valores de potência ativa gerada são dados por:

$$\begin{bmatrix} P_{G3} \\ P_{G5} \end{bmatrix}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0,15 \\ 0,05 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta P_{G3} \\ \Delta P_{G5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,410 \\ 0,290 \end{bmatrix}$$

As Tabelas 3.9 e 3.10 apresentam os resultados do fluxo de potência, para a 2ª iteração da análise de sensibilidade, considerando o redespacho de potência ativa.

Tabela 3-9 - Resultados do Fluxo de Potência para as Barras na 2ª Iteração da Análise de Sensibilidade

Nº	Barra Tipo	Tensão		Potência Gerada		Potência Consumida		Margem (%)
		Módulo (pu)	Ângulo(°)	MW	MVAr	MW	MVAr	
1	Vθ	1,087	0,000	192,027	148,570	0,000	0	0
2	PQ	1,001	-3,246	0,000	0,000	50,000	25,000	97,582
3	PV	1,014	1,086	40,977	-5,782	0,000	0	90,388
4	PQ	0,969	-5,065	0,000	0,000	200,000	100,000	86,332
5	PV	1,009	-1,363	29,023	6,923	0,000	0	90,657

Tabela 3-10 – Resultados do Fluxo de Potência para os Ramos na 2ª Iteração da Análise de Sensibilidade

Barra De	Barra Para	Fluxo de Potência		Perdas	
		MW	MVAr	MW	MVAr
1	2	140,478	111,631	5,512	13,263
1	4	51,549	36,939	2,796	5,738
2	3	-39,983	6,735	0,993	0,953
2	4	124,948	66,634	2,009	5,059
4	5	-28,308	-7,224	0,715	-0,301
Total				12,025	24,712

Tabela 3-9 mostra a melhora da margem de carregamento da barra crítica 4. A Tabela 3-10 apresenta a redução do fluxo de potência ativa no ramo crítico 1 – 2 de 180,49 MW para 140,48 MW. De modo análogo, observa-se a redução da perda total ativa de 13,62 MW para 12,02 MW.

Com este resultado, o algoritmo executa mais uma iteração e verifica que a potência ativa da barra passa a ser negativa, ou seja, o algoritmo converge. Por conveniência, este resultado é omitido neste trabalho.

Capítulo IV

Resultados

4.1 Introdução

Nos capítulos anteriores são descritos todos os fundamentos teóricos e procedimentos utilizados para elaboração de um programa eficiente e capaz de identificar a barra crítica, analisar a rede de transmissão, identificar o caminho de transmissão de potência mais carregado, avaliar o fluxo de potência no ramo crítico e, através da análise de sensibilidade, propor medidas de reforço com vistas à segurança de tensão.

Neste capítulo, são analisados dois sistemas para verificação das metodologias apresentadas. Sistemas IEEE 14 barras e o equivalente Sul brasileiro com 34 barras.

4.2 Sistema IEEE 14 barras

Este sistema possui 14 barras sendo 1 V θ , 4 PV e as demais PQ; 20 ramos, dois transformadores de 2 enrolamentos, um transformador de 3 enrolamentos e um banco de capacitores na barra 9. Todas as barras tiveram seu carregamento aumentado para uma análise sob condições extremas de funcionamento. A Figura 4-1 mostra o diagrama unifilar do sistema utilizado com todos os seus equipamentos e componentes para melhor análise e entendimento.

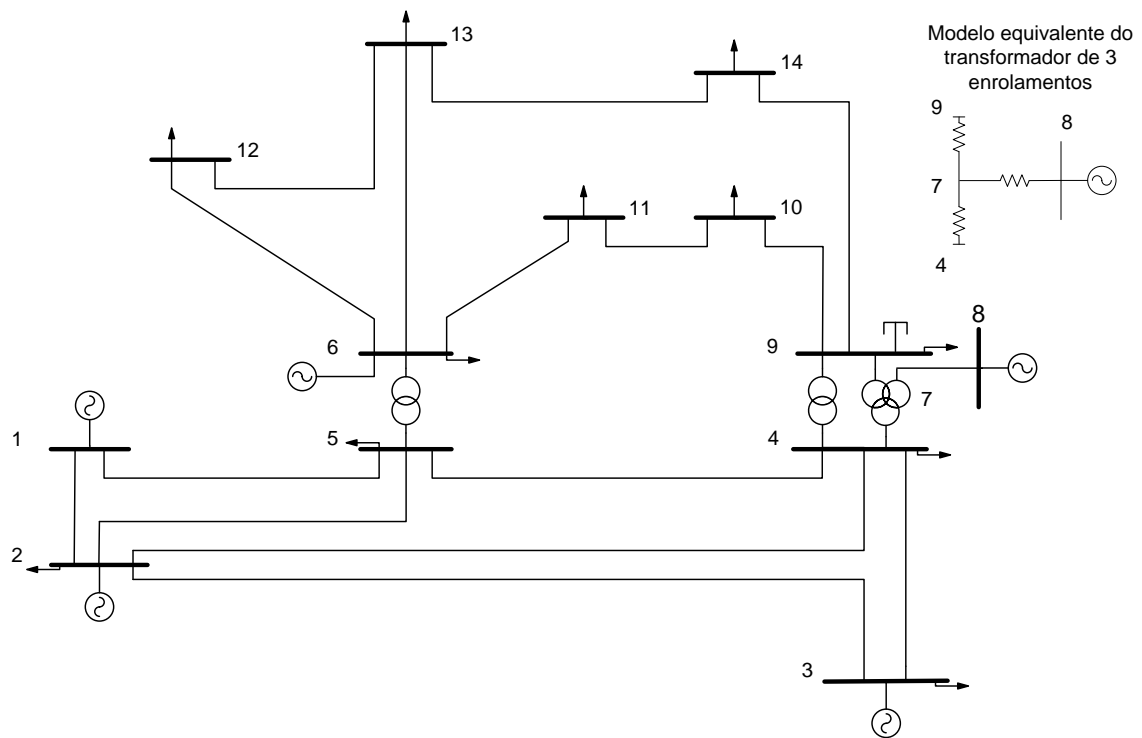


Figura 4-1 - Diagrama unifilar do sistema IEEE 14 barras

4.2.1 Identificação da Barra Crítica

Inicialmente, o objetivo é identificar as condições de carregamento de cada barra através dos índices baseados na matriz \mathbf{D}' reduzida da matriz Jacobiana. Cabe salientar que as equações matemáticas que modelam esta parte do programa estão descritas no Apêndice A.

Os resultados para a margem de carregamento e o ângulo β são mostrados na Tabela 4-1. A barra 9 é a crítica uma vez que apresenta a menor margem.

Tabela 4-1 – Resultado do Fluxo de Potência e Índices de Estabilidade de Tensão para o Sistema IEEE 14 Barras

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA								
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA								
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTENCIA								
ÍNDICES E MARGENS PARA AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE TENSÃO								
NA OPERAÇÃO EM TEMPO REAL								
Carregamento (em %): 100								
Controle de tap: NÃO								
Controle de reativos: NÃO								
Número de iterações do Fluxo de Potencia: 7								
DADOS DAS BARRAS								
Barra	Tipo	Tensão	Teta(°)	Si (pu)	Sm (pu)	Beta(°)	det[D']*Vi	M(%)
1	VO	1,0600	-0,0000	16,4669	-	-	-	-0,00
2	PV	1,0450	-40,8675	11,7584	-27,6669	-74,1042	-903,7181	-335,30
3	PV	1,0100	-89,4685	5,7810	5,6041	183,5014	-2,0138	-3,06
4	PQ	0,7241	-74,2677	1,9183	3,0929	174,9100	5,8860	37,98
5	PQ	0,6985	-63,6743	0,3107	2,4849	173,9254	6,0782	87,50
6	PV	1,0700	-107,0074	3,8894	3,1263	196,1660	-5,3537	-19,62
7	PQ	0,8207	-95,9166	0,0000	1,4211	172,9149	2,0194	100,00
8	PV	1,0900	-95,9166	1,6666	1,5637	183,3320	-0,3324	-6,17
9	PQ	0,7363	-107,1700	1,3540	1,6573	174,1310	0,9133	18,30
10	PQ	0,7543	-109,0202	0,4283	0,9574	172,3572	0,7331	55,27
11	PQ	0,8925	-108,4013	0,1574	1,1519	167,9001	1,3020	86,33
12	PQ	0,9793	-110,9454	0,2523	1,2592	138,4166	1,5219	79,97
13	PQ	0,9326	-111,0128	0,5877	1,5533	167,9269	2,0673	62,16
14	PQ	0,7105	-116,5031	0,6287	0,8606	170,5027	0,3455	26,95

4.2.2 Identificação dos Caminhos de Transmissão e do Caminho de Transmissão Mais Carregado

Os resultados anteriores indicam que a barra crítica é a 9. Somando a este fato o cálculo dos fluxos de potência nos ramos de transmissão e conhecendo-se as cinco barras geradoras, a saber, 1, 2, 3, 6 e 8; faz-se a análise e identificação dos caminhos de transmissão existentes.

As equações utilizadas nesta etapa são desenvolvidas em [28] para o cálculo do fluxo de potência; e em [2] para o cálculo da impedância do ramo série, impedância shunt do gerador, impedância shunt da carga, tensão do gerador, tensão na carga, tensão crítica na carga e a margem de carregamento da respectiva barra de carga. De modo a agregar maior informação sobre o estado da rede, os valores de perda ativa e reativa nas linhas são adicionados.

Para a obtenção dos diversos caminhos de carregamento é utilizada a metodologia baseada no estudo de algoritmo de dados, mais especificamente na estrutura de grafos orientados por pesquisa em profundidade [30], apresentada em detalhes no Capítulo III. O próprio fluxo de potência ativa determina o número de caminhos possíveis que sai de cada barra de geração e chega até a barra crítica.

A Tabela 4-2 apresenta os fluxos de potência ativa e reativa para cada ramo, o somatório das perdas ativa e reativa, bem como os cinco caminhos de transmissão críticos de potência ativa da geração para a barra crítica 9, em ordem decrescente da margem calculada.

Tabela 4-2 - Resultado do Fluxo de Potência e Determinação dos Caminhos de Transmissão mais Carregados para o Sistema IEEE 14 Barras

DADOS DAS LINHAS						
Nº Linha	DE	PARA	FLUXO DE POTENCIA		PERDAS	
			ATIVO(MW)	REATIVO(MVar)	ATIVA(MW)	REATIVA(MVar)
1	1	2	1249,1814	71,1237	270,0960	818,7937
	2	1	-979,0854	747,6700		
2	1	5	362,6429	265,9275	97,9546	400,3998
	5	1	-264,6883	134,4723		
3	2	3	423,3139	96,1795	81,2887	337,8455
	3	2	-342,0253	241,6660		
4	2	4	290,7075	163,3940	59,5021	177,7961
	4	2	-231,2054	14,4021		
5	2	5	218,2638	167,6610	39,8361	118,8944
	5	2	-178,4277	-48,7666		
6	3	4	-34,7746	196,7615	26,3952	66,3802
	4	3	61,1698	-130,3813		
7	4	5	-182,0982	122,1626	12,2424	38,6162
	5	4	194,3406	-83,5464		
8	4	7	107,1937	-7,9240	0,0000	44,0725
	7	4	-107,1937	51,9965		
9	4	9	53,7405	17,3405	0,0000	31,7592
	9	4	-53,7405	14,4187		
10	5	6	218,3753	-8,5590	0,0000	214,2641
	6	5	-218,3753	222,8231		
11	6	11	46,6881	73,3102	6,2669	13,1236
	11	6	-40,4212	-60,1866		
12	6	12	38,0385	20,6177	2,0097	4,1827
	12	6	-36,0288	-16,4350		
13	6	13	88,8493	69,6002	7,3600	14,4941
	13	6	-81,4893	-55,1061		
14	7	8	0,0000	-125,4791	0,0000	41,1802

Capítulo IV - Resultados

	8	7	0,0000	166,6593		
15	7	9	107,1938	73,4825	0,0000	27,5886
	9	7	-107,1938	-45,8939		
16	9	10	13,5411	-20,4000	0,3517	0,9344
	10	9	-13,1894	21,3344		
17	9	14	29,3933	-4,2235	2,0674	4,3975
	14	9	-27,3260	8,6210		
18	10	11	-22,8106	-44,5344	3,6107	8,4522
	11	10	26,4212	52,9866		
19	12	13	11,6288	10,0350	0,5435	0,4917
	13	12	-11,0854	-9,5433		
20	13	14	38,5747	41,4494	6,3007	12,8284
	14	13	-32,2740	-28,6210		

TOTAL DE PERDAS | 615,8256 | 2376,4955

CAMINHOS DE TRANSMISSAO MAIS CARREGADOS*

Barra Critica do Sistema: 9

Caminho de transmissão: 9 7 4 5 2

	Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:	0,4769	91,6492
Impedancia shunt no gerador:	1,4502	-0,5100
Impedancia shunt no carga:	0,5438	-65,1477
Tensão no gerador:	1,0450	-40,8675
Tensão na carga:	0,7363	-107,1700
Tensão critica na carga:	1,3217	-105,4436

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	2,1826	1,6766	2,7523
Carga:	1,0719	0,4589	1,1661
Carga Critica:	1,3343	0,5713	1,4515

	Si	Sm	M(%)
Indices:	1,1661	1,4515	-19,6652

Capítulo IV - Resultados

Caminho de transmissão: 9 7 4 2			
		Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:		0,4491	98,6629
Impedancia shunt no gerador:		0,6614	-11,3709
Impedancia shunt no carga:		0,5876	-52,8484
Tensão no gerador:		1,0450	-40,8675
Tensão na carga:		0,7363	-107,1700
Tensão critica na carga:		1,0965	-102,6055
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	2,9071	1,6339	3,3348
Carga:	1,0719	0,4589	1,1661
Carga Critica:	1,2073	0,5169	1,3133
	Si	Sm	M(%)
Indices:	1,1661	1,3133	-11,2147
Caminho de transmissão: 9 7 4 5 1			
		Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:		0,3610	122,3440
Impedancia shunt no gerador:		0,2669	-22,5591
Impedancia shunt no carga:		0,2512	-32,5762
Tensão no gerador:		1,0600	-0,0000
Tensão na carga:		0,7363	-107,1700
Tensão critica na carga:		0,7888	-107,7449
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	3,6264	2,6593	4,4970
Carga:	1,0719	0,4589	1,1661
Carga Critica:	1,0768	0,4610	1,1713
	Si	Sm	M(%)
Indices:	1,1661	1,1713	-0,4523

Capítulo IV - Resultados

Caminho de transmissão: 9 4 5 2

	Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:	0,8321	105,8475
Impedancia shunt no gerador:	0,6377	18,3955
Impedancia shunt no carga:	1,4685	16,7070
Tensão no gerador:	1,0450	-40,8675
Tensão na carga:	0,7363	-107,1700
Tensão critica na carga:	0,6476	-115,9639

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	2,1826	1,6766	2,7523
Carga:	0,5374	-0,1442	0,5564
Carga Critica:	0,5630	-0,1511	0,5829

	Si	Sm	M(%)
Indices:	0,5564	0,5829	4,5518

Caminho de transmissão: 9 4 2

	Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:	0,8176	110,1122
Impedancia shunt no gerador:	0,4428	10,2436
Impedancia shunt no carga:	1,3281	25,0737
Tensão no gerador:	1,0450	-40,8675
Tensão na carga:	0,7363	-107,1700
Tensão critica na carga:	0,6341	-118,5394

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	2,9071	1,6339	3,3348
Carga:	0,5374	-0,1442	0,5564
Carga Critica:	0,5788	-0,1553	0,5993

	Si	Sm	M(%)
Indices:	0,5564	0,5993	7,1584

4.2.3 Determinação do Ramo Crítico

A idéia é analisar os ramos existentes no caminho mais carregado, começando no gerador e incluindo um novo ramo a cada iteração até completar todo o caminho. O caminho 2 – 5 – 4 – 7 – 9 é o mais carregado para o sistema em análise. A perda de potência ativa nos ramos pode ser usada para comparar a eficiência dos controles empregados, certificando que as decisões tomadas para o reforço das condições de controle são eficazes e reduzem as perdas existentes nas redes.

O ramo crítico é aquele que apresenta o menor valor ou o mais negativo dentre todas as margens calculadas nesta etapa. São calculadas a impedância do ramo série, impedância shunt do gerador, impedância shunt da carga, tensão do gerador, tensão na carga, tensão crítica na carga e a margem de carregamento da respectiva barra de carga para cada ramo inserido. A Tabela 4-3 ilustra os resultados desta etapa, indicando que o ramo crítico é 7 – 9, por apresentar a menor margem de carregamento dentre todos os ramos analisados.

Tabela 4-3 – Determinação do Ramo de Transmissão Mais Carregado para o Sistema IEEE 14 Barras

RAMO DE TRANSMISSAO MAIS CARREGADO			
Sub - Caminho de transmissão: 5 4			
		Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:		0,0442	72,4100
Impedancia shunt no gerador:		Inf	0,0000
Impedancia shunt no carga:		Inf	0,0000
Tensão no gerador:		0,6985	-63,6743
Tensão na carga:		0,7241	-74,2677
Tensão critica na carga:		0,5822	-116,8073
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	1,9434	-0,8355	2,1154
Carga:	1,8210	-1,2216	2,1928
Carga Critica:	6,3711	-4,2741	7,6720
	Si	Sm	M(%)
Indices:	2,1154	7,6720	71,4181
Sub - Caminho de transmissão: 5 4 7			
		Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:		0,2328	91,1328
Impedancia shunt no gerador:		0,4527	-54,2403
Impedancia shunt no carga:		1,8242	-45,7081
Tensão no gerador:		0,6985	-63,6743
Tensão na carga:		0,8207	-95,9166
Tensão critica na carga:		0,6812	-124,9275
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	1,9434	-0,8355	2,1154

Capítulo IV - Resultados

Carga:	1,0719	-0,5200	1,1914
Carga Critica:	1,6345	-0,7929	1,8167

	Si	Sm	M(%)
Indices:	2,1154	1,8167	34,4188

-----|
 Sub - Caminho de transmissão: 5 4 7 9
 -----|

	Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:	0,2851	92,6658
Impedancia shunt no gerador:	0,3290	-60,8808
Impedancia shunt no carga:	0,5354	-78,8343
Tensão no gerador:	0,6985	-63,6743
Tensão na carga:	0,7363	-107,1700
Tensão critica na carga:	0,8407	-103,1385

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	1,9434	-0,8355	2,1154
Carga:	1,0719	0,4589	1,1661
Carga Critica:	1,0935	0,4682	1,1895

	Si	Sm	M(%)
Indices:	2,1154	1,1895	-1,9742

-----|
 RAMO CRÍTICO DE TRANSMISSÃO: 7 9
 -----|

4.2.4 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade indica ações que tendem a diminuir o carregamento no ramo crítico e, conseqüentemente, aumentar a margem de carregamento na barra crítica. O programa oferece ao usuário algumas opções de variação de parâmetros para melhor atender as suas necessidades. O usuário pode escolher analisar manualmente os parâmetros de controle alterando os valores da potência ativa das barras PV, do módulo das tensões nas barras PV, da potência ativa e reativa das barras de carga e todas as variações anteriores ao mesmo tempo. Por outro lado, pode escolher o método iterativo, onde ocorre a alteração do perfil de tensão logo na primeira iteração, segundo um passo pré-definido pelo usuário e a sensibilidade de cada barra geradora. Nas iterações posteriores, a geração de potência ativa é aumentada de acordo com o passo definido.

No método iterativo, a definição dos passos de tensão e de potência ativa das barras geradoras influencia o seu desempenho computacional. Logo, é necessário o conhecimento prévio do sistema para definir valores coerentes que levem a rápida convergência do método. Outro ponto importante é a influência direta dos valores de sensibilidade de cada barra no valor final da sua geração. Assim, este programa promove a alteração da geração proporcional ao passo escolhido, fato que também reduz o número de iterações do método, tornando-o bastante eficiente.

A Tabela 4-4 apresenta os resultados do processo iterativo, via análise de sensibilidade. O passo de tensão para a primeira iteração é 0,1 pu, enquanto que o passo de potência ativa é 1,5 pu para as demais iterações. O processo iterativo demanda 4 iterações, sendo a última descartada em função da etapa 5 do algoritmo. Ao final da terceira iteração, a perda ativa total é reduzida de 615,82 MW para 135,07 MW. Além disto, a margem da barra crítica 9 é aumentada de 18,30 % para 66,63 %. O ângulo β também assume um valor mais favorável, variando de 174,13° para 107,01°.

Tabela 4-4 – Resultados para a Análise de Sensibilidade Iterativa Considerando Todas as Barras de Geração para o Sistema IEEE 14 Barras

ANALISE DE SENSIBILIDADE ITERATIVA								
Número de iterações do Fluxo de Potencia: 7								
Número da iteração da Analise de Sensibilidade: 1								
DADOS DAS BARRAS DE GERAÇÃO								
Numero	Barra	Tensão	Teta(°)	Pg (pu)	Qg (pu)	Sensibilidade	Fator de participação (%)	
1	1	1,0600	-0,0000	16,1182	3,3705	0,0218	21,79	
2	2	1,0450	-40,8675	0,4000	12,2570	0,0328	32,80	
3	3	1,0100	-89,4685	0,0000	5,1443	0,0064	6,37	
4	6	1,0700	-107,0074	0,0000	4,1635	0,0346	34,55	
5	8	1,0900	-95,9166	0,0000	1,6666	0,0045	4,49	
DADOS DA BARRA CRÍTICA								
Barra	Tipo	Tensão	Teta(°)	Si (pu)	Sm (pu)	Beta(°)	det[D']*Vi	M(%)
9	PQ	0,8261	-107,1700	1,3540	3,0710	144,1706	7,5979	55,91
DADOS DO RAMO CRÍTICO								
RAMO CRÍTICO DE TRANSMISSÃO: 7 9								
N° Linha	DE	PARA	FLUXO DE POTENCIA		PERDAS			
			ATIVO(MW)	REATIVO(MVar)	ATIVA(MW)	REATIVA(MVar)		
15	7	9	105,5283	64,0596	0,0000	20,9457		
	9	7	-105,5283	-43,1139				

Capítulo IV - Resultados

TOTAL DE PERDAS DO SISTEMA				453,4338	1735,3642			
=====								
Número de iterações do Fluxo de Potencia: 4								

Número da iteração da Analise de Sensibilidade: 2								

DADOS DAS BARRAS DE GERAÇÃO								

Numero	Barra	Tensão	Teta(°)	Pg (pu)	Qg (pu)	Sensibilidade	Fator de participação (%)	

1	1	1,0818	-0,0000	14,4943	1,7210	-	-	
2	2	1,0778	-33,7783	0,4000	9,8005	0,0046	0,30	
3	3	1,0164	-74,4630	0,0000	4,0140	0,0425	2,83	
4	6	1,1046	-85,6595	0,0000	3,3869	0,5050	33,67	
5	8	1,0945	-77,6257	0,0000	1,2416	0,9479	63,19	

DADOS DA BARRA CRÍTICA								

Barra	Tipo	Tensão	Teta(°)	Si (pu)	Sm (pu)	Beta(°)	det[D']*Vi	M(%)

9	PQ	0,8910	-86,6624	1,3540	4,3451	119,3258	17,0466	68,84

DADOS DO RAMO CRÍTICO								

RAMO CRÍTICO DE TRANSMISSÃO: 7 9								

N° Linha	DE	PARA	FLUXO DE POTENCIA		PERDAS			
			ATIVO(MW)	REATIVO(MVar)	ATIVA(MW)	REATIVA(MVar)		

15	7	9	130,4637	64,2131	0,0000	25,6487		
	9	7	-130,4637	-38,5644				

TOTAL DE PERDAS DO SISTEMA				269,8693	996,4518			
=====								
Número de iterações do Fluxo de Potencia: 3								

Capítulo IV - Resultados

Número da iteração da Análise de Sensibilidade: 3

DADOS DAS BARRAS DE GERAÇÃO							
Numero	Barra	Tensão	Teta(°)	Pg (pu)	Qg (pu)	Sensibilidade	Fator de participação (%)
1	1	1,0818	-0,0000	11,1587	0,1950	-	-
2	2	1,0778	-25,2817	0,4046	6,2309	0,0081	0,54
3	3	1,0164	-58,7757	0,0425	3,1020	0,0462	3,08
4	6	1,1046	-57,5842	0,5050	2,2660	0,4974	33,16
5	8	1,0945	-39,4664	0,9479	0,9599	0,9483	63,22

DADOS DA BARRA CRÍTICA								
Barra	Tipo	Tensão	Teta(°)	Si (pu)	Sm (pu)	Beta(°)	det[D']*Vi	M(%)
9	PQ	0,8963	-58,4234	1,3540	4,6306	110,5397	19,6089	70,76

DADOS DO RAMO CRÍTICO

RAMO CRÍTICO DE TRANSMISSÃO: 7 9

N° Linha	DE	PARA	FLUXO DE POTENCIA		PERDAS	
			ATIVO(MW)	REATIVO(MVar)	ATIVA(MW)	REATIVA(MVar)
15	7	9	153,9548	61,8112	0,0000	33,5532
	9	7	-153,9548	-28,2579		
TOTAL DE PERDAS DO SISTEMA					182,5953	711,8062

4.3 Sistema Sul Brasileiro Equivalente

A Figura 4-2 mostra o diagrama unifilar do sistema equivalente Sul brasileiro.

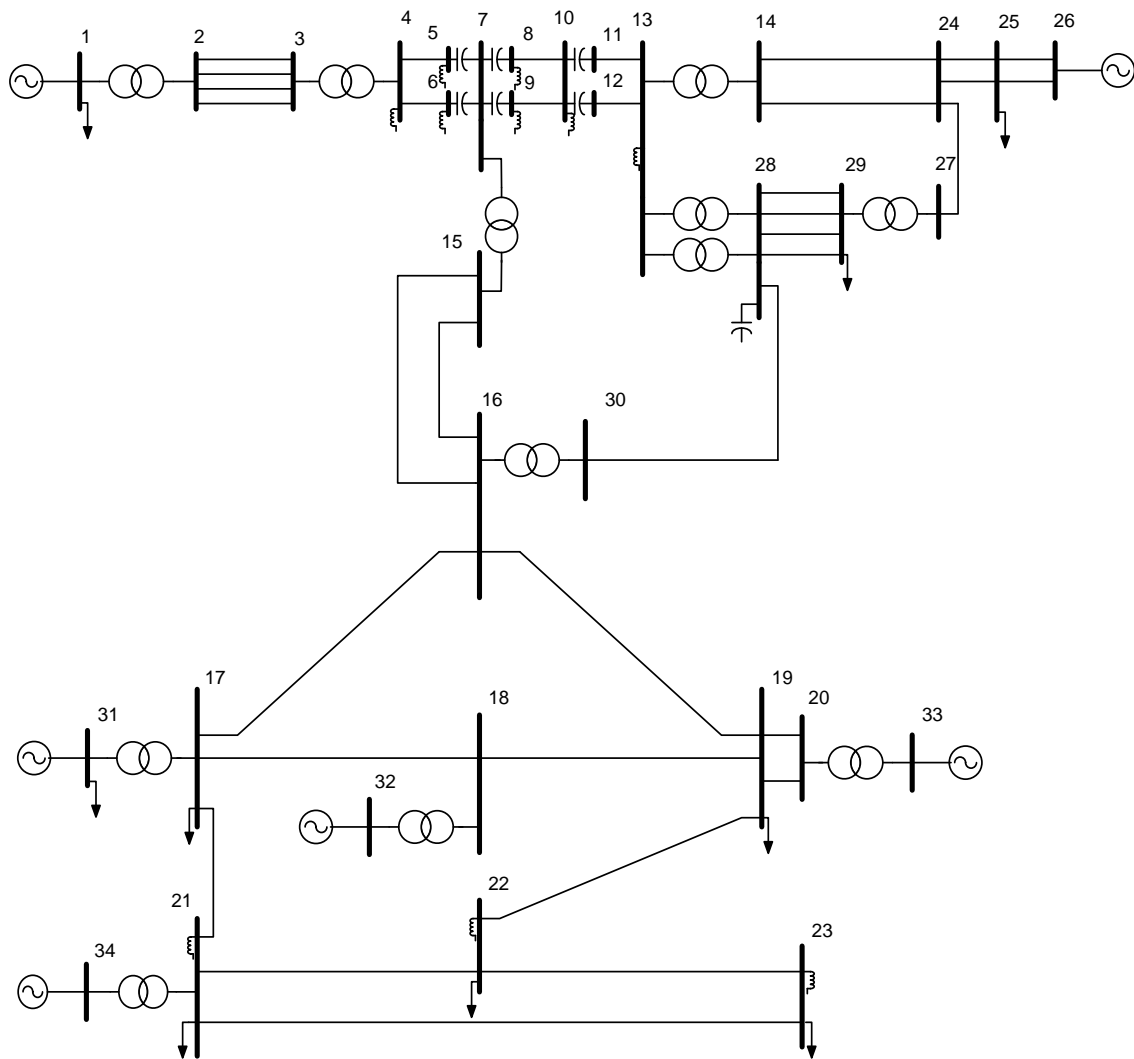


Figura 4-2 – Diagrama unifilar do sistema de 34 Barras

Este sistema possui 34 barras, 42 linhas, 12 transformadores e 5 geradores. Os níveis de tensão na transmissão são 750, 500 e 345 kV, e todos os geradores trabalham com 20kV. A barra 26 representa o equivalente de um sistema de grande porte.

4.3.1 Identificação da Barra Crítica

Do mesmo modo como realizado para o sistema IEEE 14 barras, identificam-se as condições de carregamento de cada barra através dos índices baseados na matriz D' reduzida da matriz Jacobiana.

Por conveniência, os ramos paralelos entre as barras 4, 7, 10 e 13 são equivalentados. Como resultado, um sistema de 31 barras é obtido conforme Figura 4-3.

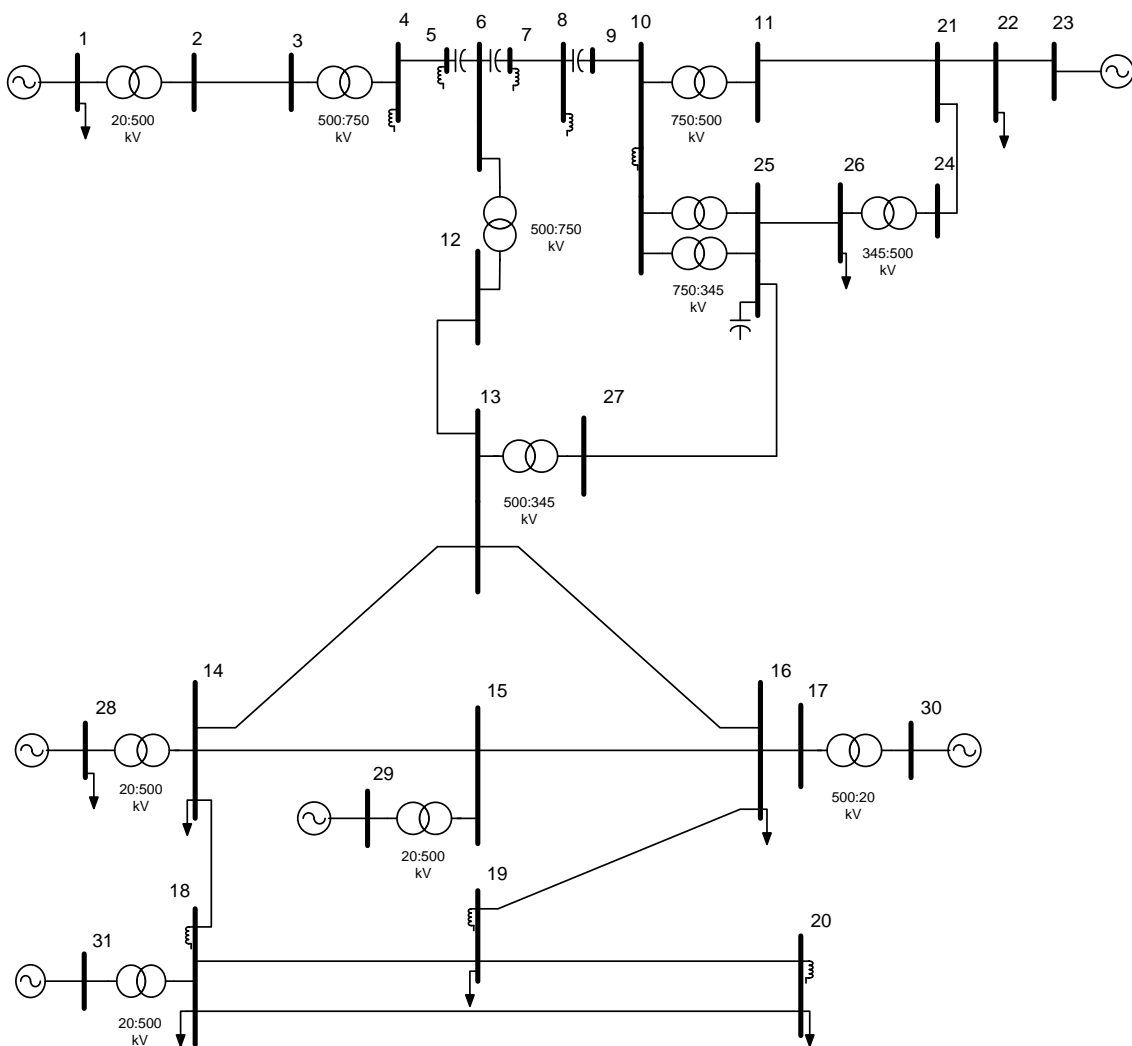


Figura 4-3 - Sistema 34 Barras Reduzido a 31 Barras

Os resultados para a margem de carregamento e o ângulo β são mostrados na Tabela 4-5. A barra 26 é a crítica uma vez que apresenta a menor margem.

Tabela 4-5 – Resultado do Fluxo de Potência e Índices de Estabilidade de Tensão para o Sistema Sul Brasileiro Equivalente

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA								
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA								
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTENCIA								
ÍNDICES E MARGENS PARA AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE TENSÃO								
NA OPERAÇÃO EM TEMPO REAL								
Carregamento (em %): 100								
Controle de tap: NÃO								
Controle de reativos: NÃO								
Número de iterações do Fluxo de Potencia: 9								
DADOS DAS BARRAS								
Barra	Tipo	Tensão	Teta(°)	Si (pu)	Sm (pu)	Beta(°)	det[D']*Vi	M(%)
1	PV	1,0300	4,0802	34,8173	-105,3526	-8,0545	-12311,4092	-402,59
2	PQ	1,0117	-2,3570	0,0000	31,3971	166,2432	985,7755	100,00
3	PQ	1,0104	-2,5823	0,0000	30,5007	166,1050	930,2914	100,00
4	PQ	0,9513	-5,8153	0,0000	22,3149	165,9507	497,9561	100,00
5	PQ	0,9155	-25,9957	0,0000	11,3472	176,2978	128,7589	100,00
6	PQ	0,9319	-17,8136	0,0000	12,5517	172,3696	157,5449	100,00
7	PQ	0,9867	-4,3758	0,0000	24,0175	165,5462	576,8382	100,00
8	PQ	0,9064	-31,9117	0,0000	9,2267	176,4554	85,1328	100,00
9	PQ	0,9213	-14,7694	0,0000	13,2092	170,9679	174,4825	100,00
10	PQ	0,8822	-49,5888	0,0000	8,9795	178,3469	80,6313	100,00
11	PQ	0,9658	-55,5568	0,0000	10,6675	178,5116	113,7963	100,00
12	PQ	0,8760	-12,7416	0,0000	14,3434	169,8084	205,7317	100,00
13	PQ	0,8788	-12,3420	0,0000	14,5836	169,5240	212,6807	100,00
14	PQ	0,9987	9,6859	0,0444	56,0378	142,6159	3140,2343	99,92

Capítulo IV - Resultados

15	PQ	1,0373	9,8979	0,0000	65,8747	142,3560	4339,4727	100,00
16	PQ	1,0496	5,2841	14,9981	58,3513	147,4745	3179,9247	74,30
17	PQ	1,0522	5,6739	0,0000	57,2999	146,4914	3283,2729	100,00
18	PQ	1,0743	13,4741	0,0283	101,4555	122,1519	10293,2085	99,97
19	PQ	1,0753	9,2880	0,0236	59,4129	125,4697	3529,8946	99,96
20	PQ	1,0664	5,3420	6,8897	35,4863	121,8060	1211,8092	80,58
21	PQ	1,0371	-63,2273	0,0000	19,4719	178,9370	379,1546	100,00
22	PQ	1,0934	-65,5195	66,0170	81,1977	178,9480	2234,8229	18,70
23	PV	1,1000	-64,7293	41,1467	-22,1588	-77,0717	-2184,0606	-153,85
24	PQ	0,9905	-63,2177	0,0000	12,6520	178,4928	160,0723	100,00
25	PQ	0,8689	-58,7048	0,0000	8,1856	178,4634	67,0038	100,00
26	PQ	0,8784	-63,8039	34,7071	35,6588	178,5149	66,9715	2,67
27	PQ	0,9286	-16,6060	0,0000	10,4720	168,2506	109,6619	100,00
28	PV	1,0070	17,9887	13,2588	-21,9212	-38,9302	-656,3376	-265,33
29	PV	1,0580	16,5768	12,6909	25,4997	123,2431	489,1745	50,23
30	PV	1,0590	12,5812	12,9187	10,4356	218,0761	-57,9905	-19,22
31	VO	1,0490	22,3000	14,9747	-	-	-	-0,00

4.3.2 Identificação dos Caminhos de Transmissão e do Caminho de Transmissão Mais Carregado

Os resultados anteriores indicam que a barra crítica é a 26. Somando a este fato o cálculo dos fluxos de potência nos ramos de transmissão e conhecendo-se as cinco barras geradoras, a saber, 1, 23, 28, 29 e 30; faz-se a análise e identificação dos caminhos de transmissão existentes.

A Tabela 4-6 apresenta os fluxos de potência ativa e reativa para cada ramo, o somatório das perdas ativa e reativa, bem como os cinco caminhos de transmissão críticos de potência ativa da geração para a barra crítica 26, em ordem decrescente da margem calculada.

Tabela 4-6 – Resultado do Fluxo de Potência e Determinação dos Caminhos de Transmissão mais Carregados para o Sistema Sul Brasileiro Equivalente

DADOS DAS LINHAS						
Nº Linha	DE	PARA	FLUXO DE POTENCIA		PERDAS	
			ATIVO(MW)	REATIVO(MVar)	ATIVA(MW)	REATIVA(MVar)
1	2	1	-3292,0000	-733,7217	0,0000	399,9293
	1	2	3292,0000	1133,6511		
2	2	3	3292,0000	733,7217	1,4155	-30,1573
	3	2	-3290,5845	-763,8791		
3	3	4	3290,5845	763,8791	0,0000	193,3560
	4	3	-3290,5845	-570,5231		
4	4	5	3290,5845	-26,8122	48,2412	-447,3826
	5	4	-3242,3433	-420,5703		
5	5	6	3242,3433	169,1175	0,0000	-470,9930
	6	5	-3242,3433	-640,1105		
6	6	7	5493,3075	665,0989	0,0000	-1371,4402
	7	6	-5493,3075	-2036,5391		
7	7	8	5493,3075	1393,9793	113,2313	1367,7785
	8	7	-5380,0762	-26,2008		
8	8	9	5380,0762	-516,0536	0,0000	-1626,6205
	9	8	-5380,0762	-1110,5669		
9	9	10	5380,0762	1110,5669	137,3358	1913,9294
	10	9	-5242,7404	803,3625		
10	11	10	-2464,0897	1377,0892	0,0000	319,3921
	10	11	2464,0897	-1057,6971		
11	11	21	2464,0897	-1377,0892	34,9183	375,3803
	21	11	-2429,1714	1752,4695		
12	12	6	2250,9642	517,7326	0,0000	206,1452
	6	12	-2250,9642	-311,5874		
13	12	13	-2250,9642	-517,7326	3,4755	15,6302
	13	12	2254,4397	533,3627		

Capítulo IV - Resultados

14	13	14	-1702,9551	-169,4492	57,9537	520,3822
	14	13	1760,9088	689,8314		
15	14	15	-98,7236	-586,9545	1,7173	-67,5180
	15	14	100,4409	519,4365		
16	14	28	-1315,4295	338,6746	2,8605	196,9730
	28	14	1318,2900	-141,7015		
17	15	16	1099,5591	-257,4931	7,2569	-13,9000
	16	15	-1092,3022	243,5931		
18	15	29	-1200,0000	-261,9434	0,0000	151,0783
	29	15	1200,0000	413,0217		
19	16	13	1222,2990	663,0005	37,7152	200,3442
	13	16	-1184,5838	-462,6563		
20	16	19	-391,6978	-225,0460	2,3680	-252,4986
	19	16	394,0658	-27,4525		
21	17	16	1200,0000	317,7384	0,7009	-24,8091
	16	17	-1199,2991	-342,5476		
22	17	30	-1200,0000	-317,7384	0,0000	160,7192
	30	17	1200,0000	478,4576		
23	18	14	354,9723	203,9307	3,7765	-237,6207
	14	18	-351,1957	-441,5514		
24	18	31	-1442,1230	-159,5891	3,3624	231,5358
	31	18	1445,4854	391,1249		
25	19	18	-658,1663	-4,2900	3,8857	-131,0330
	18	19	662,0521	-126,7430		
26	19	20	261,7405	-199,5117	1,3417	-419,3582
	20	19	-260,3988	-219,8465		
27	20	18	-417,9012	-242,1302	4,3675	-505,9859
	18	20	422,2687	-263,8557		
28	21	22	2298,5822	-3460,9025	22,6823	256,5380
	22	21	-2275,8998	3717,4405		
29	21	24	130,5892	1708,4330	6,1420	62,2474
	24	21	-124,4473	-1646,1856		
30	22	23	-3874,1002	-1317,4405	4,8998	55,0865
	23	22	3879,0000	1372,5270		
31	24	26	124,4473	1646,1856	0,0000	197,3454
	26	24	-124,4473	-1448,8401		
32	25	10	-2778,6507	448,4247	0,0000	445,9292

Capítulo IV - Resultados

	10	25	2778,6507	-2,4955		
33	25	26	3331,3434	-607,1659	30,7906	280,2743
	26	25	-3300,5527	887,4401		
34	25	27	-552,6926	158,7411	80,4066	209,6885
	27	25	633,0992	50,9474		
35	27	13	-633,0992	-50,9474	0,0000	47,7954
	13	27	633,0992	98,7428		

TOTAL DE PERDAS | 610,8454 | 2208,1614

CAMINHOS DE TRANSMISSAO MAIS CARREGADOS

Barra Critica do Sistema: 26

Caminho de transmissão: 26 25 27 13 16 19 18 31

	Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:	0,1396	87,1665
Impedancia shunt no gerador:	0,1349	-22,9848
Impedancia shunt no carga:	0,0287	172,5723
Tensão no gerador:	1,0490	22,3000
Tensão na carga:	0,8784	-63,8039
Tensão critica na carga:	3,1633	8,2022

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	14,4549	3,9112	14,9747
Carga:	33,0055	-8,8744	34,1778
Carga Critica:	349,4399	-93,9561	361,8508

	Si	Sm	M(%)
Indices:	34,1778	361,8508	-90,5547

Caminho de transmissão: 26 25 27 13 14 18 31

	Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:	0,1303	90,3858
Impedancia shunt no gerador:	0,1294	-28,8416

Capítulo IV - Resultados

Impedancia shunt no carga:	0,0295	172,3515
Tensão no gerador:	1,0490	22,3000
Tensão na carga:	0,8784	-63,8039
Tensão critica na carga:	2,6510	4,4314

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	14,4549	3,9112	14,9747
Carga:	33,0055	-8,8744	34,1778
Carga Critica:	242,8079	-65,2853	251,4316

	Si	Sm	M(%)
Indices:	34,1778	251,4316	-86,4067

-----|
 Caminho de transmissão: 26 25 27 13 16 15 29
 -----|

	Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:	0,1338	89,7519
Impedancia shunt no gerador:	0,1878	-30,7053
Impedancia shunt no carga:	0,0291	170,7985
Tensão no gerador:	1,0580	16,5768
Tensão na carga:	0,8784	-63,8039
Tensão critica na carga:	2,1217	-1,1663

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	12,0000	4,1302	12,6909
Carga:	33,0055	-8,8744	34,1778
Carga Critica:	157,7969	-42,4278	163,4012

	Si	Sm	M(%)
Indices:	34,1778	163,4012	-79,0835

-----|
 Caminho de transmissão: 26 25 27 13 14 15 29
 -----|

	Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:	0,1294	90,5494
Impedancia shunt no gerador:	0,1856	-34,1899
Impedancia shunt no carga:	0,0294	170,8260

Capítulo IV - Resultados

Tensão no gerador:	1,0580	16,5768
Tensão na carga:	0,8784	-63,8039
Tensão critica na carga:	2,0584	-2,1770

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	12,0000	4,1302	12,6909
Carga:	33,0055	-8,8744	34,1778
Carga Critica:	147,6930	-39,7111	152,9385

	Si	Sm	M(%)
Indices:	34,1778	152,9385	-77,6526

-----|

| Caminho de transmissão: 26 25 27 13 16 17 30

-----|

	Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:	0,1330	88,2879
Impedancia shunt no gerador:	0,2109	-19,7158
Impedancia shunt no carga:	0,0289	170,2622
Tensão no gerador:	1,0590	12,5812
Tensão na carga:	0,8784	-63,8039
Tensão critica na carga:	1,9348	-3,9912

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	12,0000	4,7846	12,9187
Carga:	33,0055	-8,8744	34,1778
Carga Critica:	131,7850	-35,4339	136,4655

	Si	Sm	M(%)
Indices:	34,1778	136,4655	-74,9550

-----|

4.3.3 Determinação do Ramo Crítico

A idéia é analisar os ramos existentes no caminho mais carregado, começando no gerador e incluindo um novo ramo a cada iteração até completar todo o caminho. O caminho 26 – 25 – 27 – 13 – 14 – 18 – 31 é o mais carregado para o sistema em análise. A perda de potência ativa nos ramos pode ser usada para comparar a eficiência dos controles empregados, certificando que as decisões tomadas para o reforço das condições de controle são eficazes e reduzem as perdas existentes nas redes.

O ramo crítico é aquele que apresenta o menor valor ou o mais negativo dentre todas as margens calculadas nesta etapa. São calculadas a impedância do ramo série, impedância shunt do gerador, impedância shunt da carga, tensão do gerador, tensão na carga, tensão crítica na carga e a margem de carregamento da respectiva barra de carga para cada ramo inserido. A Tabela 4-7 ilustra os resultados desta etapa, indicando que o ramo crítico é 25 – 26, por apresentar a menor margem de carregamento dentre todos os ramos analisados.

Tabela 4-7 – Determinação do Ramo de Transmissão Mais Carregado para o Sistema Sul Brasileiro Equivalente

RAMO DE TRANSMISSAO MAIS CARREGADO			
Sub - Caminho de transmissão: 31 18			
		Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:		0.0120	89.1680
Impedancia shunt no gerador:		0.2107	89.1680
Impedancia shunt no carga:		0.2227	-90.8320
Tensão no gerador:		1.0490	22.3000
Tensão na carga:		1.0743	13.4741
Tensão critica na carga:		0.7394	-19.1266
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	14.4549	3.9112	14.9747
Carga:	14.4212	1.5959	14.5093
Carga Critica:	42.8008	4.7364	43.0621
	Si	Sm	M(%)
Indices:	14.9747	43.0621	66.3062
Sub - Caminho de transmissão: 31 18 19			
		Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:		0.0244	89.6801
Impedancia shunt no gerador:		0.1959	44.1546
Impedancia shunt no carga:		0.2543	-32.6174
Tensão no gerador:		1.0490	22.3000
Tensão na carga:		1.0753	9.2880
Tensão critica na carga:		0.7437	-24.7924

Capítulo IV - Resultados

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	14.4549	3.9112	14.9747
Carga:	6.5817	0.0429	6.5818
Carga Critica:	21.6162	0.1409	21.6166

	Si	Sm	M(%)
Indices:	14.9747	21.6166	69.5521

 Sub - Caminho de transmissão: 31 18 19 16

	Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:	0.0436	91.5337
Impedancia shunt no gerador:	0.1456	20.2960
Impedancia shunt no carga:	0.2329	-42.1273

Tensão no gerador:	1.0490	22.3000
Tensão na carga:	1.0496	5.2841
Tensão critica na carga:	0.6645	-12.9427

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	14.4549	3.9112	14.9747
Carga:	3.9170	2.2505	4.5174
Carga Critica:	7.7476	4.4513	8.9353

	Si	Sm	M(%)
Indices:	14.9747	8.9353	49.4427

 Sub - Caminho de transmissão: 31 18 19 16 13

	Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:	0.0589	85.2523
Impedancia shunt no gerador:	0.2105	-12.6135
Impedancia shunt no carga:	0.1217	-118.1394

Tensão no gerador:	1.0490	22.3000
Tensão na carga:	0.8788	-12.3420

Capítulo IV - Resultados

Tensão critica na carga: 1.1905 -0.1274

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	14.4549	3.9112	14.9747
Carga:	11.8458	4.6266	12.7173
Carga Critica:	13.1912	5.1520	14.1616

	Si	Sm	M(%)
Indices:	14.9747	14.1616	-10.1987

Sub - Caminho de transmissão: 31 18 19 16 13 27

	Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:	0.0709	87.3815
Impedancia shunt no gerador:	0.1951	-5.2656
Impedancia shunt no carga:	0.2655	-46.9070

Tensão no gerador: 1.0490 22.3000
 Tensão na carga: 0.9286 -16.6060
 Tensão critica na carga: 0.7642 -25.7054

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	14.4549	3.9112	14.9747
Carga:	6.3310	0.5095	6.3515
Carga Critica:	6.8583	0.5519	6.8804

	Si	Sm	M(%)
Indices:	14.9747	6.8804	7.6882

Sub - Caminho de transmissão: 31 18 19 16 13 27 25

	Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:	0.1377	91.2880
Impedancia shunt no gerador:	0.1268	-21.5747
Impedancia shunt no carga:	0.2575	-67.7306

Tensão no gerador: 1.0490 22.3000

Capítulo IV - Resultados

Tensão na carga: 0.8689 -58.7048
 Tensão critica na carga: 1.3420 -41.8188

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	14.4549	3.9112	14.9747
Carga:	5.5269	-1.5874	5.7504
Carga Critica:	6.7409	-1.9361	7.0134

	Si	Sm	M(%)
Indices:	14.9747	7.0134	-18.0089

Sub - Caminho de transmissão: 31 18 19 16 13 27 25 26

	Modulo	Angulo
Impedancia do ramo serie:	0.1396	87.1665
Impedancia shunt no gerador:	0.1349	-22.9848
Impedancia shunt no carga:	0.0287	172.5723

	Modulo	Angulo
Tensão no gerador:	1.0490	22.3000
Tensão na carga:	0.8784	-63.8039
Tensão critica na carga:	3.1633	8.2022

	Ativa	Reativa	Aparente
Geração:	14.4549	3.9112	14.9747
Carga:	33.0055	-8.8744	34.1778
Carga Critica:	349.4399	-93.9561	361.8508

	Si	Sm	M(%)
Indices:	14.9747	361.8508	-90.5547

RAMO CRÍTICO DE TRANSMISSÃO: 25 26

4.3.4 Análise de Sensibilidade

4.3.4.1 Barras de Geração Consideradas Integralmente

Como visto na seção anterior, a análise de sensibilidade indica ações que tendem a diminuir o carregamento no ramo crítico e, conseqüentemente, aumentar a margem de carregamento na barra crítica. Deste modo, aplica-se a análise de sensibilidade iterativa e os resultados e os seus resultados são mostrados na Tabela 4-8.

O passo de tensão escolhido para a primeira iteração é 0,005 pu, enquanto que o passo de potência ativa é 10 pu para as demais iterações. O processo iterativo demanda 4 iterações, sendo a última descartada em função da etapa 5 do algoritmo . Ao final da terceira iteração, a perda ativa total é reduzida de 610,84 MW para 199,63 MW. Além disto, a margem da barra crítica 26 é aumentada de 2,67% para 48,41%. O ângulo β também assume um valor mais favorável, variando de 178,51° para 113,39°.

Os resultados obtidos em [2] para o mesmo sistema mostram uma redução da perda ativa total de 604 MW para 192 MW. Além disto, a margem da barra crítica é aumentada de 2,8% para 43,2% e o ângulo β assume um valor favorável variando de 179° para 121°. Embora os métodos sejam distintos, os valores encontrados em ambos estão próximos. Portanto, a análise de sensibilidade proporciona ações de controle coerentes com os resultados descritos na literatura e, principalmente, eficazes no sentido de reforçar a segurança de tensão.

Tabela 4-8 – Resultados para a Análise de Sensibilidade Iterativa Considerando Todas as Barras de Geração para o Sistema Sul Brasileiro Equivalente

ANALISE DE SENSIBILIDADE ITERATIVA								
Número de iterações do Fluxo de Potencia: 9								
Número da iteração da Analise de Sensibilidade: 1								
DADOS DAS BARRAS DE GERAÇÃO								
Numero	Barra	Tensão	Teta(°)	Pg (pu)	Qg (pu)	Sensibilidade	Fator de participação (%)	
1	1	1,0300	4,0802	33,0000	11,3365	0,0165	32,93	
2	23	1,1000	-64,7293	38,7900	13,7253	0,0213	42,63	
3	28	1,0070	17,9887	13,2000	-1,4170	0,0039	7,78	
4	29	1,0580	16,5768	12,0000	4,1302	0,0030	5,92	
5	30	1,0590	12,5812	12,0000	4,7846	0,0035	6,93	
6	31	1,0490	22,3000	14,4549	3,9112	0,0019	3,81	
DADOS DA BARRA CRÍTICA								
Barra	Tipo	Tensão	Teta(°)	Si (pu)	Sm (pu)	Beta(°)	det[D']*Vi	M(%)
26	PQ	0,9557	-63,8039	34,7071	46,7899	159,5806	984,7141	25,82
DADOS DO RAMO CRÍTICO								
RAMO CRÍTICO DE TRANSMISSÃO: 25 26								
N° Linha	DE	PARA	FLUXO DE POTENCIA		PERDAS			
			ATIVO (MW)	REATIVO (MVar)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVar)		

Capítulo IV - Resultados

33	25	26	3358,7286	-458,8138	25,7775	226,4875
	26	25	-3332,9511	685,3012		

TOTAL DE PERDAS DO SISTEMA | 487,5722 | -561,1825

Número de iterações do Fluxo de Potencia: 5

Número da iteração da Analise de Sensibilidade: 2

DADOS DAS BARRAS DE GERAÇÃO

Numero	Barra	Tensão	Teta(°)	Pg (pu)	Qg (pu)	Sensibilidade	Fator de participação (%)
1	1	1,0465	7,4078	33,0000	4,6715	0,2215	2,21
2	23	1,1213	-51,2088	38,7900	3,6604	9,6940	96,94
3	28	1,0109	19,5041	13,2000	-3,2915	0,0013	0,01
4	29	1,0610	18,2156	12,0000	2,5893	0,0215	0,22
5	30	1,0625	14,3744	12,0000	3,0205	0,0618	0,62
6	31	1,0509	22,3000	13,2221	2,5979	-	-

DADOS DA BARRA CRÍTICA

Barra	Tipo	Tensão	Teta(°)	Si (pu)	Sm (pu)	Beta(°)	det[D']*Vi	M(%)
26	PQ	1,0382	-50,2529	34,7071	61,8734	128,6198	2623,7332	43,91

DADOS DO RAMO CRÍTICO

RAMO CRÍTICO DE TRANSMISSÃO: 25 26

N° Linha	DE	PARA	FLUXO DE POTENCIA		PERDAS	
			ATIVO(MW)	REATIVO(MVar)	ATIVA(MW)	REATIVA(MVar)
33	25	26	3044,1193	-115,4458	17,3927	138,6897
	26	25	-3026,7266	254,1355		

Capítulo IV - Resultados

TOTAL DE PERDAS DO SISTEMA				268,7496	-4819,4206			
=====								
Número de iterações do Fluxo de Potencia: 4								

Número da iteração da Analise de Sensibilidade: 3								

DADOS DAS BARRAS DE GERAÇÃO								

Numero	Barra	Tensão	Teta(°)	Pg (pu)	Qg (pu)	Sensibilidade	Fator de participação (%)	

1	1	1,0465	31,9792	33,2215	-4,8805	0,1243	1,24	
2	23	1,1213	-10,9361	48,4840	-12,9991	9,8294	98,29	
3	28	1,0109	34,0599	13,2013	-6,3173	0,0227	0,23	
4	29	1,0610	33,0187	12,0215	0,1808	0,0174	0,17	
5	30	1,0625	29,4792	12,0618	0,1978	0,0063	0,06	
6	31	1,0509	22,3000	1,0339	0,1431	-	-	

DADOS DA BARRA CRÍTICA								

Barra	Tipo	Tensão	Teta(°)	Si (pu)	Sm (pu)	Beta(°)	det[D']*Vi	M(%)

26	PQ	1,0712	-12,6854	34,7071	67,2721	113,3997	3320,9551	48,41

DADOS DO RAMO CRÍTICO								

RAMO CRÍTICO DE TRANSMISSÃO: 25 26								

N° Linha	DE	PARA	FLUXO DE POTENCIA		PERDAS			
			ATIVO(MW)	REATIVO(MVar)	ATIVA(MW)	REATIVA(MVar)		

33	25	26	2705,0981	55,2153	12,8282	91,5155		
	26	25	-2692,2699	36,3002				

TOTAL DE PERDAS DO SISTEMA				199,6307	-6002,3576			
=====								

4.3.4.2 Barra de Geração 23 Ignorada

Como visto, a barra de geração 23 possui maior influência. Isto significa que um pequeno aumento da geração nesta barra causa uma melhora considerável nas condições de carregamento, diminuindo o fluxo de potência no ramo crítico 25 – 26 e aumentando a margem da barra crítica 26.

O programa permite que uma ou mais barras tenham a geração fixa, não participando do processo. Nestes termos, a barra 23 é escolhida. Assim, caberá as outras barras de geração a melhoria da margem da barra crítica. Como o sistema se mantém o mesmo, as tensões, as margens de carregamento para cada barra, os fluxos de potência, os caminhos críticos de transmissão e o ramo crítico de transmissão são idênticos aos já simulados e descritos anteriormente. Portanto, serão omitidos na apresentação desta simulação.

A Tabela 4-9 apresenta os resultados, via análise de sensibilidade, considerando a potência ativa gerada na barra 23 fixa. Os passos de tensão e de potência ativa são os mesmos utilizados na simulação anterior. O processo iterativo demanda quatro iterações, sendo a última descartada. A perda ativa total é reduzida de 610,84 MW para 476,80 MW, enquanto que a margem da barra crítica 26 é aumentada de 2,67% para 26%. O ângulo β varia de 178,5P para 159,23°. Comparativamente a possibilidade de variação da potência ativa gerada na barra 23, os resultados agora são menos eficazes uma vez que esta barra tem uma participação decisiva no processo de reforço da segurança de tensão.

Tabela 4-9 – Resultados para a Análise de Sensibilidade Iterativa Ignorando a Barra de Geração 23 para o Sistema Sul Equivalente

ANALISE DE SENSIBILIDADE ITERATIVA								
Número de iterações do Fluxo de Potencia: 8								
Número da iteração da Analise de Sensibilidade: 1								
DADOS DAS BARRAS DE GERAÇÃO								
Numero	Barra	Tensão	Teta(°)	Pg (pu)	Qg (pu)	Sensibilidade	Fator de participação (%)	
1	1	1.0300	4.0802	33.0000	11.3365	0.0287	57.41	
2	23	1.1000	-64.7293	38.7900	13.7253	-	-	
3	28	1.0070	17.9887	13.2000	-1.4170	0.0068	13.56	
4	29	1.0580	16.5768	12.0000	4.1302	0.0052	10.32	
5	30	1.0590	12.5812	12.0000	4.7846	0.0060	12.07	
6	31	1.0490	22.3000	14.4549	3.9112	0.0033	6.64	
DADOS DA BARRA CRÍTICA								
Barra	Tipo	Tensão	Teta(°)	Si (pu)	Sm (pu)	Beta(°)	det[D']*Vi	M(%)
26	PQ	0.9317	-63.8039	34.7071	44.7593	162.9351	798.8170	22.46
DADOS DO RAMO CRÍTICO								
RAMO CRÍTICO DE TRANSMISSÃO: 25 26								
Nº Linha	DE	PARA	FLUXO DE POTENCIA		PERDAS			
			ATIVO(MW)	REATIVO(MVar)	ATIVA(MW)	REATIVA(MVar)		
33	25	26	3356.4393	-428.4929	27.0102	239.9869		

Capítulo IV - Resultados

26	25	-3329.4291	668.4798					
TOTAL DE PERDAS DO SISTEMA				504.1537	-201.4060			
Número de iterações do Fluxo de Potencia: 4								
Número da iteração da Analise de Sensibilidade: 2								
DADOS DAS BARRAS DE GERAÇÃO								
Numero	Barra	Tensão	Teta(°)	Pg (pu)	Qg (pu)	Sensibilidade	Fator de participação (%)	
1	1	1.0587	6.7894	33.0000	6.7385	5.2035	74.34	
2	23	1.1000	-53.2800	38.7900	3.7589	-	-	
3	28	1.0138	19.2988	13.2000	-3.0009	0.0000	0.00	
4	29	1.0632	18.0089	12.0000	2.7931	0.0475	0.68	
5	30	1.0650	14.1641	12.0000	3.3055	0.4630	6.61	
6	31	1.0523	22.3000	13.3879	2.7186	-	-	
DADOS DA BARRA CRÍTICA								
Barra	Tipo	Tensão	Teta(°)	Si (pu)	Sm (pu)	Beta(°)	det[D']*Vi	M(%)
26	PQ	0.9375	-52.3077	34.7071	46.6848	159.6188	974.8889	25.66
DADOS DO RAMO CRÍTICO								
RAMO CRÍTICO DE TRANSMISSÃO: 25 26								
N° Linha	DE	PARA	FLUXO DE POTENCIA		PERDAS			
			ATIVO(MW)	REATIVO(MVar)	ATIVA(MW)	REATIVA(MVar)		
33	25	26	3358.2871	-405.5576	26.6278	235.8761		
	26	25	-3331.6593	641.4337				
TOTAL DE PERDAS DO SISTEMA				475.6029	-619.9337			

Capítulo IV - Resultados

```

=====
Número de iterações do Fluxo de Potencia: 3
-----
Número da iteração da Analise de Sensibilidade: 3
-----
                                DADOS DAS BARRAS DE GERAÇÃO
-----
Numero | Barra | Tensão | Teta(°) | Pg (pu) | Qg (pu) | Sensibilidade | Fator de participação (%)
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
1       | 1     | 1.0587 | 22.3945 | 38.2035 | 7.8164  | 2.4587       | 35.12
2       | 23    | 1.1000 | -40.2581| 38.7900 | 2.7282  | -            | -
3       | 28    | 1.0138 | 26.6160 | 13.2000 | -3.8893 | 0.0000       | 0.00
4       | 29    | 1.0632 | 25.5074 | 12.0475 | 2.0973  | 2.2320       | 31.89
5       | 30    | 1.0650 | 22.0679 | 12.4630 | 2.5554  | 1.0923       | 15.60
6       | 31    | 1.0523 | 22.3000 | 7.3885  | 1.3739  | -            | -
-----
                                DADOS DA BARRA CRÍTICA
-----
Barra | Tipo | Tensão | Teta(°) | Si (pu) | Sm (pu) | Beta(°) | det[D']*Vi | M(%)
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
26    | PQ   | 0.9361 | -39.2869| 34.7071 | 46.9001 | 159.2303 | 995.0390   | 26.00
-----
                                DADOS DO RAMO CRÍTICO
-----
RAMO CRÍTICO DE TRANSMISSÃO: 25 26
-----
Nº Linha | DE | PARA | FLUXO DE POTENCIA | PERDAS
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
          |    |      | ATIVO(MW) | REATIVO(MVar) | ATIVA(MW) | REATIVA(MVar)
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
33       | 25 | 26   | 3357.2260 | -410.4419     | 26.7066   | 236.7343
          | 26 | 25   | -3330.5194| 647.1763      |            |
-----
                                TOTAL DE PERDAS DO SISTEMA | 476.8098 | -432.6110
=====

```

4.4 Comentários Finais

Os resultados da análise de sensibilidade, para os casos estudados, são diferentes porque a configuração de carregamento depende fortemente da geração da barra 23. Esta afirmativa pode ser evidenciada no primeiro caso analisando os valores de sensibilidades das barras de geração.

No segundo caso, a barra 23 é retirada e verifica-se a importância da barra 1 para suprir a demanda, da qual é exigida um aumento da geração para reduzir o fluxo de potência no ramo crítico e a aumentar a margem da barra 26. Nota-se que ocorreu a redução das perdas de potência ativa bem como o aumento da margem de segurança, mas a melhora destes parâmetros é inferior a encontrada no primeiro caso. A justificativa para este fato está novamente no grau de sensibilidade encontrado no primeiro caso, que indica uma maior eficiência da barra 23, sobre as outras barras de geração, para aumentar a segurança de tensão.

Capítulo V

Conclusões

5.1 Considerações Finais

Esta dissertação aborda alguns aspectos para a correta análise da estabilidade de tensão dos SEP. A sua relevância reside no fato de manter a operação em equilíbrio, aumentando os níveis de segurança e a capacidade de recuperação após um distúrbio ou aumento de carregamento. Pesquisas e estudos são realizados nesta área com o objetivo de disponibilizar ferramentas analíticas capazes de identificar a existência de fenômenos danosos e propor ações de controle que melhore o funcionamento e operação da rede. Portanto, o objetivo é manter o sistema elétrico operando na região estável.

Dentre vários métodos existentes para avaliar as condições de segurança de tensão, este trabalho emprega índices calculados através da matriz Jacobiana do fluxo de potência. Tais índices indicam quão próximo um sistema pode estar da instabilidade ou colapso de tensão. O esforço computacional envolvido é reduzido quando comparado com outros métodos existentes na literatura.

Além de verificar as condições de operação para cada barra, a modelagem desenvolvida é capaz de identificar os caminhos mais críticos de transmissão e, posteriormente, o ramo crítico de transmissão através de um algoritmo baseado na teoria de grafos. Isso implica numa análise minuciosa, não apenas das tensões e do carregamento individual das barras, mas também do fluxo de potência ativa. Com estes dados, ações de controle mais específicas e eficazes, baseadas no ponto de operação da rede, são definidas.

A metodologia visa determinar ações corretivas eficazes para tentar elevar o grau de segurança. Após a avaliação completa das condições do sistema, ações de reforço são propostas em função da análise de sensibilidade. O baixo esforço computacional, a fácil assimilação de seus conceitos e os resultados, mostram que sua aplicação é viável, especialmente em tempo real. Uma possibilidade é a opção do usuário manipular os controles de acordo com suas necessidades ou restrições operativas da rede. Outra possibilidade é, diretamente, identificar as barras mais sensíveis ao controle adequado visando a segurança de tensão.

5.2 Proposta para Trabalhos Futuros

A seguir, estão listados alguns tópicos que servem de base para estudos futuros:

- Aplicação da metodologia descrita considerando os índices e a margem de carregamentos em barras PV, uma vez que este trabalho considera apenas as barras de carga como possíveis barras crítica;
- Inserção de outros dispositivos de controle na análise de sensibilidade;
- Desenvolvimento de metodologia para determinar, de forma sistemática, o passo de tensão e de potência para as iterações da análise de sensibilidade agilizando o processo da busca por ações de controle. O fluxo de potência ótimo pode ser uma destas metodologias;
- Consideração do redespacho de potência ativa e reativa a partir da segunda iteração do processo de reforço;
- Análise do fluxo de potência aparente nas linhas de transmissão;
- Análise da possibilidade da escolha do ramo crítico através da variação das margens quando cada ramo é inserido no caminho de transmissão.

Apêndice A

Índices de Avaliação de Segurança de Tensão

A.1 A Ferramenta Analítica [31]

O sistema linearizado das equações estáticas de fluxo de carga é descrito por:

$$\begin{bmatrix} \underline{\Delta P} \\ \underline{\Delta Q} \end{bmatrix} = \underline{J} \cdot \begin{bmatrix} \underline{\Delta \theta} \\ \underline{\Delta V} \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Destacando-se as equações e variáveis relacionadas com a barra i em análise:

$$\begin{bmatrix} \underline{\Delta P}' \\ \underline{\Delta Q}' \\ \underline{\Delta P}_i \\ \underline{\Delta Q}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{\Delta \theta}' \\ \underline{\Delta V}' \\ \underline{\Delta \theta}_i \\ \underline{\Delta V}_i \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

As submatrizes \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} e \underline{D} são partições da matriz Jacobiana \underline{J} .

Assumindo uma variação infinitesimal de carga ou geração $\underline{\Delta P}_i$ e $\underline{\Delta Q}_i$, somente para a barra i de um sistema multi-nó, então $\underline{\Delta P}' = \underline{\Delta Q}' = 0$. Logo, o sistema (A.2) é reduzido a um sistema de dimensão (2x2).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \mathbf{D}' \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

onde:

$$\mathbf{D}' = \mathbf{D} - \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B} \quad (\text{A.4})$$

Portanto, as relações de sensibilidade entre as injeções de potência ativa e reativa e o módulo e ângulo da tensão na barra i , levando em consideração o restante do sistema, podem ser avaliadas por (A.3). A matriz \mathbf{D}' relaciona P_i e Q_i com θ_i e V_i . No sistema multi-nó $\mathbf{D}' \neq \mathbf{D} \neq \mathbf{J}$. A magnitude e o sinal do determinante da matriz \mathbf{D}' indicam, respectivamente, à distância ao máximo carregamento e a região de operação na curva PV.

Em um sistema de duas barras o fluxo de potência que chega à barra i é igual à potência consumida pela carga. Considerando k como a barra de geração, o determinante da matriz \mathbf{D}' é calculado por:

$$\det \mathbf{D}' = \left[\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \right] \quad (\text{A.5})$$

onde:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sen \theta_{ik}) \quad (\text{A.6})$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} + V_i V_k (G_{ik} \sen \theta_{ik} + B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (\text{A.7})$$

Derivando (A.6) e (A.7) e substituindo as quatro derivadas em (A.4):

$$\begin{aligned} \det \mathbf{D}' = & -V_i^2 V_k^2 (G_{ik}^2 + B_{ik}^2) + 2V_i^2 B_{ii} (V_k G_{ik} \sen \theta_{ik} - V_k B_{ik} \cos \theta_{ik}) \\ & - 2V_i^2 G_{ii} (V_k G_{ik} \cos \theta_{ik} + V_k B_{ik} \sen \theta_{ik}) \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Fazendo $Y_{ik}^2 = (G_{ik}^2 + B_{ik}^2)$ e multiplicando ambos os lados de (A.8) por V_i :

$$\det \mathbf{D}' \cdot V_i = -[V_i V_k Y_{ik}]^2 + 2V_i^2 B_{ii} [V_i V_k (G_{ik} \sen \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})] - 2V_i^2 G_{ii} [V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sen \theta_{ik})] \quad (\text{A.9})$$

Por outro lado, a potência aparente injetada na barra i é dada por $S_i^2 = P_i + jQ_i$.

De (A.6) e (A.7):

$$S_i^2 = P_i^2 + Q_i^2 = V_i^4 (G_{ii}^2 + B_{ii}^2) + V_i^2 V_k^2 Y_{ik}^2 + 2V_i^2 G_{ii} V_i V_k (G_{ik} \sen \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) - 2V_i^2 B_{ii} V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (\text{A.10})$$

Fazendo $S_{io}^2 = V_i^4 Y_{ii}^2$ e comparando (A.9) e (A.10), obtém-se:

$$(\det \mathbf{D}') \cdot V_i = S_{io}^2 - S_i^2 \quad (\text{A.11})$$

O resultado obtido em (A.11) é muito importante para o estudo do carregamento da rede. Aumentando gradualmente o valor da potência injetada S_i , o máximo será alcançado quando S_i^2 for igual a S_{io}^2 , fazendo com que o produto $(\det \mathbf{D}') \cdot V_i$ seja igual a zero.

Dessa forma, para um sistema de duas barras:

- S_i^2 é a potência injetada ao quadrado na barra i , no ponto de operação em análise;
- S_{io}^2 é a estimativa da potência ao quadrado máxima que pode ser injetada na barra i , dado por $S_{io}^2 = V_i^4 Y_{ii}^2$.
- $(\det \mathbf{D}') \cdot V_i$ é o indicador da distância de S_i^2 a S_{io}^2 .

A.2 Sistema Multi-nó

O resultado obtido em (A.11) para um sistema de duas barras, é estendido ao sistema multi-nó. Seja \mathbf{D} a matriz que relaciona linearmente as injeções de potência ativa e reativa ao ângulo e módulo da tensão na barra i :

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & z \\ y & u \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

Seja:

$$\left[-\mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B} \right] = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \\ b_3 & b_4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

Como $\mathbf{D}' = \mathbf{D} - \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B}$ e usando (A.12) e (A.13) em (A.4):

$$\det \mathbf{D}' = \det \left[\begin{pmatrix} x & z \\ y & u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & b_2 \\ b_3 & b_4 \end{pmatrix} \right] \quad (\text{A.14})$$

$$\det \mathbf{D}' = [x.u - y.z] + [x.b_4 - y.b_3] + [b_1.u - b_2.z] + [b_1.b_4 - b_2.b_3] \quad (\text{A.15})$$

De (A.12):

$$\det \mathbf{D}' = [x.u - y.z] \quad (\text{A.16})$$

Substituindo (A.16) em (A.15):

$$\det \mathbf{D}' = \det \mathbf{D} + [x.b_4 - y.b_3] + [b_1.u - b_2.z] + [b_1.b_4 - b_2.b_3] \quad (\text{A.17})$$

O resultado para um sistema de duas barras, onde $D' = D$, aqui repetido por comodidade, $(\det D') \cdot V_i = S_{io}^2 - S_i^2$ pode ser estendido. Multiplicando ambos os lados de (A.17) por V_i :

$$(\det D') \cdot V_i = (\det D') \cdot V - \Delta \det \cdot V_i \quad (\text{A.18})$$

onde:

$$\Delta \det \cdot V_i = -\{[x \cdot b_4 - y \cdot b_3] + [b_1 \cdot u - b_2 \cdot z] + [b_1 \cdot b_4 - b_2 \cdot b_3]\} \cdot V_i \quad (\text{A.19})$$

Substituindo (A.11) em (A.18):

$$(\det D') \cdot V_i = (S_{io}^2 - \Delta \det \cdot V_i) - S_i^2 \quad (\text{A.20})$$

O novo termo $\Delta \det \cdot V_i$ pode ser escrito a partir de (A.18):

$$\Delta \det \cdot V_i = (\det D - \det D') \cdot V_i \quad (\text{A.21})$$

Para um sistema multi-nó:

- S_i^2 é a potência injetada ao quadrado na barra i no ponto de operação em análise;
- S_{io}^2 é a estimativa da potência "máxima" ao quadrado que poderia ser injetada para a barra i , dado por $S_{io}^2 = V_i^4 \cdot Y_{ii}^2$;
- $\Delta \det \cdot V_i$ está relacionada à potência injetada no restante do sistema que limita a injeção de potência na barra i , dado por $\Delta \det \cdot V_i = (\det D - \det D') \cdot V_i$;
- $S_m^2 = S_{io}^2 - \Delta \det \cdot V_i$ é definida como a estimativa da máxima potência aparente ao quadrado que poderia ser injetada na barra i , considerando

todo o sistema. É possível que o índice S_m^2 possua valores negativos quando $S_{io}^2 < \Delta \det.V_i$ e isso pode acontecer:

- se o termo $S_{io}^2 = V_i^4.Y_{ii}^2$ for pequeno, isto é, se o elemento diagonal da matriz admitância da barra for pequeno,
 - se o termo $\Delta \det.V_i = (\det \mathbf{D} - \det \mathbf{D}').V_i$ for grande, o que ocorre principalmente se $\det[\mathbf{D}'] < 0$.
- $S_m = \text{ sinal de } (S_{io}^2 - \Delta \det.V_i) \sqrt{|S_{io}^2 - \Delta \det.V_i|}$ é uma estimativa da máxima potência aparente que estaria sendo injetada na barra i , calculada no ponto de operação em análise.

Na Figura A.1, o comportamento do $\det \mathbf{D}'$ é mostrado para uma curva SV. A parte superior é caracterizada por $\det \mathbf{D}' > 0$; a parte inferior por $\det \mathbf{D}' < 0$ e a fronteira entre estas duas regiões é dada por $\det \mathbf{D}' = 0$, ou seja, corresponde ao máximo carregamento.

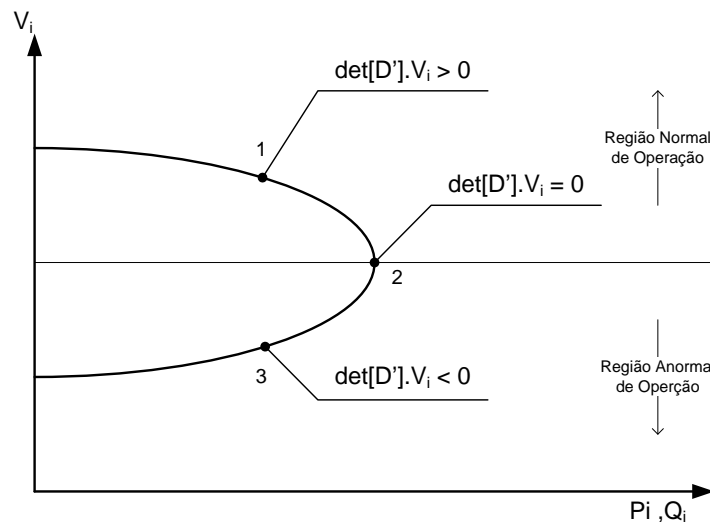


Figura A.1 - Sinal do $\det[\mathbf{D}']$ na Curva SV

Em barras de carga com um valor negativo do determinante da matriz \mathbf{D}' , um aumento da carga tem como resultado um aumento na tensão da barra, ou seja, ocorre uma reação contrária ao que é esperada.

A.3 Sinal do Determinante D' [32]

O determinante da matriz D' é dado por:

$$\det D' = \left[\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \right] \quad (\text{A.22})$$

Os vetores gradiente de potência ativa e reativa podem ser escritos como:

$$\dot{V}P = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \vec{i} + \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \vec{j} + 0 \cdot \vec{k} \quad \text{e} \quad \dot{V}Q = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \vec{i} + \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \vec{j} + 0 \cdot \vec{k} \quad (\text{A.23})$$

onde \vec{i} , \vec{j} e \vec{k} são vetores unitários de uma base ortogonal.

O produto vetorial é:

$$\dot{V}P \times \dot{V}Q = \left[\left(\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \right) - \left(\frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \right) \right] \cdot \vec{k} \quad (\text{A.24})$$

Substituindo (A.22) em (A.24):

$$\dot{V}P \times \dot{V}Q = \det D' \cdot \vec{k} \quad (\text{A.25})$$

mas:

$$\dot{V}P \times \dot{V}Q = |\dot{V}P| \cdot |\dot{V}Q| \cdot \text{sen}(\beta) \quad (\text{A.26})$$

onde β é o ângulo entre $\dot{V}P$ e $\dot{V}Q$, Assim:

$$\det[D'] = |\dot{V}P| \cdot |\dot{V}Q| \cdot \text{sen}(\beta) \quad (\text{A.27})$$

Como o sinal de $\det[D']$ é função somente de β , então:

$$\det \mathbf{D}' > 0 \text{ se } \text{sen}(\beta) > 0, \rightarrow 0^\circ < \beta < 180^\circ$$

$$\det \mathbf{D}' < 0 \text{ se } \text{sen}(\beta) < 0, \rightarrow 0^\circ > \beta > -180^\circ$$

$$\det \mathbf{D}' = 0 \text{ se } \text{sen}(\beta) = 0, \rightarrow \beta = \pm 180^\circ, \beta = 0^\circ$$

Observa-se que tomando $\dot{\nabla}P_i$ como eixo de referência, na região superior da curva SV $0^\circ < \beta < 180^\circ$ e na região inferior $0^\circ > \beta > -180^\circ$. No ponto máximo, os vetores gradientes $\dot{\nabla}P_i$ e $\dot{\nabla}Q_i$ estão alinhados e o ângulo β formado por esses dois vetores é $\pm 180^\circ$ ou 0° .

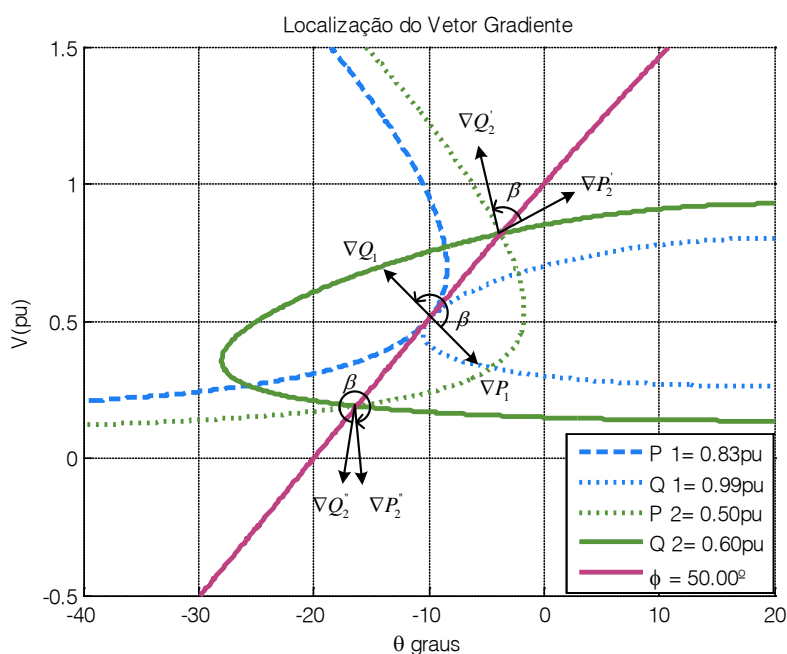


Figura A.2 - Localização do Vetor Gradiente no Plano V x θ

Logo, o ângulo β pode complementar a avaliação do carregamento da rede, indicando a região de operação e a distância angular até o máximo.

A.4 Interpretação dos Índices S_m e M [33]

Os índices S_m e M indicam a distância existente entre a potência nos pontos de operação e de máximo carregamento, sendo de grande importância para a avaliação da segurança de tensão.

Nesta seção, serão avaliados os índices S_m e M de modo qualitativo através de equações matemáticas e gráficos. Para uma análise quantitativa, é válido lembrar que os valores calculados para um determinado ponto de operação não servem de estimativa para outros e, para cada ponto de operação, é necessário um novo cálculo destes índices.

A.4.1 Análise da Curva SV para um Sistema Duas Barras

Com as equações de fluxo de potência para um sistema de duas barras obtém-se a Figura A.3. Para um sistema duas barras $\Delta \det \cdot V_i = 0$ e como $\det \mathbf{D}' = \det \mathbf{D}$, então $S_m = S_{io}$.

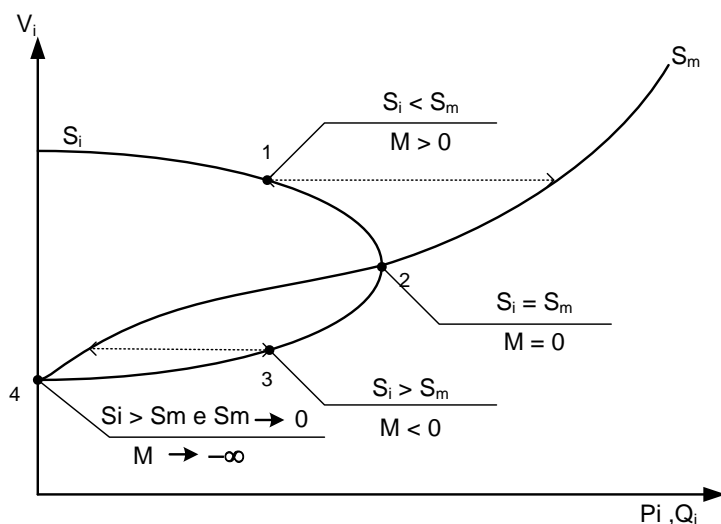


Figura A.3 - Sinal dos Índices S_i e S_m na Curva SV para um Sistema Duas Barras

O primeiro ponto de operação (ponto 1) possui potência injetada na barra menor que a máxima potência que poderia ser injetada ($S_i < S_m$). Ao mesmo tempo, nota-se que este ponto pertence à região normal de operação. Em vista disso, a margem de

potência é maior do que zero, demonstrando que o sistema opera na região normal a uma determinada distância do máximo carregamento.

Em 2, a potência injetada é igual a máxima potência que poderia ser injetada na barra ($S_m < S_i$). Logo, este ponto de operação corresponde ao ponto de máximo carregamento.

Em 3, a potência injetada é maior que a potência máxima que poderia ser injetada na barra ($S_i > S_m$). Neste caso, a margem de potência torna-se negativa, o que indica operação na região anormal.

Em 4, a potência máxima que poderia se injetada tende a zero ($S_m \rightarrow 0$) mais rapidamente do que a própria potência injetada na barra, o que faz a margem de potência tender a um número infinitamente negativo ($M \rightarrow -\infty$).

A.4.2 Análise da Curva SV para um Sistema Multi-nó

Novamente serão analisados quatro pontos de operação na curva SV, mostrados na Figura A.4.

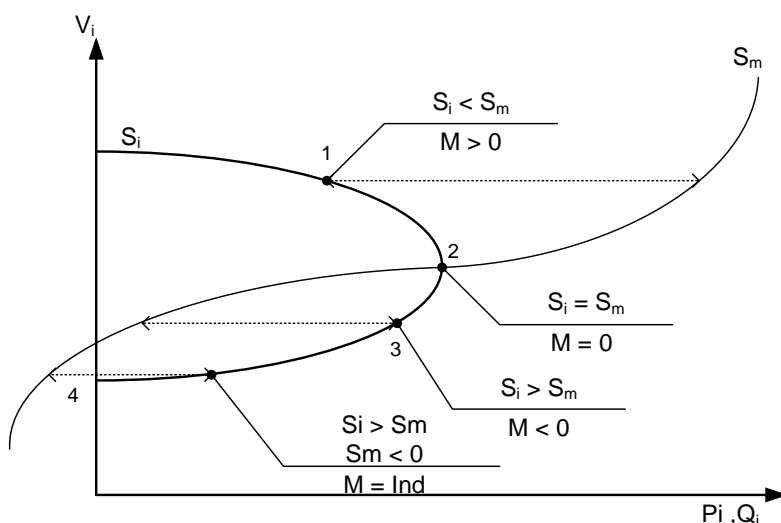


Figura A.4 - Sinal dos Índices S_i e S_m na Curva SV para um Sistema Multi-Nó

No primeiro ponto de operação (ponto 1), nota-se que $S_i < S_m$ e, como visto anteriormente, $\det \mathbf{D}' > 0$. Este ponto está na região normal de operação e os índices S_m e M não possuem problemas, no que se refere à interpretação física e/ou matemática.

Em 2, $S_i = S_m$ e $\det \mathbf{D}' = 0$. Neste ponto de operação, a margem de potência é nula indicando que este é o ponto de máximo carregamento.

Em 3 e 4, $S_i > S_m$ e estes pontos estão na região anormal. Nesta região, três casos distintos são considerados. O primeiro caso é $S_i > S_m$, $S_m > 0$, correspondente ao ponto 3 da Figura A.4. A solução para a margem de potência retorna um valor negativo. Para o segundo caso, $S_i > S_m$, $S_m = 0$. A margem de potência é infinitamente negativa, o que não é desejável. Finalmente, para o terceiro caso $S_i > S_m$ sendo $S_m < 0$, o que corresponde ao ponto 4 da Figura A.4. A margem é indefinida para este ponto, já que $S_m^2 < 0$. Este fato também é indesejado, uma vez que se perde o sentido da estimativa da distância entre S_i e S_m na base de S_m .

Para estes casos, ações de controle podem ter efeito oposto ao esperado, além do risco de ocorrer problemas relacionados aos valores das tensões no barramento e o possível colapso de tensão.

A.5 Margem de Potência

O valor da margem de potência, dado por $S_m - S_i$, é a diferença entre a potência máxima injetada e a potência estimada no ponto de operação. Contudo, é difícil avaliar se a margem de determinada barra é grande ou pequena. Isto depende da importância relativa entre as barras, por exemplo, para a localização e eficácia das ações de controle de tensão e corte de carga. Este problema é resolvido pelo índice $S_m - S_i$ (quanto menor, pior é a situação) dividido pelo índice S_m ou S_i (dependendo da região de operação). Assim, a barra crítica é determinada e as barras ordenadas diretamente pelo seu grau de carregamento.

Na região normal de operação, correspondente a parte superior da curva SV, a margem de potência ($S_m - S_i$) possui valor positivo e pode ser interpretada como a quantidade de potência que poderia ser adicionada à potência injetada S_i para se atingir a estimativa máxima de potência S_m .

Na região anormal de operação, correspondente a parte inferior da curva SV, a margem de potência ($S_m - S_i$) possui valor negativo e pode ser interpretada como a

quantidade de potência que poderia ser retirada da potência injetada S_i para se atingir a estimativa máxima de potência S_m .

Portanto, uma margem em p.u., ou em percentual é definida, válida para o ponto de operação na região normal:

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_m} \right) = \left(1 - \frac{S_i}{S_m} \right) \text{ em pu} \quad (\text{A.28})$$

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_m} \right) = \left(1 - \frac{S_i}{S_m} \right) \times 100\% \text{ em \% de } S_m \quad (\text{A.29})$$

Quando o ponto de operação está na região anormal, a margem em pu, ou em percentual, é definida da seguinte forma:

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_i} \right) = \left(\frac{S_m}{S_i} - 1 \right) \text{ em pu} \quad (\text{A.30})$$

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_i} \right) = \left(\frac{S_m}{S_i} - 1 \right) \times 100\% \text{ em \% de } S_i \quad (\text{A.31})$$

No ponto de operação correspondente ao máximo carregamento, $(S_m - S_i)$ é nulo e, portanto, não há nada a adicionar ou retirar de S_i , pois esta é igual a máxima potência que pode ser atingida pela barra.

Para um sistema multi-nó, a partir da definição de margem para a região normal de operação, verifica-se que seu valor varia de +100% quando $S_i = 0$, até zero quando na fronteira e $S_m = S_i$. A partir deste ponto, adquire valores negativos na região anormal de operação até -100% quando $S_m = 0$. Nos casos em que $S_m < 0$, a margem continua a decrescer além de -100%, o que pode parecer sem sentido. Entretanto, para este sistema, uma situação crítica deste porte pode ocorrer numa certa barra sendo acompanhada por barras adjacentes. A solução é diminuir S_i em algumas destas barras para tentar melhorar as condições de operação até um ponto mais favorável, talvez até $S_m > 0$ e, na melhor das hipóteses, com $S_m > S_i$.

A.6 Índice de Influência

Na análise da segurança de tensão, o índice de influência, relacionado com os valores das margens de potência entre dois pontos de operação, é também utilizado. Este índice é definido como:

$$II_i = (\text{sinal } \beta) \cdot \left[\frac{M_{1_i}}{M_{0_i}} - 1 \right] \quad (\text{A.32})$$

A definição do índice também pode ser escrita como:

$$II_i = \frac{M_{1_i}}{M_{0_i}} - 1 \quad \text{quando } M_{0_i} > 0 \quad (\text{A.33})$$

$$II_i = 1 - \frac{M_{1_i}}{M_{0_i}} \quad \text{quando } M_{0_i} < 0 \quad (\text{A.34})$$

Considerando o ponto B da Figura A.5 como ponto de operação, uma ação de controle eficaz faz com que o ponto se desloque na direção de A, ou seja, a margem M_1 é maior do que a margem original M_0 e o índice II é positivo. Se a ação deteriora o sistema, o ponto de operação se aproxima de C, ou seja, a margem M_1 é menor do que a margem original M_0 e o índice II é negativo ($II = -1$ em C).

Considerando o ponto D da Figura A.5 como ponto de operação, uma ação de controle eficiente faz com que o ponto se desloque na direção de C, ou seja, a margem M_1 é maior (menos negativa) do que a margem original M_0 e o índice II é positivo ($II = +1$ em C). Se a ação deteriora o sistema, o ponto de operação se aproxima de E, ou seja, a margem M_1 é menor do que a margem original M_0 e o índice II é negativo.

Os valores dos índices S_m e β podem mudar abruptamente quando é perdido o controle de tensão numa barra perto da barra em análise. Não existe índice capaz de prever isto. Entretanto, como estes índices são projetados para a operação em tempo real, e a avaliação das condições de segurança de tensão é executada num curto

intervalo de tempo, o acompanhamento da evolução dos índices e da capacidade de controle de tensão é direto.

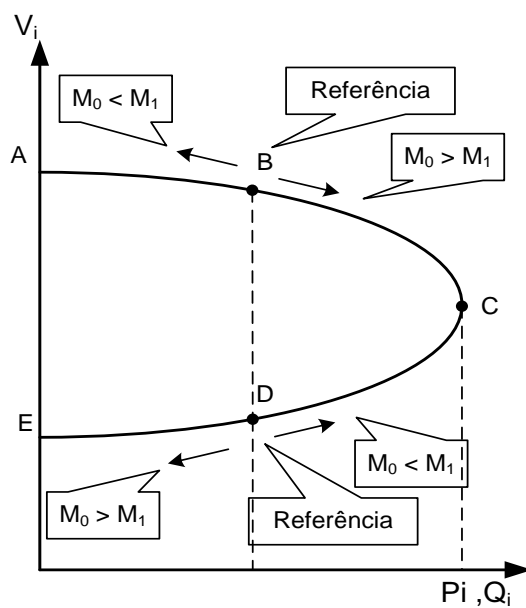


Figura A.5 - Curva SV para Análise do Índice de Influência

Apêndice B

Teoria de Grafos

B.1 Introdução

Os grafos são estudados desde 1736 quando Euler propôs um problema onde se empregou a representação e as propriedades desta ferramenta matemática. No entanto, até o fim do século XIX houve poucos trabalhos na área. Por exemplo, em 1847, Kirchhoff utilizou modelos de grafos no estudo de circuitos elétricos. Em 1857, Cayley utilizou grafos na química orgânica. Em 1859, Hamilton inventou um jogo que consistia na busca de um percurso fechado envolvendo todos os vértices de um dodecaedro regular, de tal modo que cada um deles fosse visitado uma única vez [34].

As idéias de estrutura e esquema geométrico aparecem com clareza na análise de diversos tipos de problemas. Baseados nestas observações, características comuns entre a sua estrutura e a teoria dos grafos, são identificadas. Os grafos, nos quais os pontos são interligados através de linhas, representam vários sistemas que envolvem relações binárias entre seus elementos. Dentre as aplicações possíveis, destacam-se sua utilização em redes de transporte, otimização de processo, redes de computadores, dentre outras.

Visualmente, o grafo é representado por um conjunto de vértices (ou nós), que correspondem aos pontos nos diagramas, e um conjunto de arestas (ou linhas), que são as ligações entre os vértices.

Um grafo pode ser não orientado (Figura B.1 (a)), onde as arestas não possuem uma ordem de vértices, e orientado (Figura B.1 (b)) quando existe uma ordenação imposta pelas arestas. O grafo não orientado representa uma relação simétrica, podendo também representar um grafo orientado, porém com arestas em ambos os sentidos.

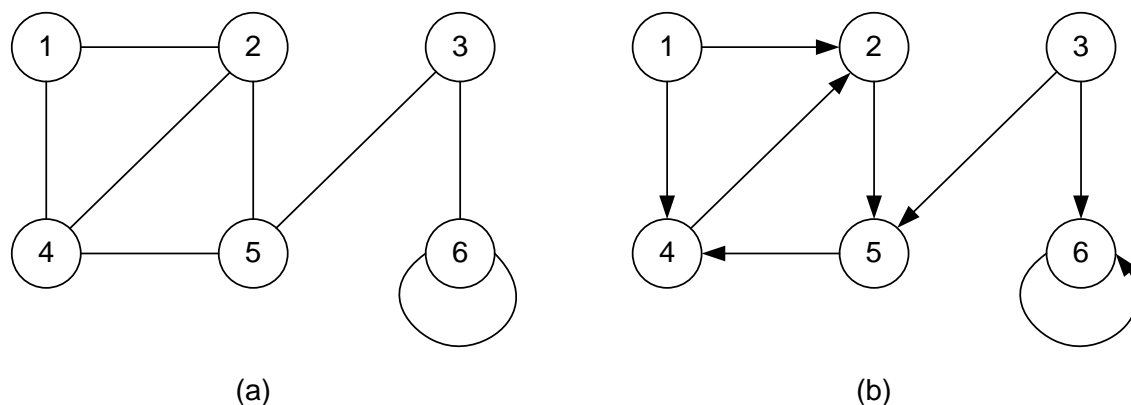


Figura B.1 - Tipos de Grafos

São apresentadas nessa seção métodos para representar grafos e realizar buscas, ou seja, visitar sistematicamente os vértices e arestas do grafo a partir de um objetivo pré-determinado. Os grafos podem ser representados de três formas distintas, a saber:

- i. Lista de Adjacências;
- ii. Matriz de Adjacências;
- iii. Matriz de Incidência.

Os métodos de busca existentes são:

- i. Busca em Largura;
- ii. Busca em Profundidade.

Este trabalho utiliza a representação de grafos por lista de adjacências e a busca é realizada através do método de busca em profundidade. Estes itens requerem maior atenção, já que possuem maior relevância para a perfeita compreensão do algoritmo desenvolvido. A abordagem dos demais é realizada para o enriquecimento do conhecimento do leitor e comparação com os métodos escolhidos para a solução do problema de busca de caminhos de transmissão.

B.2 Representação de Grafos

B.2.1 Lista de Adjacências

Um grafo pode ser descrito por sua estrutura de adjacências, isto é, através de uma lista que contém todos os vértices e os vértices adjacentes a cada um deles. A sua representação é uma maneira compacta de representar grafos esparsos. Desta forma, para cada vértice V , define-se uma lista de vértices W em que existe uma aresta de V para W .

Como na maioria das aplicações o grafo é orientado, como mostrado na Figura B.1 (b), a lista de adjacências não considera todas as ligações entre os vértices e somente são colocados nela aqueles que obedecem à direção determinada pelas arestas.

A Tabela B.1 mostra a lista de adjacências para o grafo não orientado da Figura B.1 (a), enquanto a Tabela B.2 mostra para o grafo orientado da Figura B.1 (b), que é a representação mais realizada na prática.

Tabela B.1 - Lista de Adjacências para o Grafo Não-Orientado

Nº do Vértice	1º Adjacente	2º Adjacente	3º Adjacente
1	2	4	-
2	1	4	5
3	5	6	-
4	1	2	5
5	2	3	4
6	3	6	-

Tabela B.2 - Lista de Adjacências para o Grafo Orientado

Nº do Vértice	1º Adjacente	2º Adjacente
1	2	4
2	5	-
3	5	6
4	2	-
5	4	-
6	6	-

Resumidamente, a maior vantagem da utilização desta representação consiste no uso da sua estrutura reduzida de armazenamento. Por outro lado, sua maior desvantagem é a recuperação indireta das arestas [35].

B.2.2 Matriz de Adjacências

A representação por matriz de adjacências é preferida em grafos pequenos e densos e necessitam que os vértices sejam numerados para identificá-los numa matriz de ordem $n \times n$, onde n indica o número de vértices existentes. Sua aplicação é válida para outros tipos de grafos, além dos abordados.

A matriz de adjacências pode ser representada por uma matriz booleana $A = [a_{ij}]$, onde a_{ij} representa a existência de aresta entre os vértices V_i e V_j . Logo, os elementos dessa matriz são definidos a seguir [35]:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se existe uma aresta entre } V_i \text{ e } V_j \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases}$$

Muitas vezes, as arestas paralelas são representadas com um número maior que 1. Porém, isso não é muito comum, pois o objetivo é saber as conexões existentes entre os vértices dos grafos e não a quantidade.

A Tabela B.3 mostra a matriz de adjacências para o grafo não orientado da Figura B.1 (a), enquanto a Tabela B.4 mostra para o grafo orientado da Figura B.1 (b).

Tabela B.3 - Matriz de Adjacências para o Grafo Não Orientado

	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	1	0	0
2	1	0	0	1	1	0
3	0	0	0	0	1	1
4	1	1	0	0	1	0
5	0	1	1	1	0	0
6	0	0	1	0	0	1

Tabela B.4 - Matriz de Adjacências para o Grafo Orientado

	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	1	0	0
2	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	1	1
4	0	1	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	1

Resumidamente, a vantagem nessa representação é a recuperação direta da aresta. Por outro lado, o armazenamento é n^2 (número de vértices ao quadrado), mesmo que o número de arestas seja inferior ao número de vértices.

B.2.3 Matriz de Incidências

A representação por matriz de incidência é utilizada com frequência para resolver problemas de otimização. Cada linha dessa matriz corresponde a um vértice e cada coluna a uma aresta. Portanto, pode-se representá-la por uma matriz $\mathbf{B} = [b_{ij}]$ de n vértices e m arestas, de ordem $n \times m$, definida como [35].

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se a aresta } a_j \text{ incide sobre o vértice } v_i \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases}$$

Se o grafo é orientado, então:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o vértice } v_i \text{ for a origem da aresta } a_j \\ -1 & \text{se o vértice } v_i \text{ for o destino da aresta } a_j \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases}$$

A Tabela B.5 mostra a matriz de incidências para o grafo não orientado da Figura B.1 (a), enquanto a Tabela B.6 mostra para o grafo orientado da Figura B.1 (b).

Tabela B.5 - Matriz de Incidências do Grafo Não Orientado

	(1,2)	(1,4)	(2,5)	(3,5)	(3,6)	(4,2)	(5,4)	(6,6)
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	0	0	1	0	0
3	0	0	0	1	1	0	0	0
4	0	1	0	0	0	1	1	0
5	0	0	1	1	0	0	1	0
6	0	0	0	0	1	0	0	0

Tabela B.6 - Matriz de Incidências do Grafo Orientado

	(1,2)	(1,4)	(2,5)	(3,5)	(3,6)	(4,2)	(5,4)	(6,6)
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	-1	0	1	0	0	-1	0	0
3	0	0	0	1	1	0	0	0
4	0	-1	0	0	0	1	-1	0
5	0	0	-1	-1	0	0	1	0
6	0	0	0	0	-1	0	0	0

B.3 Métodos de Busca em Grafos

B.3.1 Introdução

Os grafos, orientados ou não, são utilizados na solução de diversos problemas, tais como encontrar o menor caminho entre dois pontos distintos, ou a melhor rota, com a menor distância, entre diversos pontos. Outra possibilidade é utilizar a representação através de grafos para buscar um vértice específico ou um vértice que atenda a alguma característica específica. Por exemplo, efetuar uma busca num grafo que represente as cidades brasileiras, onde cada vértice corresponde ao respectivo número de habitantes das cidades, para encontrar aquelas com menos de 5.000 habitantes.

Existem basicamente dois tipos de busca em grafos: a busca em profundidade e a busca em largura.

B.3.2 Busca em Largura

Numa busca em largura a partir de um vértice qualquer V , todos os seus vizinhos são de são visitados antes de continuar a busca mais profundamente. Assim, o vértice V é chamado de raiz e a busca caminha por todos os vértices que podem ser alcançados a partir de V .

A busca em largura é feita começando no vértice V . Primeiramente, o algoritmo visita V e todos os seus vértices W conectados. No segundo passo, o algoritmo visita

todos os vértices conectados a W , isto é, os vértices que não estão conectados diretamente a V . O algoritmo prossegue deste modo até que todos os vértices alcançáveis sejam visitados. Resumidamente, o primeiro passo da busca em largura visita todos os vértices que estão a uma aresta de distância de V . O segundo passo visita os que estão a duas arestas de distância e assim por diante.

Para exemplificar a busca em largura, seja o grafo da Figura B.2.

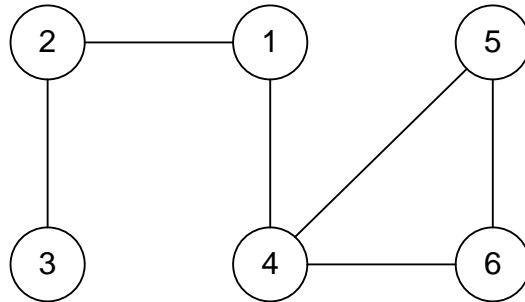


Figura B.2 - Grafo para Exemplo de Busca

O controle da busca é feito pintando cada vértice na cor branca, cinza ou preta. Inicialmente, todos os vértices estão com a cor branca e podem, mais tarde, se tornar cinza ou preto de acordo com a identificação abaixo:

- Cor branca: vértice não visitado;
- Cor cinza: vértice visitado;
- Cor preta: vértice visitado com seus nós adjacentes visitados.

Deste modo, quando um vértice é visitado pela primeira vez, sua cor é modificada de branco para cinza e, quando todos os seus vértices adjacentes são cinza (visitados), se torna preto [36]. A Figura B.3 mostra a seqüência para a busca em largura no grafo da Figura B.2.

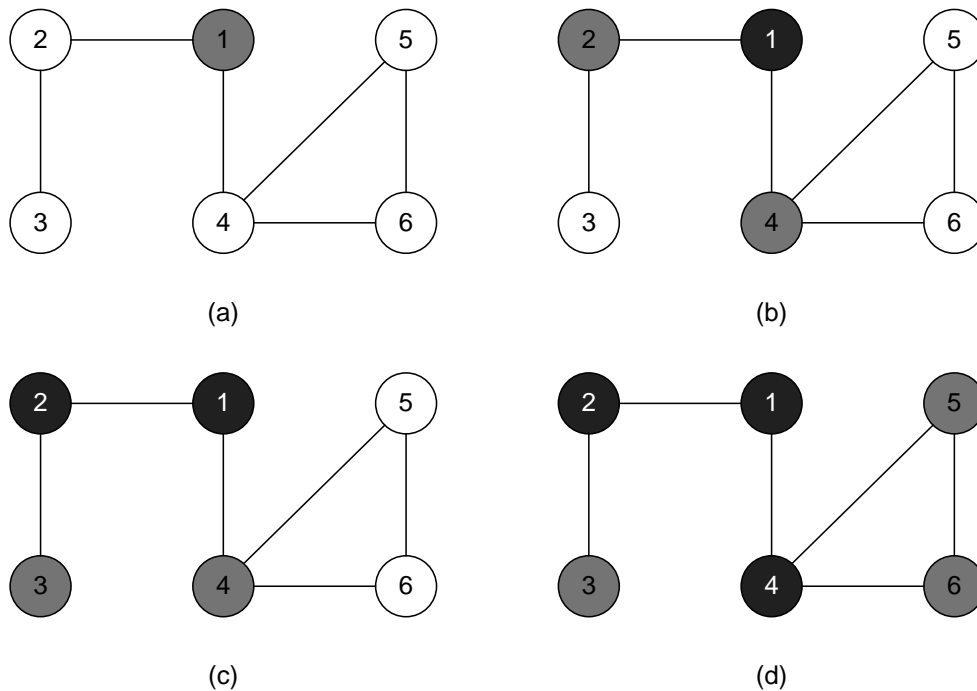


Figura B.3 - Busca em Largura

A busca em largura inicia-se pela raiz do grafo, isto é, o vértice 1, identificando-o com a cor cinza (Figura B.3(a)) para simbolizar que este é visitado. O próximo passo é identificar os seus vértices vizinhos. O algoritmo encontra os vértices 2 e 4 marcando-os também com a cor cinza (Figura B.3(b)).

Como todos os adjacentes ao 1 já estão identificados, finaliza-se a busca mudando a sua cor para preta. A partir de agora, o programa identifica todos os vértices vizinhos ao 2 e encontra 3 trocando a sua cor para cinza. Novamente, não existem outros adjacentes a 2. Logo a busca é finalizada e sua cor passa a ser preta (Figura B.3(c)).

A busca prossegue no vértice 4 e encontra os vértices 6 e 5 que são marcados com a cor cinza. Já que todos os adjacentes ao 4 são conhecidos, este é identificado com a cor preta (Figura B.3(d)). Neste ponto, o algoritmo termina sua busca, uma vez que os vértices 3, 5 e 6 não possuem outros adjacentes.

Desta forma, informações necessárias sobre a estrutura do sistema são armazenadas e os vértices pesquisados seguem uma ordem crescente conforme sua designação no grafo.

B.3.3 Busca em Profundidade

Uma busca em profundidade começa num vértice raiz V e caminha por todos os vértices que podem ser alcançados. Seja este vértice conectado a W por uma aresta $A(V,W)$. A busca marca V como visitado, considera um vértice W conectado e continua a busca pelo vértice seguinte e assim por diante. Depois que a busca neste vértice termina, o algoritmo toma outro vértice Z conectado a V ainda não visitado e faz a busca. O algoritmo termina quando todos os vértices ligados a V já são marcados (visitados). Para exemplificar a busca em profundidade, seja novamente o grafo da Figura B.2. O resultado é mostrado na Figura B.4.

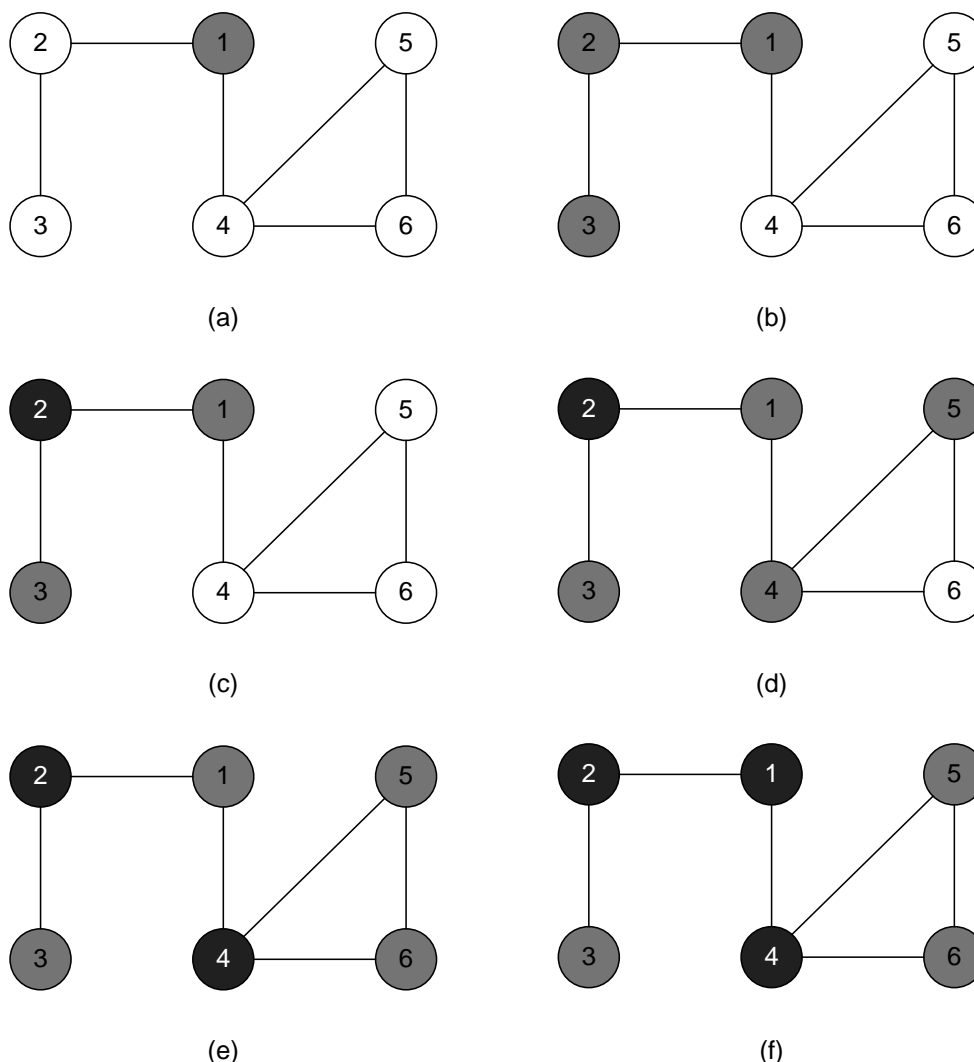


Figura B.4 - Busca em Profundidade

A busca em profundidade inicia-se pelo vértice 1, identificado com a cor cinza (Figura B.4 (a)). A partir daí, o algoritmo procura um vizinho, vértice 2, e prossegue até

o seguinte, vértice 3, (Figura B.4 (b)). Como no último não há vértices conectados, o algoritmo retorna ao nível anterior e verifica se existem adjacentes ao vértice 2. Como esse possui um adjacente visitado, é identificado com a cor preta para indicar que já está finalizado (Figura B.4 (c)).

O algoritmo sobe um nível e verifica que o vértice 1 possui o adjacente 4 como não visitado e o marca com a cor cinza. Neste instante, procura-se um vizinho a este e o vértice 5 é identificado e também marcado com a cor cinza (Figura B.4 (d)).

A busca retorna ao nível anterior e verifica que existe o vértice 6 ligado ao 4 ainda não visitado e o marca com a cor cinza. Como não há outros adjacentes ao 4, esse é marcado com a cor preta (Figura B.4 (e)).

De modo análogo, o algoritmo retorna ao vértice 1 e o marca com a cor preta, uma vez que todos os seus adjacentes já são conhecidos, encerrando o processo de busca em profundidade (Figura B.4 (f)).

Note que a busca só termina quando a raiz do grafo é finalizada ao contrário da busca em largura, onde a busca termina quando não há mais vértices conectados. A busca em profundidade é menos eficiente para encontrar o caminho mais próximo, porém é muito útil para analisar os caminhos entre uma raiz e outro vértice além de verificar a existência de ilhamento nos grafos.

REFERÊNCIAS

- [1] Kundur P. “Power System Stability and Control”. In: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [2] Prada R.B., Palomino E.G.C, Pilotto L.A.S e Bianco A. “Identificação do ramo de transmissão crítico para reforço das condições de segurança de tensão”. Revista Controle & Automação; vol17; nº.1; Janeiro, Fevereiro e Março 2006.
- [3] Pal M.K. “Voltage stability conditions considering load characteristics”, IEEE Transactions on Power Systems, vol.1, nº.1, pp.243-249, 1992.
- [4] Hong Y.Y. and Gau C. H. “Voltage stability indicator for identification of the weakest bus/area in power systems”, IEEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution. Vol 141, nº.4, pp.305-309, 1994.
- [5] Taylor C.W. “Power System Voltage Stability/EPRI-Power System Engineering Series”. In: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [6] Força Tarefa Colapso de Tensão. Critérios e metodologias estabelecidos no âmbito da Força Tarefa Colapso de Tensão do GTAD/SCEL/GCOI para estudos de estabilidade de tensão nos Sistemas Interligados Norte/Nordeste, Sul/Sudeste e Norte/Sul Brasileiros, XV SNPTEE, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 1998.
- [7] WSCC-Reactive Power Reserve Work Group. Final Report, Voltage Stability Criteria, Undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology, 1998.
- [8] Ajarapu V. e Christy. C. “The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, nº.1, pp. 416-423, 1992.
- [9] Bijwe P. R. e Tare. R. S. “An efficient continuation power flow method for voltage stability analysis”. Electric Machines and Power Systems, vol. 25, nº.1, pp. 927-938, 1997.
- [10]Alves D. A, da Silva L. C. P, Castro C. A. e da Costa V. F. “Continuation method parameterized by power losses”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, nº.1, pp. 763768, 2000.
- [11]Zhang X. P., Ju P. e Handschin E. “Continuation three-phase power flow: A tool for voltage stability analysis of unbalanced three-phase power systems”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, nº.3, pp. 1320-1329, 2005.
- [12]Cañizares C. A., Alvarado F. L., C. L. DeMarco, I. Dobson e W. F. Long. “Point of collapse methods applied to AC/DC power systems”. IEEE Transactions on Power Systems, vol 7, nº.2, pp. 673-683, 1992.
- [13]Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools. IEEE PES Power System Subcommittee Special Report, August 2002.
- [14]Kessel P., Glavtsh H., “Estimating the voltage stability of a power system”, IEEE Transactions on Power Systems, vol.1, nº.3, pp.346-354, 1986

- [15]Custsem T. V., “A method to compute reactive power margins with respect to voltage collapse”, IEEE Transactions on Power Systems, vol.6, n°.1, pp. 145-156, 1991.
- [16]Vega J.L.L. “Avaliação e reforço das condições de estabilidade de tensão em barras de tensão controlada por geradores e compensadores síncronos”. Proposta de Tese de Doutorado, PUC/Rio. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [17]Kimbark E.W. (1968). "Power System Stability, Synchronous Machines", Vol. III, Dover Publications.
- [18]Alves F. R. M, “Aplicação de Buscas Heurísticas ao Problema de Determinação de Rotas para Recomposição Fluente de Sistemas Elétricos de Potência”, Tese de Doutorado, UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [19]Cantarino M. “Análise de sensibilidade da margem de carregamento em sistemas elétricos de potência: Um estudo comparativo”, Dissertação de mestrado, UFJF. Juiz de Fora, Brasil, 2007.
- [20]Greene S., Dobson I. e Alvarado F.L., “Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, n° 1, pp. 262-272, 1997.
- [21]Greene S., Dobson I. e Alvarado F.L., “Contingency ranking for voltage collapse via sensitivities from a single nose curve”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, n° 1, pp. 232-240, 1999.
- [22]Flueck A. J., Gonella R. e Dondeti J. R., “A new power sensitivity method of ranking branch outage contingencies for voltage collapse”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, n° 2, pp. 265-270, 2002.
- [23]Djukanovic M. B., Khammash M. H. e Vittal V., “Sensitivity based structured singular value approach to stability robustness of power systems”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, n° 2, pp. 825-830, 2000.
- [24]Greene S., Dobson I. e Alvarado F.L., “Sensitivity of transfer capability margins with a fast formula”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, n° 1, pp. 34-40, 2002. [
- [25]Capitanescu F. e Cutsem T. V., “Preventive control of voltage security margins: A multicontingency sensitivity-based approach”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, n° 2, pp. 358-364, 2002.
- [26]Capitanescu F. e Cutsem T. V.. “Unified sensitivity analysis of unstable or low voltages caused by load increases or contingencies”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, n° 1, pp. 321-329, 2005.
- [27]Amjady N. e Esmaili M., “Application of a new sensitivity analysis framework for voltage contingency ranking”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, n° 2, pp. 973-983, 2005.
- [28]Monticelli A. J. “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica”, Ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1983.
- [29]Wood, A.J. e Wollenberg, B. F.. Power Generation Operation and Control. Second Edition, New York, John Wiley & Sons Inc., 1984.

- [30]Souza F., “Apresentação: Grafos – Algoritmos e Estruturas de Dados”, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Sistemas de Informação – 2º período.
- [31]Prada R.B., Palomino E.G.C, Pilotto L.A.S e Bianco A, “Voltage stability assessment for real time operation”, Proc. IEE Generation, Transmission and Distribution, vol. 149, nº. 2, pp 171-181, 2002.
- [32]Santos J.O.R, França R.F, Prada R. B, Ferreira L.C.A e Bianco A., “Índices e margens para avaliação da segurança de tensão na operação em tempo real”, 5th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission,, 2003.
- [33]Seelig B.H.T, “Índices de adequação das ações de controle de tensão para reforço das condições de segurança de tensão”, Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- [34]Netto P. O. B., “Grafos: Teoria, Modelos, Algoritmos”, 1ª. Edição, São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1996. v. 790. 405 p.
- [35]Mangili S. H., “Sistemas de Informação – Apostila de Matemática Discreta”, Faculdades Associadas de Santa Catarina, FASC - ENERGIA, Criciúma – SC, Brasil, 2007.
- [36]Camponogara E., “Apostila de Grafos e Algoritmos de Busca”, Departamento de Automação de Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis –SC, Brasil, 2007.