

Leroy Umasi Ramos

*DESVIO DE POTÊNCIA ATIVA PARA O  
REFORÇO DA SEGURANÇA DE  
TENSÃO*

Salvador - BA, Brasil

09 de Julho de 2010

Leroy Umasi Ramos

*DESVIO DE POTÊNCIA ATIVA PARA O  
REFORÇO DA SEGURANÇA DE  
TENSÃO*

Orientador:

Edgardo Guillermo Camacho Palomino

Co-orientador:

Fernando Augusto Moreira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFBA

Salvador - BA, Brasil

09 de Julho de 2010

## **Agradecimentos**

Ao CEPEL pela licença de uso dos programas computacionais ANAREDE e FLUPOT. À CNPq e à UFBA, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Muito especialmente, agradeço ao meus orientadores Edgardo Guillermo Camacho Palomino e Fernando Augusto Moreira pelo permanente apoio nas diferentes etapas do desenvolvimento nesta tese, por sua atenção e paciência na discussão dos diferentes aspectos relacionados ao tema de pesquisa e o apoio prestado durante toda a dissertação.

## Resumo

Problemas de segurança de tensão são originários do uso cada vez maior das linhas de transmissão existentes, na medida em que as redes de transmissão de energia elétrica ficaram mais malhadas, os limites térmicos de linhas e transformadores passaram a restringir menos a transmissão de potência. Similarmente, o uso de sistemas estáticos de compensação de potência reativa e estabilizadores na excitação dos geradores aumentou a capacidade de transmissão de potência nos sistemas antes limitados por problemas de estabilidade angular. Estes problemas associados a restrições ambientais e econômicas impedem a expansão da rede e hoje as linhas de transmissão estão mais carregadas e isto deu origem a um novo problema: Instabilidade de Tensão, e a capacidade de mantê-los estáveis sob o ponto de vista de tensão têm causado grande preocupação. A manutenção de níveis de segurança adequados contra problemas de estabilidade de tensão é hoje uma das principais preocupações das empresas de energia elétrica e dos pesquisadores na área de sistemas de potência.

Este trabalho apresenta uma metodologia capaz de calcular as ações de controle necessárias para aumentar a capacidade de transmissão, fortalecendo as condições de segurança de tensão, uma vez detectado que isto é necessário. Embora não se procure um ponto ótimo, a idéia é usar a direção de movimento obtida por um algoritmo de otimização para mover o ponto de operação para uma região onde a estabilidade de tensão esteja mais robusta, aumentando portanto, a capacidade de transmissão, e diminuindo o risco de colapso.

Para o propósito citado, utiliza-se a função objetivo Desvio de Potência Ativa para desta forma, reforçar as condições de operação (estabilidade) do sistema. Novos valores de geração de potência ativa são calculados de tal forma a minimizar o somatório dos quadrados dos desvios em relação aos valores de geração de potência ativa fornecidos nos dados da rede elétrica. Esta opção é importante no caso brasileiro com predominância hidrelétrica, pois o despacho de potência ativa nas usinas pode ter sido calculado previamente segundo outros critérios como a otimização da operação dos reservatórios. Os resultados obtidos foram satisfatórios quanto à metodologia proposta com exemplos numéricos que ilustram a adequação deste método para o problema do reforço das condições de segurança de tensão.

## Palavras Chave

Segurança de tensão, estabilidade de tensão, controle de tensão, colapso de tensão, barras de tensão controlada, gerador síncrono, compensador síncrono.

## **Abstract**

Voltage security problems originate from the increased use of existing transmission lines, to the extent that networks of electric power transmission became more spotted, the thermal limits on lines and transformers have started to restrict little the power transmission. Similarly, the use of static systems for reactive power compensation and stabilizers in the excitement of the generators has increased the capacity of power transmission systems that were formerly limited by problems of angle stability. These problems associated with environmental and economic constraints. Maintaining adequate levels of security against problems of voltage stability is now a major focus of energy companies and researchers in the field of power systems.

This paper presents a method capable of calculating the control actions needed to increase the transmission capacity, strengthening the safety conditions of stress. Although not seek an optimal point, the idea is to use the direction of motion obtained by an optimization algorithm to move the operating point for a region where the voltage stability is more robust, thus increasing the transmission capacity and decreasing the risk of collapse.

For the purpose above, we use the objective function for Active Power Deviation thereby enhancing the operating conditions (stability) of the system. New values of active power generation are calculated so as to minimize the sum of squared deviations from the values of active power generation provided in the data grid. This option is important in the case of Brazil with predominantly hydroelectric. The results were satisfactory as the proposed methodology with numerical examples that illustrate the suitability of this method to the problem of strengthening of security conditions of stress.

## **Keywords**

Voltage security, voltage stability, voltage control, voltage collapse, voltage-controlled buses, synchronous generator, synchronous compensator, voltage control sensitivity.

## Simbologia

$p.u.$	Sistema em por unidade;
$n$	Número de barras do sistema;
$s$	Elemento representativo das fases $a$ , $b$ e $c$ do sistema;
$h$	Contador de iterações;
$r + jx$	Impedância do ramo $k-m$ ;
$P_G$	Potência ativa gerada;
$Q_G$	Potência reativa gerada;
$P_L$	Potência ativa demandada;
$Q_L$	Potência reativa demandada;
$S_{calc}$	Potência aparente calculada;
$P_k$	Potência ativa líquida na barra $k$ ;
$Q_k$	Potência reativa líquida na barra $k$ ;
$\Delta P_k$	Resíduo de potência reativa líquida na barra $k$ ;
$\Delta Q_k$	Resíduo de potência reativa líquida na barra $k$ ;
$V_{rk}$	Componente real da tensão na barra $k$ ;
$V_{mk}$	Componente imaginária da tensão na barra $k$ ;
$\Delta V_{rk}$	Correção da componente real da tensão na barra $k$ ;
$\Delta V_{mk}$	Correção da componente imaginária da tensão na barra $k$ ;

$Y_{km}$	Elemento $(k-m)$ da matriz admitância nodal $Y_{km} = G_{km} + jB_{km}$ ;
$Y$	Matriz admitância nodal;
$\theta_k$	Ângulo da tensão na barra $k$ ;
$\Delta\theta_k$	Correção do ângulo da tensão na barra $k$ ;
$Z_{km}$	Elemento $(k-m)$ da matriz impedância de barras;
$Y_{sh}^{abc}$	Matriz de admitância shunt nas fases $a$ , $b$ e $c$ ;
$b_{sh}^{km}$	b Susceptância shunt total do ramo $k-m$ ;
$y_{km}$	Admitância do ramo $k-m$ ;
$I_k^{abc}$	Corrente elétrica elétrica injetada na barra $k$ ;
$I_{rk}^{abc}$	Componente real da corrente elétrica injetada na barra $k$ , fases $a$ , $b$ e $c$ ;
$I_{mk}^{abc}$	Componente imaginária da corrente elétrica injetada na barra $k$ , fases $a$ , $b$ e $c$ ;
$\Delta I_{rk}^{abc}$	Resíduo da comp. real da corrente elétrica injetada na barra $k$ , fases $a$ , $b$ e $c$ ;
$\Delta I_{mk}^{abc}$	Resíduo da comp. imaginária da corrente elétrica injetada na barra $k$ , fases $a$ , $b$ e $c$ ;
$P_{calc}^{abc}$	Potência ativa calculada para a barra $k$ , fases $a$ , $b$ e $c$ ;
$Q_{calc}^{abc}$	Potência reativa calculada para a barra $k$ , fases $a$ , $b$ e $c$ ;
$P_{esp}^{abc}$	Potência ativa especificada na barra $k$ , fases $a$ , $b$ e $c$ ;
$Q_{esp}^{abc}$	Potência reativa especificada na barra $k$ , fases $a$ , $b$ e $c$ ;

$\alpha_p$	Conjunto das fases $a$ , $b$ e $c$ ;
$\Omega_k$	Conjunto de barras adjacentes à barra $k$ , incluindo a própria barra $k$ ;
$E_k^s$	Fasor tensão na barra $k$ , fase $s$ ;
<i>source</i>	Barra de geração no início do caminho de transmissão;
<i>sink</i>	Barra de carga no fim do caminho de transmissão;
<i>generation</i>	Barra de geração intermediária;
<i>load</i>	Barra de carga intermediária;
<i>node</i>	Barra, é adicionada às palavras <i>source</i> , <i>sink</i> , <i>generation</i> e <i>load</i> ;

As matrizes serão apresentadas em **negrito itálico** e os vetores em **negrito itálico sublinhado**



# *Sumário*

<b>Lista de Figuras</b>	p. xii
<b>Lista de Tabelas</b>	p. xvi
<b>1 Introdução</b>	p. 1
1.1 Considerações Gerais . . . . .	p. 1
1.2 Principais Contribuições do Trabalho . . . . .	p. 2
1.3 Objetivos do trabalho . . . . .	p. 3
1.3.1 Objetivo Geral . . . . .	p. 3
1.3.2 Objetivos Específicos . . . . .	p. 3
1.4 Publicações Decorrentes do Trabalho . . . . .	p. 4
1.5 Organização do Texto . . . . .	p. 4
<b>2 Caracterização do Fenômeno da Estabilidade de Tensão</b>	p. 6
2.1 Critérios de Estabilidade . . . . .	p. 6
2.1.1 Estabilidade Angular . . . . .	p. 8
2.1.1.1 Perturbação pequena . . . . .	p. 10
2.1.1.2 Estabilidade Transitória . . . . .	p. 10

2.1.2	Estabilidade de Frequência . . . . .	p. 11
2.1.3	Estabilidade de Tensão . . . . .	p. 12
2.1.3.1	Fatores de Influência . . . . .	p. 13
2.1.3.2	Mecanismo da Perda da Estabilidade de Tensão . . . . .	p. 16
2.2	Relação entre Estabilidade de Tensão e Estabilidade Angular . . . . .	p. 17
2.3	Caracterização do fenômeno da Estabilidade de Tensão e Índices para Avaliação . . . . .	p. 18
2.4	Análise Nodal . . . . .	p. 27
2.4.1	Sistema de Duas Barras . . . . .	p. 27
2.4.1.1	Sistemas Multi-Nó . . . . .	p. 32
<b>3</b>	<b>Índices para Avaliação Nodal do carregamento da Rede de Transmissão</b>	p. 34
3.1	Magnitude do Determinante da Matriz [ D' ] . . . . .	p. 34
3.2	Sinal do Determinante da Matriz [ D' ] . . . . .	p. 38
3.3	Margem de Potência . . . . .	p. 41
3.4	Avaliação do Sistema Teste de 5 Barras e Visualização dos Índices Resultantes . . . . .	p. 42
<b>4</b>	<b>Caminhos de Transmissão Crítico</b>	p. 45
4.1	Introdução . . . . .	p. 45
4.2	Transformação do Sistema Multi-nó . . . . .	p. 46
4.2.1	Equivalente 1 . . . . .	p. 47

4.2.2	Equivalente 2 . . . . .	p. 49
4.2.3	Equivalente 3 . . . . .	p. 50
4.3	Eliminação de Barras Intermediárias . . . . .	p. 57
4.4	Identificação do Caminho de Transmissão Mais Carregado . . . . .	p. 59
4.5	Identificação do Ramo de Transmissão Crítico . . . . .	p. 59
4.6	Aplicação . . . . .	p. 60
4.7	Identificação da Sub-Rede e do Caminho Mais Carregado . . . . .	p. 61
4.8	Determinação do Ramo Crítico . . . . .	p. 61
<b>5</b>	<b>Fatores de Participação</b>	p. 64
5.1	Domínio de um determinado gerador . . . . .	p. 67
5.2	Identificação de Geradores . . . . .	p. 67
5.3	Caminhos de Transmissão . . . . .	p. 69
5.4	Procedimento para calcular os fatores de participação . . . . .	p. 72
<b>6</b>	<b>Metodologia de Reforço da Segurança de Tensão em Barras de Carga</b>	p. 73
6.1	Aplicação no Sistema Teste - 5 Barras . . . . .	p. 75
6.1.1	Descrição . . . . .	p. 76
6.1.2	Caso Base . . . . .	p. 76
6.1.3	Etapa I de Reforço (Potência Reativa) . . . . .	p. 77
6.1.4	Etapa II de Reforço . . . . .	p. 78

6.1.4.1	Potência Ativa - I . . . . .	p. 78
6.1.4.2	Potência Ativa - II . . . . .	p. 81
6.2	Aplicação no Sistema Teste - 34 Barras . . . . .	p. 86
6.2.1	Descrição . . . . .	p. 86
6.2.2	Etapa I de Reforço (Potência Reativa) . . . . .	p. 90
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	p. 99
7.1	Conclusões finais e desenvolvimentos futuros. . . . .	p. 99
7.2	Desenvolvimentos futuros . . . . .	p. 101
	<b>Referências</b>	p. 102
	<b>Apêndice A – Subsistemas, caminhos e subcaminhos do sistema teste de 5 barras</b>	p. 105
	<b>Apêndice B – Capítulo Subsistemas, caminhos e subcaminhos do sistema IEEE 24</b>	p. 107
	<b>Apêndice C – Capítulo Subsistemas, caminhos e subcaminhos do sistema S34</b>	p. 113

## *Lista de Figuras*

1	Sistema - Estabilidade de Sistemas de Potência . . . . .	p. 8
2	Gerador - Grande Sistema . . . . .	p. 17
3	Grande Sistema - Carga . . . . .	p. 17
4	Sistema - Teste de Duas Barras . . . . .	p. 18
5	Lugar Geométrico da Tensão na Carga para Todos os Níveis de Potência Ativa Constante e Para Alguns Níveis de Potência Reativa Constante . . . . .	p. 21
6	Gráfico $V \times \theta$ com o Lugar Geométrico da Tensão na Carga para $P$ Constante, $Q$ constante, $P$ & $Q$ para $\phi$ constante . . . . .	p. 22
7	Curva $P_{ik} \times V_i$ Referente ao Sistema de Duas Barras da Figura 4 . . . . .	p. 23
8	Sistema de Duas Barras com Capacitor na Barra de Carga . . . . .	p. 24
9	Curvas $P_{ik} \times V_i$ Antes e Depois da Instalação do Capacitor na Barra de Carga . . . . .	p. 25
10	Relação entre $V_i$ e $P_{ik}$ para diferentes fatores de potência . . . . .	p. 26
11	Curvas $V_i \times j_i$ para $P_{ik}$ e $Q_{ik}$ constantes . . . . .	p. 28
12	Curvas $V_i \times j_i$ para $P_{ik}$ e $Q_{ik}$ constantes, considerando a máxima potência transferida da barra $i$ para a barra $k$ . . . . .	p. 29

13	Fronteira F entre “Região A” e “Região B” Cruzando os Pontos de Carga Máximas Curvas $R_i$ de Carga Variável e Fator de Potência Constante. . . . .	p. 30
14	Localização dos Vetores Gradientes de $P_i$ e $Q_i$ no Plano $V \times j$ . . . .	p. 40
15	Sinal da Margem na Curva $V \times P, Q$ . . . . .	p. 42
16	Sistema-Teste de 5 Barras, Caso base . . . . .	p. 42
17	Equivalente de Duas Barras Assumindo Iguais as Tensões Internas dos Geradores . . . . .	p. 48
18	Equivalente de Duas Barras Mantendo a Individualidade dos Geradores . . . . .	p. 50
19	Equivalente de Duas Barras Mantendo a Individualidade dos Geradores e dos Caminhos de Transmissão . . . . .	p. 51
20	Sistema-Teste IEEE 24 Barras e a Direção dos Fluxos de Potência Ativa . . . . .	p. 52
21	Subsistema de Transmissão de Potência Ativa para Alimentar a Barra 6 . . . . .	p. 53
22	Alguns Caminhos de Transmissão de Potência Ativa para a Barra 6	p. 55
23	Redução de um Caminho de Transmissão a um Equivalente de Duas Barras . . . . .	p. 56
24	Tipos de barras . . . . .	p. 66
25	Sistema 4 Barras . . . . .	p. 66
26	Caminhos de Transmissão – Sistema de 5 Barras . . . . .	p. 69
27	Sistema IEEE 24 Barras, Caso base . . . . .	p. 75

28	Evolução da margem de potência no Sistema Teste de 5 barras . . .	p. 85
29	Evolução dos fatores de participação na Barra 5 do Sistema Teste de 5 barras . . . . .	p. 85
30	Evolução das perdas de potência reativa no Sistema Teste de 5 barras	p. 86
31	Sistema Brasileiro de 34 Barras, Caso base . . . . .	p. 87
32	Evolução da margem de potência no Sistema Teste de 5 barras . . .	p. 96
33	Evolução dos fatores de participação na Barra 5 do Sistema Teste de 5 barras . . . . .	p. 97
34	Evolução das perdas de potência reativa no Sistema Teste de 5 barras	p. 97
35	Sistema S5 . . . . .	p. 105
36	Caminho 1-3-5, Sistema S5 . . . . .	p. 106
37	Caminho 2-4-5, Sistema S5 . . . . .	p. 106
38	Caminho 1-3-4-5, Sistema S5 . . . . .	p. 106
39	Subsistema I – Sistema de 5 Barras . . . . .	p. 106
40	Sistema IEEE24 . . . . .	p. 107
41	Subsistema I - Sistema IEEE24 . . . . .	p. 108
42	Subsistema II - Sistema IEEE24 . . . . .	p. 108
43	Subsistema III - Sistema IEEE24 . . . . .	p. 109
44	Subsistema III - Sistema IEEE24 . . . . .	p. 109
45	Sistema Brasileiro S-34 . . . . .	p. 113
46	Subsistema I - Sistema Brasileiro S-34 . . . . .	p. 114

47	Subsistema II - Sistema Brasileiro S-34 . . . . .	p.114
48	Subsistema III - Sistema Brasileiro S-34 . . . . .	p.115



## *Lista de Tabelas*

1	Dados de Barra do Sistema–Teste de 5 Barras . . . . .	p. 43
2	Dados de Linha do Sistema–Teste de 5 Barras . . . . .	p. 43
3	Dados de Barra do Sistema – Teste de 5 Barras . . . . .	p. 43
4	Fluxos de Potência nas Linhas / Caso–Base . . . . .	p. 43
5	Relatório de segurança de Tensão do Caso - Base . . . . .	p. 44
6	Dados de Barra do Sistema Brasileiro Simplificado de 34 Barras . .	p. 54
7	Dados de Linha do Sistema Brasileiro Simplificado de 34 barras . .	p. 55
8	Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 6. . . . .	p. 57
9	Determinação dos Caminhos Mais Carregados de Transmissão para a Barra 5 . . . . .	p. 62
10	Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Mais Carregado de Transmissão para a Barra 5 . . . . .	p. 63
11	Participação de Geradores nos Ramos do Sistema–Teste de 5 Barras	p. 70
12	Fatores de Participação de Geradores nos Ramos do Sistema–Teste de 5 Barras . . . . .	p. 71
13	Relatório de segurança de Tensão do Caso - Base . . . . .	p. 77
14	Fatores de Participação Caso - Base . . . . .	p. 77

15	Fluxos de Potência nas Linhas apos a Etapa I . . . . .	p. 78
16	Relatório de segurança de Tensão apos a Etapa I . . . . .	p. 78
17	Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão para o Ponto de Operação após a Etapa I de Reforço . . . . .	p. 79
18	Fatores de Participação nas linhas e barras do Sistema de 5 barras apos a Etapa I . . . . .	p. 80
19	Relatório de segurança de Tensão / Etapa II (P. Ativa I) . . . . .	p. 81
20	Fluxos de Potência nas Linhas / Etapa I (P. Ativa I) . . . . .	p. 81
21	Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão para o Ponto de Operação após a Etapa II (P. Ativa I) de Reforço . . . . .	p. 82
22	Fatores de Participação nas linhas e barras do Sistema de 5 barras apos a Etapa II (P. Ativa I) . . . . .	p. 82
23	Fluxos de Potência nas Linhas / Etapa II (P. Ativa II) . . . . .	p. 83
24	Relatório de segurança de Tensão da Etapa II (P. Ativa II) . . . . .	p. 83
25	Fatores de Participação nas linhas e barras do Sistema de 5 barras apos a Etapa II (P. Ativa II) . . . . .	p. 84
26	Evolução do Reforço da segurança de tensão em barras de carga Sistema 5b . . . . .	p. 84
27	Dados de Barra do Sistema Brasileiro Simplificado de 34 Barras . . .	p. 88
29	Dados de Linha do Sistema Brasileiro Simplificado de 34 barras . . .	p. 89
31	Relatório de segurança de Tensão do Caso - Base . . . . .	p. 90
33	Dados de Barra do Sistema Brasileiro Simplificado de 34 Barras . . .	p. 91
35	Fatores de Participação do Sistema Brasileiro de 34 Barras . . . . .	p. 93

37	Relatório de segurança de Tensão do Caso - Base . . . . .	p.94
39	Fatores de Participação do Sistema Brasileiro de 34 Barras . . . . .	p.95
41	Evolução do Reforço da segurança de tensão em barras de carga Sistema 5b . . . . .	p.96
42	Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 4. . . . .	p.105
43	Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 4. . . . .	p.110
44	Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 5. . . . .	p.111
45	Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 6. . . . .	p.111
46	Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 6. . . . .	p.112
47	Potência de chegada descontando as perdas nas linhas de transmissão.p.	116
49	Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 4. . . . .	p.116
50	Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 5. . . . .	p.117
51	Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 6. . . . .	p.117

# 1 *Introdução*

## 1.1 *Considerações Gerais*

Na medida em que as redes de transmissão de energia elétrica ficaram mais malhadas, os limites térmicos de linhas e transformadores passaram a restringir menos a transmissão de potência. Similarmente, o uso de sistemas estáticos de compensação de potência reativa e estabilizadores na excitação dos geradores aumentou a capacidade de transmissão de potência nos sistemas antes limitados por problemas de estabilidade angular. Hoje as linhas de transmissão estão mais carregadas e isto deu origem a um novo problema: Instabilidade de Tensão. O risco de ocorrência de um colapso de tensão se torna iminente na medida que as restrições de ordem econômica e ambientais vêm limitando o investimento em novas linhas de transmissão. Restou como opção o reforço da capacidade de transmissão da rede durante a operação do sistema.

O carregamento da rede de transmissão pode ser avaliado por condições nodais associadas ao máximo fluxo de potência ativa e reativa que pode ser transmitida dos geradores para as cargas. Índices abrangentes e significativos podem ser obtidos a partir da matriz Jacobianos do sistema. Isto é, os índices podem indicar a região de operação na curva  $V \times [P, Q]$ , a importância relativa entre as barras, a qual é de dificuldade de transmissão, a margem em MVA para o máximo carregamento, dentre outros. Quando o método de avaliação detecta a proximidade do colapso de tensão

é necessário o estabelecimento de ações de controle para afastar o ponto de operação desta situação, aumentando a capacidade de transmissão.

Neste trabalho busca-se uma metodologia capaz de determinar as ações de controle necessárias para aumentar a capacidade de transmissão, fortalecendo as condições de segurança de tensão, uma vez detectado que isto é necessário. Embora não se procure um ponto ótimo, a idéia é usar a direção de movimento obtida por um algoritmo de otimização para mover o ponto de operação para uma região onde a segurança de tensão esteja mais robusta, aumentando portanto, a capacidade de transmissão, e diminuindo o risco de colapso.

Problemas de segurança de tensão são originários do uso cada vez maior das linhas de transmissão existentes, o que se tornam possível através da instalação de compensação de potência reativa [21]. A estabilidade de tensão é um problema de estabilidade inerente aos sistemas dinâmicos quando a rede de transmissão está operando muito carregada. Parece óbvio que a habilidade em manter a estabilidade de tensão depende de ferramentas capazes de avaliar as condições de carregamento da rede.

## 1.2 Principais Contribuições do Trabalho

Como principais contribuições do trabalho destacam-se:

- O desenvolvimento e a implementação de uma nova metodologia para a o cálculo dos fatores de participação dos geradores nas cargas;
- O estudo comparativo dentre as diversas alternativas de reforço utilizando a metodologia dos fatores de participação e o índice  $\Delta_{fp}$ ;
- Avaliação da metodologia de reforço da segurança de tensão com Desvio Mínimo de Potência Ativa de acordo as alternativas apresentadas pelo índice  $\Delta_{fp}$ ;

- O desenvolvimento de metodologias para a identificação da pior barra, pior ramo, pior caminho a través da margem de potência.

## 1.3 Objetivos do trabalho

### 1.3.1 Objetivo Geral

A qualidade de energia esta ameaçada quando se refere à tensão, na medida em que o uso de sistemas estáticos de compensação de potência reativa e estabilizadores na excitação dos geradores aumentou a capacidade de transmissão de potência nos sistemas antes limitados por problemas de estabilidade angular. Similarmente na medida em que as redes de transmissão de energia elétrica ficaram mais malhadas, os limites térmicos de linhas e transformadores passaram a restringir menos a transmissão de potência. Atualmente as linhas de transmissão estão mais carregadas e isto deu origem ao problema de instabilidade de tensão, e a capacidade de mantê-las estáveis sob o ponto de vista de tensão tem causado grande preocupação.

O objetivo deste projeto é estabelecer uma metodologia capaz de calcular as ações de controle necessárias para reforçar a segurança de tensão, uma vez detectado que isto é necessário. Embora não se procure um ponto ótimo, a idéia é usar a direção de movimento obtida por um algoritmo de otimização para mover o ponto de operação para uma região onde a tensão esteja mais robusta, aumentando portanto, a capacidade de transmissão, e diminuindo o risco de colapso.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Estabelecer estratégias para o reforço da segurança de tensão.
- Determinação dos ramos críticos da rede elétrica.

- Determinação da participação dos geradores no carregamento da rede elétrica.
- Avaliação da metodologia de reforço da segurança de tensão com desvio mínimo de potência ativa.
- Comparação com outra(s) metodologias existentes

## 1.4 Publicações Decorrentes do Trabalho

- Palomino, E.G.C., Umasi, L., Moreira F.A., Ferreira, N., *Identificação de Geradores Participantes no Carregamento dos Sistemas Elétricos*. XVII Congresso Brasileiro de Automática, 2008, Juiz de Fora. CBA 2008, 2008.
- Palomino, E.G.C., Umasi, L., Moreira F.A., Ferreira, N., *Identificación de Generadores Participantes en las Cargas de los Sistemas Eléctricos*. XVII Congreso Internacional de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Sistemas INTERCON 2008, 2008, Trujillo - Perú. Intercon 2008, 2008.

## 1.5 Organização do Texto

No Capítulo 2 é mostrada a modelagem dos componentes para sistemas trifásicos e são feitas algumas considerações iniciais. Além disso, apresentam-se as expansões dos métodos de solução do fluxo de potência polar e retangular para sistemas de distribuição trifásicos com a descrição das equações básicas e algoritmos de solução. Para método de solução retangular são apresentadas duas propostas em função da presença de barras do tipo PV, uma delas utilizando a correção de potência reativa gerada nestas barras.

No capítulo 3 são analisados os Índices para Avaliação Nodal do carregamento da Rede de Transmissão, Magnitude e Sinal do Determinante da Matriz  $[D']$ , Margem

de Potencia. Exemplos numéricos ilustrativos com o sistema teste de 5 barras e o sistema brasileiro são apresentados.

No capítulo 4 explica-se a metodologia para a Transformação do Sistema Multi-nó, o cálculo e identificação dos Caminhos de Transmissão Crítico, do Caminho de Transmissão Mais Carregado e o Ramo de Transmissão Crítico

No capítulo 5 é mostrada a metodologia do cálculo dos Fatores de Participação dos geradores nas barras de carga.

No capítulo 6 é mostrada a metodologia de Reforço da Segurança de Tensão em Barras de Carga com Desvio Mínimo de Potência Ativa no gerador com maior participação na barra crítica, e logo é explicada em forma detalhada a aplicação no sistema Teste - 5 Barras e também em forma resumida no sistema brasileiro.

No Capítulo 7 apresentam-se as conclusões finais identificando-se as principais contribuições deste trabalho, logo estão as referências bibliográficas.



## 2 *Caracterização do Fenômeno da Estabilidade de Tensão*

### 2.1 Critérios de Estabilidade

*Confiabilidade* de um sistema de potência refere-se à probabilidade de o seu funcionamento satisfatório, em longo prazo. Ela denota a capacidade de fornecimento do serviço elétrico adequado de forma quase contínua, com poucas interrupções durante um período de tempo prolongado. *Segurança* de um sistema de poder se refere ao grau de risco em sua capacidade de sobreviver distúrbios iminentes (emergência), sem interrupção do serviço ao cliente. Relaciona-se com a robustez do sistema às perturbações iminentes e, portanto, depende da condição do sistema operacional, bem como a probabilidade de contingência de distúrbios. *Estabilidade* de um sistema de energia refere-se à continuidade da operação intacta após uma perturbação. Depende da condição de funcionamento e da natureza do distúrbio físico [12].

Estabilidade de um sistema de potência é a capacidade de um sistema elétrico de potência, para uma determinada condição de operação inicial, de recuperar um estado de equilíbrio operacional após ter sido submetido a uma perturbação física, com a maioria das variáveis do sistema com valores delimitados de modo que praticamente todo o sistema continua intacto[12].

A estabilidade de um sistema de potência foi reconhecida como um problema im-

portante para o funcionamento seguro do sistema a partir de 1920s. Muitos grandes apagões causados pela instabilidade do sistema de potência demonstraram a importância desse fenômeno. Historicamente, a instabilidade transitória tem sido o problema da estabilidade dominante na maioria dos sistemas, e tem sido foco de muita atenção da indústria sobre a estabilidade do sistema. Além dos aspectos relacionados à segurança e à confiabilidade, o crescimento contínuo da demanda, o aumento das interligações, o maior uso de novas tecnologias e sistemas de controle e a distância das usinas aos centros de consumo, têm contribuído para a complexidade da operação dos sistemas elétricos e as diferentes formas de instabilidade do sistema têm surgido. Por exemplo, a estabilidade de tensão, estabilidade de frequência e oscilações tornaram-se preocupações maiores do que no passado. Isso criou uma necessidade de rever a definição e classificação da estabilidade do sistema de energia. Um entendimento claro dos diferentes tipos de instabilidade e de como eles estão inter-relacionadas é essencial para a concepção e funcionamento satisfatório de sistemas de potência. Como assim, o uso consistente da terminologia é necessário para o desenvolvimento de projeto de sistema operacional e critérios, a norma ferramentas analíticas e procedimentos do estudo[11, 12].

Assim, os estudos da dinâmica dos sistemas de potência podem se dividir em três tipos: estabilidade angular, estabilidade de tensão e estabilidade de frequência. O primeiro está relacionado com a manutenção do sincronismo entre as máquinas; o segundo com os fenômenos não lineares que podem ocorrer na evolução do processo dinâmico e o terceiro se refere a capacidade de um sistema de potência manter a frequência em valores permissíveis, após ser submetido a um desequilíbrio severo de carga e geração, com um mínimo de corte de carga. Nestes estudos são válidas algumas aproximações como desprezar os efeitos transitórios, que são muito rápidos quando comparados com as frequências naturais de oscilação dos rotores das máquinas síncronas, cuja inércia não permite que a frequência do sistema excursionsse muito além do seu valor nominal.[11]

Em resumo, a estabilidade em sistemas de potência pode ter diferentes formas e ser influenciada por uma ampla gama de fatores e o desempenho dinâmico por uma diversidade de mecanismos com características e classes de respostas diferentes. Assim, a classificação da estabilidade em categorias facilita a análise dos problemas de estabilidade, na medida que incluem a identificação de fatores essenciais que contribuem para o processo de instabilidade. Esta classificação pode ser visualizada na Figura 1 a seguir, onde a natureza, o tipo de impacto e o tempo de resposta e de interesse para as análises são considerados [12].

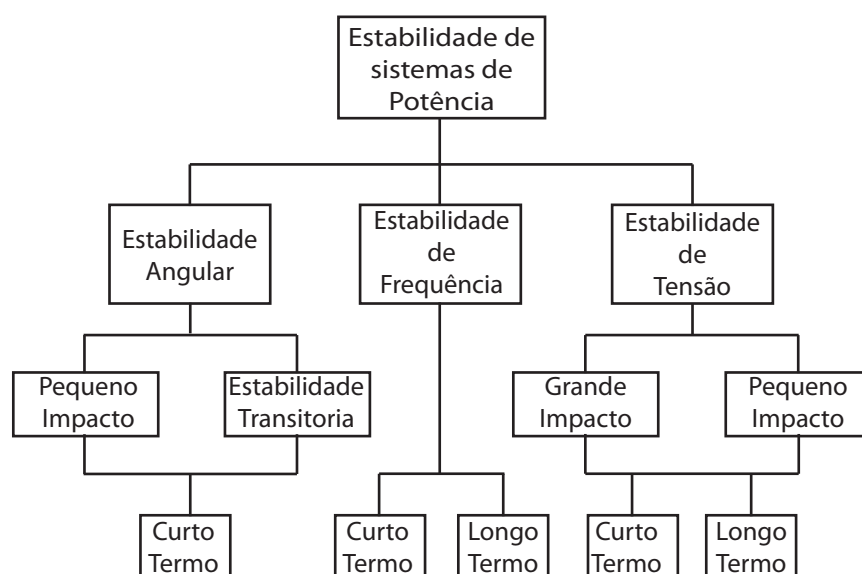


Figura 1: Sistema - Estabilidade de Sistemas de Potência

### 2.1.1 Estabilidade Angular

Diz respeito à habilidade dos geradores síncronos interligados de permanecer em equilíbrio (sincronismo) em regime normal de operação e após a ocorrência de algum distúrbio. Tal equilíbrio está associado à capacidade de manter ou restaurar o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o mecânico de cada máquina. Caso contrário,

a instabilidade resultante ocorre em forma de aumento das oscilações angulares de algum gerador, levando a perda de sincronismo com outros geradores [12].

O problema da estabilidade angular envolve o estudo das oscilações eletromecânicas inerentes aos sistemas de poder. Um fator fundamental para esse problema é a maneira pela qual as saídas de energia das máquinas síncronas variam conforme variam os ângulos do rotor. Sob condições de estado estacionário, há equilíbrio entre o torque mecânico de entrada e o torque eletromagnético de saída cada gerador, e a velocidade se mantém constante. Se o sistema é perturbado, este equilíbrio é perturbado, resultando em aceleração ou desaceleração dos rotores das máquinas de acordo com as leis do movimento de um corpo em rotação. Se um gerador temporariamente corre mais rápido que o outro, a posição angular do seu rotor em relação ao da máquina mais lenta vai avançar. A diferença angular resultante transfere parte da carga da máquina lenta para a máquina rápida, dependendo da relação potência-ângulo. Isso tende a reduzir a diferença de velocidade e, portanto, a separação angular. A relação potência-ângulo é altamente não-linear. Além de certo limite, um aumento na separação angular é acompanhado por uma diminuição na transferência de poder de tal forma que a separação angular é reforçada. Gera-se instabilidade se o sistema não consegue absorver a energia cinética correspondente a estas diferenças de velocidade do rotor. Para qualquer situação, a estabilidade do sistema depende sobre mesmo se os desvios nas posições angulares dos rotores conduzem aos suficientes torques de restauração. Perda de sincronismo pode ocorrer entre uma máquina e o resto do sistema, ou entre grupos de máquinas, com sincronismo mantido dentro de cada grupo após se separar umas das outras[12].

A mudança no torque eletromagnético de uma máquina síncrona após uma perturbação pode ser resolvida em duas componentes:

- componente de Sincronização de torque, em fase com o desvio angular do rotor.
- componente de amortecimento de torque, em fase com o desvio de velocidade.

A estabilidade do sistema depende da existência de ambas as componentes do torque para cada uma das máquinas síncronas. Falta de suficiente sincronização de torque resulta em instabilidade aperiódica ou não oscilatória, enquanto que a falta de torque de amortecimento resulta em instabilidade oscilatória.

Duas classes de estabilidade podem ser usadas para caracterizar a estabilidade de ângulo do rotor:

#### 2.1.1.1 Perturbação pequena

Está relacionada com a capacidade do sistema de potência para manter o sincronismo com pequenas perturbações. Os distúrbios são considerados suficientemente pequenos, que é admissível a linearização do sistema de equações para fins de análise.

- A análise de estabilidade a pequenos sinais depende do estado inicial de operação do sistema.
- Nos sistemas atuais de energia, o problema de pequenas perturbações no ângulo do rotor é geralmente associado à insuficiência de amortecimento de oscilações.
- Pode ser de natureza local ou global, os problemas globais são causados por interações entre grandes grupos de geradores e têm efeitos generalizados.

#### 2.1.1.2 Estabilidade Transitória

É relativa à capacidade do sistema de potência em manter o sincronismo após um distúrbio transitório severo, como um curto-circuito em uma linha de transmissão. A resposta resultante do sistema envolve grandes excursões de ângulos do rotor do gerador e é influenciada pela relação não linear entre potência-ângulo.

- A estabilidade transitória depende tanto do ponto de operação inicial do sistema como da severidade da perturbação.

- O intervalo de tempo de interesse dos estudos de estabilidade transitória é usualmente limitado em 3 a 5 segundos após a perturbação, podendo ser estendido para 10 a 20 segundos em grandes sistemas interligados. A técnica de simulação não-linear no domínio do tempo e com modelagem transitória convencional é a empregada nos estudos de estabilidade transitória.

Conforme identificado na Figura 1, a estabilidade de pequenas perturbações do ângulo do rotor, bem como a estabilidade transitória são classificados como fenômenos de curto prazo [12].

### 2.1.2 Estabilidade de Freqüência

Estabilidade de freqüência é a habilidade do sistema de potência em manter a freqüência dentro de uma faixa nominal, em função de uma severa oscilação no sistema que resulta em um desequilíbrio significativo entre a geração e a carga. Depende da capacidade de manter/restaurar o equilíbrio entre geração e carga, com mínima perda involuntária de carga. A instabilidade que possa resultar ocorre sob a forma de oscilações continuadas de freqüência que conduza ao disparo das unidades geradoras e/ou cargas [12].

Perturbações graves do sistema geralmente resultam em grandes desvios de freqüência, fluxos de energia, tensão e outras variáveis do sistema, assim, invocar as ações de processos, controles e proteções que não são modelados em termos de estabilidade transitória convencional ou estudos de estabilidade de tensão. Esses processos podem ser muito lentos, tais como a dinâmica da caldeira, ou apenas desencadeada por condições extremas do sistema, tais como geradores de proteção de disparo V/Hertz. Em grandes sistemas de energia interligados, este tipo de situação é mais comumente associado com as seguintes condições da divisão de sistemas em ilhas. Estabilidade neste caso é uma questão de se ou não de cada ilha irá atingir um estado de equilíbrio operacional, com mínima perda involuntária de carga. Ela é

determinada pela resposta total da ilha como evidenciado por sua frequência média, ao invés do movimento relativo das máquinas. Geralmente, os problemas de estabilidade de frequência estão associados a deficiências nas respostas de equipamentos, má coordenação de equipamentos de controle e proteção, ou reserva de produção insuficiente. Em ilhas isoladas, a estabilidade de frequência pode ser motivo de preocupação para qualquer perturbação que causa uma perda relativamente significativa da carga ou geração.

Geralmente, os problemas de estabilidade de frequência são associados às inadequadas respostas de equipamentos, fraca coordenação de controles e equipamentos de proteção, ou reserva de geração insuficiente. Os efeitos da atuação dos controles automáticos de geração (CAG), saturação de transformadores e comportamento da carga fora das condições nominais, são importantes nesta análise.

A técnica de simulação não-linear no domínio do tempo com modelagens mais aprimoradas para as dinâmicas associadas às severas excursões de parâmetros e intervalos de tempo estendidos é indicada para esta análise[20].

### 2.1.3 Estabilidade de Tensão

Estabilidade de tensão é a habilidade do sistema de potência para manter a tensão constante em todas as barras no sistema após ter sido submetido a um distúrbio de uma condição de funcionamento inicial dada.

Depende da capacidade de manter/restaurar o equilíbrio entre oferta e demanda de carga de carga do sistema elétrico. Instabilidade que possa resultar ocorre na forma de uma queda progressiva ou aumento da tensão de algumas barras. Um possível resultado da instabilidade de tensão é a perda de carga em uma área, ou a ativação dos sistemas de proteção das linhas de transmissão e outros elementos levando a falhas em cascada. A perda de sincronismo de alguns geradores pode

resultar desta indisponibilidade ou das condições de funcionamento que violam o limite da corrente de campo [12].

Um sistema sofre instabilidade de tensão quando uma perturbação, crescimento na demanda de carga ou uma mudança nas condições de operação, causa uma progressiva e incontrolável queda ou elevação na tensão [21].

Os problemas de estabilidade de tensão estão associados a sistemas elétricos que operam sob condições estressantes, tais como: linhas de transmissão com carregamentos elevados, fontes locais insuficientes de potência reativa e transmissão de potência através de grandes distâncias. A seguir serão mostradas as características dos elementos de um sistema de potência que são de interesse para a compreensão do processo de colapso de tensão.

### 2.1.3.1 Fatores de Influência

O principal fator responsável pela instabilidade de tensão é a inabilidade do sistema de potência em manter um apropriado balanço de potência reativa e prover um suporte adequado de tensão através do sistema [12]. Entre os principais fatores que influem na estabilidade de tensão, destacam-se:

- **Capacidade dos Geradores:** A capacidade de fornecimento de potência reativa dos geradores é limitada pelas correntes de campo e armadura. Embora transitoriamente os geradores venham a fornecer potência reativa além desses limites, a atuação de seus reguladores de tensão provocará a redução dessa potência em um instante posterior.
- **Características das Linhas de Transmissão:** Uma linha de transmissão apresenta um comportamento diferenciado em função de seu carregamento. Ela produz potência reativa proporcionalmente ao quadrado da tensão e consome potência ativa e reativa, proporcionalmente ao quadrado da corrente. Dessa



forma, a potência reativa líquida proporcionada por uma linha de transmissão variará com seu ciclo de carga, sendo as condições de carga pesada as mais críticas sob o aspecto de estabilidade de tensão, quando as perdas elétricas e quedas de tensão podem tornar-se elevadas [19].

- **Compensadores de Potência Reativa:** Os bancos de capacitores “shunt”, apesar de melhorarem o suporte local de potência reativa, têm o inconveniente de fornecer essa potência como função do quadrado da tensão. Portanto, podem não produzir bons resultados em condições de operação com tensões baixas. Mesmo os compensadores estáticos, apesar de proporcionarem maior flexibilidade, ao atingirem seus limites de geração de potência reativa tornam-se simples capacitores “shunt”.

Os modelos estáticos de carga expressam as potências ativa e reativa de uma barra em um determinado instante de tempo como função da magnitude da tensão nessa barra para o mesmo instante. Esses modelos são usados para representar componentes essencialmente estáticos da carga, por exemplo, cargas de aquecimento e iluminação, e como uma aproximação para componentes dinâmicos da carga, por exemplo, cargas acionadas por motores. Um modelo estático bastante utilizado é o modelo polinomial, no qual a carga ativa e reativa é expressa através das seguintes equações algébricas:

$$P = P_0 \left[ a_1 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + a_2 \left( \frac{V}{V_0} \right) + a_3 \right] \quad (2.1)$$

$$Q = Q_0 \left[ a_4 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + a_5 \left( \frac{V}{V_0} \right) + a_6 \right] \quad (2.2)$$

onde P e Q são as componentes de potência ativa e reativa da carga quando a magnitude da tensão na barra é V e o subscrito 0 identifica os valores das respec-

tivas variáveis na condição inicial de operação. Os parâmetros desse modelo são os coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $a_5$  e  $a_6$ , os quais definem as proporções das parcelas de carga que se comportam como impedância constante ( $a_1$  e  $a_4$ ), corrente constante ( $a_2$  e  $a_5$ ) e potência constante ( $a_3$  e  $a_6$ ).

Os modelos dinâmicos são representados por equações diferenciais e, em função do seu detalhamento, podem reproduzir não só o comportamento da carga em regime permanente com também nos transitórios elétricos. Entretanto, em programas como os de análise de estabilidade transitória, utilizam-se modelos dinâmicos, quando uma parcela considerável da carga tem comportamento dinâmico apreciável. Um modelo dinâmico genérico para as cargas de potência constante, aplicável aos estudos de estabilidade de tensão, foi proposto em [13] e tem a seguinte forma:

$$T_L \dot{G} = P_0 - V_L^2 \quad (2.3)$$

Portanto, os modelos dinâmicos de carga expressam as potências ativa e reativa de uma barra em um determinado instante de tempo como função da magnitude da tensão nessa barra em um instante passado de tempo e, usualmente, incluindo o instante presente. Cargas constituídas essencialmente por motores, onde a resposta a um distúrbio não ocorre instantaneamente, mas sim com determinada constante de tempo, podem requerer esses modelos, cuja representação requer o uso de equações diferenciais.

Destaca-se que sob o ponto de vista da fidelidade da representação da carga, a maneira mais apropriada para identificar-se seu modelo seria através de testes nas diversas subestações de um sistema. Entretanto, tal procedimento é de difícil execução, haja vista que as empresas relutam em permitir que seus consumidores sejam submetidos a distúrbios voluntários. Adicionalmente, a composição da carga de uma subestação pode variar em função do horário, o que exigiria repetidos testes para cada subestação. Portanto, a tendência predominante tem sido a de recorrer-se

a outros expedientes, tais como levantamento das características das cargas com base na sua composi o por classe de consumidores (industrial, comercial e residencial), bem como baseando-se na reprodu o de determinadas ocorrências registradas.

### **2.1.3.2 Mecanismo da Perda da Estabilidade de Tensão**

Tendo em vista as características dos principais elementos constituintes de um sistema elétrico de potência e sua influência na estabilidade de tensão, é conveniente explicitar fisicamente o comportamento conjunto de todo processo do colapso de tensão. O colapso de tensão é um fenômeno local que se espalha pela vizinhança [11]. O intervalo de tempo entre o d st rbio inicial e o colapso de tensão pode ser de uma fra o de segundo até dezenas de minutos. Embora o processo de instabilidade de tensão possa acontecer de diversas formas, descrever-se-  a seguir um dos cenários clássicos desse processo [21].

Uma perturba o como perda de grandes unidades geradoras em uma área de carga, de bancos de capacitores ou compensadores estáticos/ síncronos estratégicos ou de linhas de transmissão importantes, causa um aumento nas perdas de potência reativa e queda da tensão nas áreas de carga.   medida que os tapes de transformadores agem para restaurar os níveis de tensão nas barras de cargas, o perfil de tensão no sistema de transmissão sofre redu o. As unidades geradoras mais próximas, que temporariamente são sobreexcitadas, têm suas excita es retornadas a níveis compatíveis com suas capacidades. Geradores mais distantes deveriam então proporcionar potência reativa, o que é pouco eficiente. Por outro lado, bancos de capacitores “shunt” têm suas potências reativas reduzidas com a tensão, o mesmo se verificando com a potência reativa produzida pela susceptância das linhas de transmissão. A gera o e o sistema de transmissão não conseguem mais suportar a carga e as perdas reativas, sofrendo um decaimento rápido do perfil de tensão, com o sistema entrando em um estado de colapso parcial ou total.

## 2.2 Relação entre Estabilidade de Tensão e Estabilidade Angular

A estabilidade de tensão e a estabilidade angular estão interrelacionadas. A estabilidade de tensão transitória está geralmente associada com a estabilidade angular transitória e formas mais lentas de estabilidade de tensão estão relacionadas com a estabilidade devido a pequenas perturbações. Há portanto, certas dificuldades em separar os mecanismos que regem tais fenômenos.

- Entretanto, existem casos onde uma forma de instabilidade predomina. A referência [21] apresenta duas situações extremas: · Um gerador síncrono conectado a um grande sistema por uma linha de transmissão: estabilidade puramente angular (problema máquina - barra infinita). A Figura 2 mostra um caso extremo de estabilidade angular, Gerador - Grande Sistema.

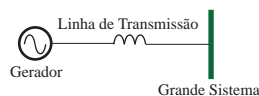


Figura 2: Gerador - Grande Sistema

- Um gerador síncrono ou um grande sistema conectado por uma linha de transmissão a uma carga assíncrona: estabilidade puramente de tensão. A Figura 3 mostra o caso Grande Sistema - Carga.

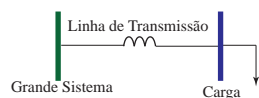


Figura 3: Grande Sistema - Carga

Enquanto a estabilidade de tensão preocupa-se com as áreas de carga e características da carga, a estabilidade angular freqüentemente tem interesse na interligação

de usinas remotas com grandes sistemas. Por isso, enquanto na estabilidade angular o objetivo é manter os geradores em sincronismo, a estabilidade de tensão diz respeito às áreas de carga, sendo por isso muitas vezes designada como estabilidade das cargas [21, 23]. As duas formas de estabilidade podem ou não estar presentes em um mesmo distúrbio. É possível detectar colapso de tensão em uma área de um grande sistema interligado sem perda de sincronismo de qualquer dos geradores. A estabilidade de tensão transitória é usualmente associada com a estabilidade angular transitória, enquanto a estabilidade de tensão de longo termo é menos relacionada com a estabilidade angular.

Pode-se dizer que se a tensão entra em colapso em um ponto do sistema longe de cargas, existe um problema de estabilidade angular. Entretanto, se a tensão colapsa em uma área de carga, existe provavelmente um problema de estabilidade de tensão [21].

## 2.3 Caracterização do fenômeno da Estabilidade de Tensão e Índices para Avaliação

Para a compreensão do fenômeno utiliza-se o circuito série da Figura 4, visto que a análise de um caso simples fornece mais chances de se obter explicações simples.

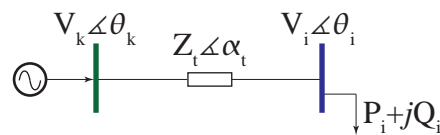


Figura 4: Sistema - Teste de Duas Barras

Resolvendo-se as equações estáticas de fluxo de carga, obtém-se a tensão na barra de carga em módulo e ângulo. Essas duas quantidades, junto com aquelas especificadas, caracterizam totalmente o ponto de operação do sistema.

As potências ativa e reativa que fluem da barra i para a barra k, são:

$$P_{ik} = \frac{V_i^2}{Z_t} \cos \alpha_t - \frac{V_i V_k}{Z_t} \cos (\theta_{ik} + \alpha_t) \quad (2.4)$$

$$Q_{ik} = \frac{V_i^2}{Z_t} \sin \alpha_t - \frac{V_i V_k}{Z_t} \sin (\theta_{ik} + \alpha_t) \quad (2.5)$$

Os valores de  $V_i$  são obtidos para cada  $\theta_i$  através da solução de uma equação do 2º grau, e portanto poderão ser encontradas 2 soluções.

No circuito simples em análise, as equações estáticas de fluxo de carga coincidem com as equações de fluxos de potência ativa e reativa chegando na barra de carga, igualadas com a potência consumida na carga. Conseqüentemente, a variação dos valores de carga está diretamente relacionada com a variação do fluxo de potência na linha de transmissão.

Para o ângulo do fator de potência  $\phi$  constante definido abaixo, atribui-se um valor desejado a  $\phi$  e obtém-se todos os valores de  $V_i$  correspondentes usando a equação:

$$\phi = \arctan \left[ \frac{- \left[ \frac{V_i V_k}{Z_t} \sin (\theta_i - \theta_k + \alpha_t) \right] + \frac{V_i^2}{Z_t} \sin \alpha_t}{- \left[ \frac{V_i V_k}{Z_t} \cos (\theta_i - \theta_k + \alpha_t) \right] + \frac{V_i^2}{Z_t} \cos \alpha_t} \right] \quad (2.6)$$

Os fatores de potência escolhidos são indutivos e, observando-se a Figura 5, vê-se que:

$$P_1 < P_2 < P_3$$

$$Q_1 < Q_2 < Q_3(\text{indutivo})$$

$$\cos \theta_1 < \cos \theta_2 < \cos \theta_3$$

O valor do ângulo do fator de potência  $\phi$  foi escolhido como  $\arctan(3/4)$  e assim, as três curvas P, Q, R na Figura 6, são concorrentes nas duas soluções.

Os ângulos assumem valores negativos e a carga ativa tem valor maior ou igual a zero. Quanto maior a carga ativa mais à direita está a curva de P cte e quanto maior a carga reativa mais à esquerda está a curva de Q cte. Um valor grande de carga reativa significa um valor grande de potência reativa indutiva, enquanto que uma carga reativa pequena significa um valor grande de potência reativa capacitiva. As curvas R para  $\phi$  cte se movem para direita para fatores de potência mais capacitivos e para esquerda para fatores de potência mais indutivos.

O método gráfico utilizado nas figuras que se seguem foi projetado para se poder representar em um único gráfico, as quatro variáveis associadas à barra de carga: cargas ativa e reativa, módulo e ângulo da tensão [18].

A Figura 5 mostra as curvas correspondentes ao lugar geométrico das tensões na barra de carga, em módulo e ângulo, para cargas com P,Q constantes. Os valores numéricos correspondem a  $V_k \angle \theta_k = 1, 0 \angle 0^\circ$  e  $Z_t \angle \alpha_t = 0, 2 \angle 70^\circ$ .

Na Figura 5 o ângulo do fator de potência das cargas é igual a  $41^\circ$  indutivo. Para  $P_1$  e  $Q_1$ , tem-se duas soluções para a tensão na carga. À medida que se aumentam as cargas, mantendo o fator de potência constante, chega-se ao ponto em que as curvas de P e Q cte só se tocam em um único ponto (solução única). A partir daí, não existe mais solução para a tensão.

O fluxo máximo que pode chegar à barra de carga é  $P = 1,0$  pu para ângulo do fator de potência  $41^\circ$  indutivo. Foi visto que o limite de estabilidade para o circuito em questão, correspondia a um valor de  $P = 3,65$ , maior que o encontrado na Figura 6. Isto mostra que existe um limite máximo para cada fator de potência de carga.

Voltando à Figura 5, nota-se que as curvas para P cte têm sua derivada, em relação ao ângulo da tensão, com valor nulo sempre no mesmo valor de ângulo ( $-70^\circ$ ).

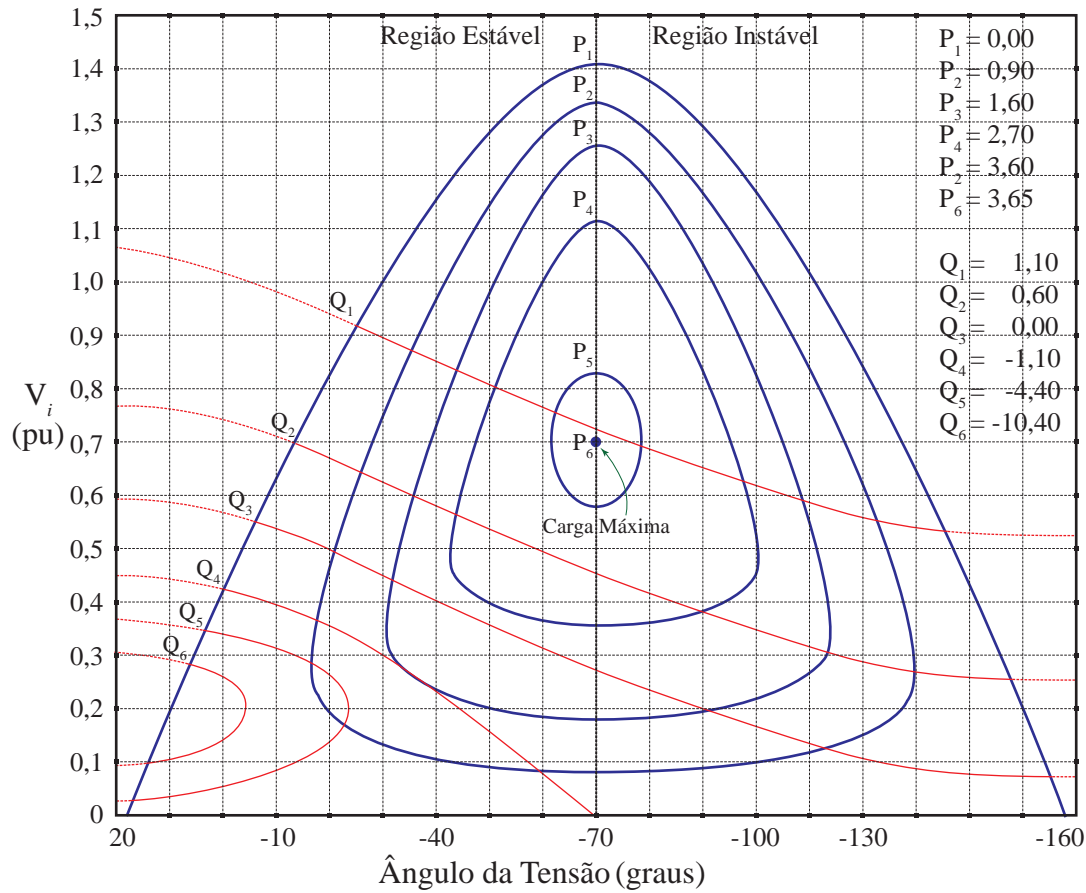


Figura 5: Lugar Geométrico da Tensão na Carga para Todos os Níveis de Potência Ativa Constante e Para Alguns Níveis de Potência Reativa Constante

Se então fosse traçada uma reta paralela ao eixo do módulo da tensão passando no ângulo  $-70^\circ$  da tensão, uma fronteira entre os lugares geométricos onde o sistema é estaticamente estável (entre  $20^\circ$  e  $-70^\circ$ ) e estaticamente instável ( $-70^\circ$  e  $-160^\circ$ ) seria determinada. A derivada de  $P$  em relação ao ângulo da tensão é positiva à esquerda da fronteira e negativa à direita.

Dois pontos podem ser ressaltados a partir do que se observa nos gráficos mostrados:



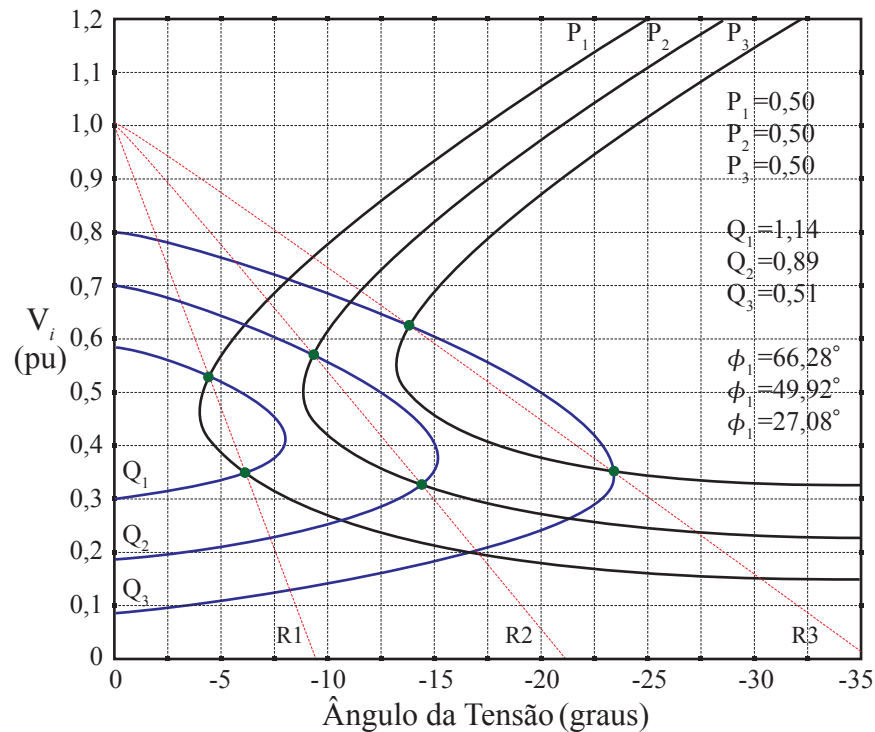


Figura 6: Gráfico  $V \times \theta$  com o Lugar Geométrico da Tensão na Carga para  $P$  Constante,  $Q$  constante,  $P$  &  $Q$  para  $\phi$  constante

- O limite de estabilidade estática angular é caracterizado por uma reta com ângulo de tensão constante. Neste máximo desfasamento angular de tensão, a carga ativa pode adquirir qualquer valor entre zero e um certo máximo.
- Existe um fluxo máximo de potência ativa e reativa que pode chegar na barra de carga. Esse valor máximo é dependente do fator de potência e não haverá solução para tensão na barra de carga para fluxos maiores que aquele determinado como sendo o máximo.

A operação normal de sistemas elétricos de potência requer que a magnitude da tensão seja mantida em uma faixa de operação da ordem de  $\pm 5\%$  em relação ao seu valor nominal. Para restaurar a tensão à faixa normal de operação, requer-se o

uso de controles associados com potência reativa, tais como o controle da tensão nos terminais de geradores e compensadores, e o controle da tensão de barras do sistema através de transformadores de taps variáveis e através do chaveamento de capacitores em paralelo.

Considerando o ângulo do fator de potência da carga constante, obtêm-se:

$$V_i = \frac{V_k \cdot \cos(\theta_{ik} + \alpha_t) \cdot \tan \phi \cdot \sin(\theta_{ik} + \alpha_t)}{\tan \phi \cdot \cos \alpha_t \cdot \sin \alpha_t} \quad (2.7)$$

Fazendo  $\phi$  constante e igual a  $27^\circ$  indutivos e variando-se o ângulo de tensão na barra i, obtêm-se vários valores para  $V_i$  resolvendo-se (2.7). Através da aplicação destes valores construiu-se a curva  $P_{ik} \times V_i$  mostrada na Figura 7.

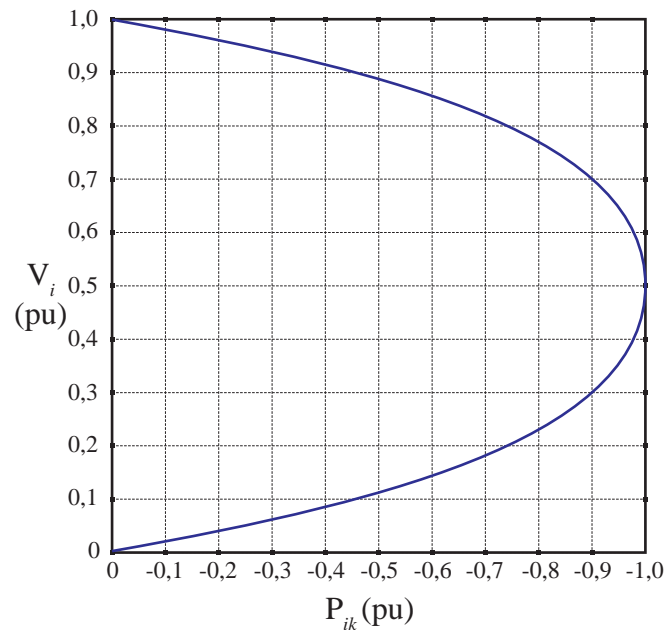


Figura 7: Curva  $P_{ik} \times V_i$  Referente ao Sistema de Duas Barras da Figura 4

Verifica-se na Figura 7 a existência de duas soluções de tensão para cada valor de  $P_{ik}$ , sendo que no ponto de máxima potência transferida, existe apenas uma

solução de tensão. Para se observar o efeito de uma ação de controle sobre o sistema apresentado, será colocado um capacitor na barra de carga, de impedância  $Z_c$  igual a 4 pu, conforme mostrado na Figura 8.

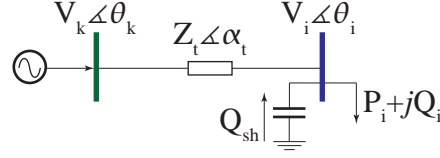


Figura 8: Sistema de Duas Barras com Capacitor na Barra de Carga

A potência ativa que flui da barra i para a barra k continua sendo dada por (2.4), enquanto a potência reativa é expressa por:

$$Q_{ik} = V_i^2 \left( \frac{\sin \alpha_t}{Z_t} - \frac{1}{Z_c} \right) - \frac{V_i V_k}{Z_t} \sin (\theta_{ik} + \alpha_t) \quad (2.8)$$

Considerando o ângulo do fator de potência da carga constante, obtêm-se:

$$V_i = \frac{V_k \cdot \cos (\theta_{ik} + \alpha_t) \cdot \tan \phi - \sin (\theta_{ik} + \alpha_t)}{\tan \phi \cdot \cos \alpha - \sin \alpha + \frac{Z_t}{Z_c}} \quad (2.9)$$

A Figura 9 mostra as curvas  $P_{ik} \times V_i$  obtidas para o sistema de duas barras antes e depois da instalação do capacitor na barra de carga. Verifica-se que a instalação do capacitor possibilitou uma maior transferência de potência da barra i para a barra k.

A ação do capacitor, nos pontos de operação pertencentes à parte superior das curvas  $P_{ik} \times V_i$ , possibilitou a transferência de potência com valores maiores de tensão do que os observados antes da sua instalação. Na parte inferior das curvas, a ação do capacitor faz com que a potência seja transferida com valores de tensão menores do que os observados antes da sua instalação.

Baseado na eficiência das ações de controle em corrigir tensões anormais, são

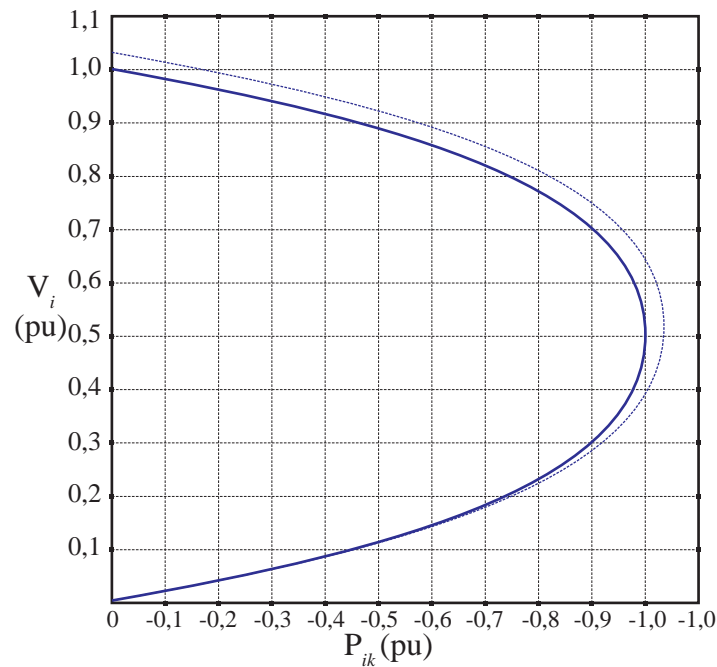


Figura 9: Curvas  $P_{ik} \times V_i$  Antes e Depois da Instalação do Capacitor na Barra de Carga

definidas duas regiões de operação:

“Região A”: É a região normal de operação, onde as ações corretivas de tensão produzem o efeito esperado.

“Região B”: É a região anormal de operação, onde as ações corretivas de tensão funcionam de maneira inversa à esperada.

A Fronteira entre as Regiões A e B é a reunião dos pontos de máxima injeção de potência para diferentes fatores de potência [4], ou seja, corresponde à máxima potência ativa e reativa que pode ser transmitida.

A partir da Figura 10, pode-se observar que para cada fator de potência existem dois valores de tensão para um mesmo valor de potência na carga, exceto em um ponto onde um único valor de tensão está relacionado à carga, ponto esse que representa a máxima potência fornecida, apesar da fonte ter sido considerada infinita. Esse ponto

corresponde ao limite de estabilidade de tensão, também citado muitas vezes na literatura como ponto de bifurcação ou ponto de singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de carga [6, 31, 32, 35, 38].

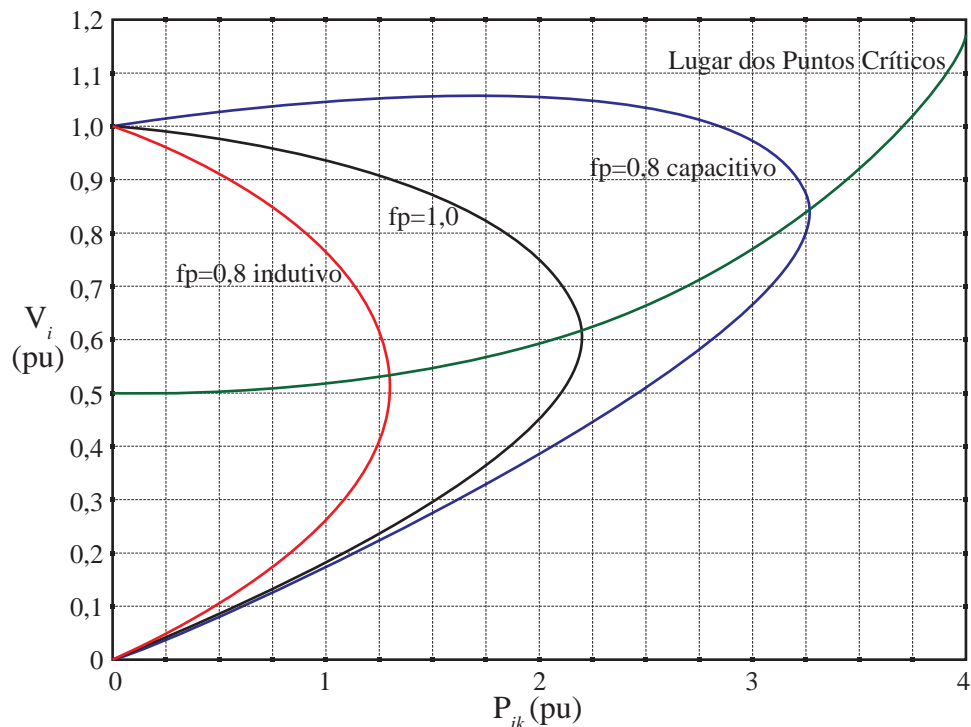


Figura 10: Relação entre  $V_i$  e  $P_{ik}$  para diferentes fatores de potência

A existência de duas soluções de tensão para uma mesma potência pode ser explicada pela também existência de dois valores de corrente para uma mesma potência, ou seja, para pontos de operação correspondentes à parte superior da curva, tem-se tensões maiores e correntes menores que para pontos correspondentes à região inferior da curva, onde com tensões menores é necessária uma intensidade maior de corrente para produzir uma certa potência.

## 2.4 Análise Nodal

### 2.4.1 Sistema de Duas Barras

Considerando-se ainda o sistema mostrado na Figura 4, construiu-se o gráfico mostrado na Figura 11. Este gráfico permite representar em uma única figura as quatro variáveis associadas à barra de carga: carga ativa e reativa e o módulo e ângulo da tensão. Faz-se  $P_{ik}$  e  $Q_{ik}$  constantes. No caso,  $P_{ik} = 0,8$  pu e ângulo do fator de potência  $\phi = 27^\circ$  indutivos. A linha tracejada representa  $P_{ik}$  e a linha contínua  $Q_{ik}$ . As interseções entre as duas curvas correspondem às duas soluções possíveis de tensão para a carga proposta.

Aumentando-se a carga ativa constante, mais à direita será traçada a curva correspondente à  $P_{ik}$ , enquanto que aumentando-se a carga reativa, mais à esquerda será traçada a curva correspondente à  $Q_{ik}$ . Isto significa que quando a carga ativa/reativa cresce, por exemplo, mantendo-se o ângulo do fator de potência constante, as duas soluções possíveis de tensão vão se aproximando uma da outra até que elas coincidam: somente uma solução existe para aquela carga. Não há solução de tensão para qualquer outro aumento de carga. Desde que o gerador não tem restrição em gerar potência e a carga não tem restrição em absorver potência, a carga correspondente à solução única de tensão é igual ao máximo fluxo de potência ativa/reativa que a rede pode transmitir.

Para o sistema proposto, a máxima potência transferida da barra  $i$  para a barra  $k$ , ou seja,  $(P_{ik})_{max} = -1,2866$  pu, com  $V_i = 0,5374$  pu e  $\theta = -21,5^\circ$ . Este ponto de operação é ilustrado nas curvas da Figura 12.

#### A Região da Fronteira

Para cada fator de potência da carga existe um lugar geométrico das tensões na barra de carga. Essas soluções pertencem à “Região A”, à “Região B”, ou à

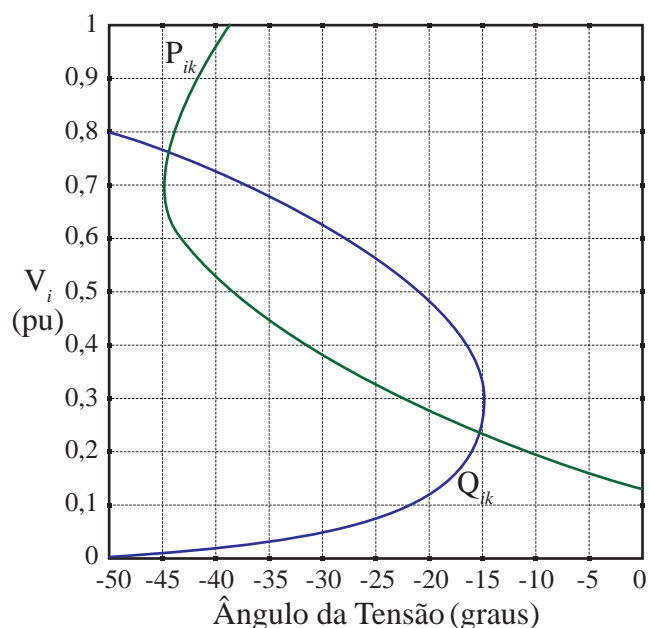


Figura 11: Curvas  $V_i \times \theta_i$  para  $P_{ik}$  e  $Q_{ik}$  constantes

fronteira. Na Figura 13 esse lugar geométrico é a curva R traçada para demanda de potência ativa (ou reativa) variável com fator de potência constante. A solução de tensão na carga que pertence à fronteira é um único ponto que corresponde à máxima demanda de potência ativa (e reativa) para aquele certo fator de potência constante. Portanto, a fronteira é formada por um conjunto de pontos, cada um correspondendo à demanda máxima para cada fator de potência na carga. Na Figura 13 esse lugar geométrico é a curva F.

Para um certo fator de potência da carga, a interseção das curvas R e F corresponde então, ao máximo fluxo de potência ativa e reativa que pode chegar à barra de carga. Conseqüentemente o gráfico correspondente às curvas de potência ativa constante e potência reativa constante se tocam em um único ponto quando o fluxo é máximo. Isto pode ser observado na Figura 13.

Se os fluxos de potência ativa P e reativa Q são máximos para aquele fator de

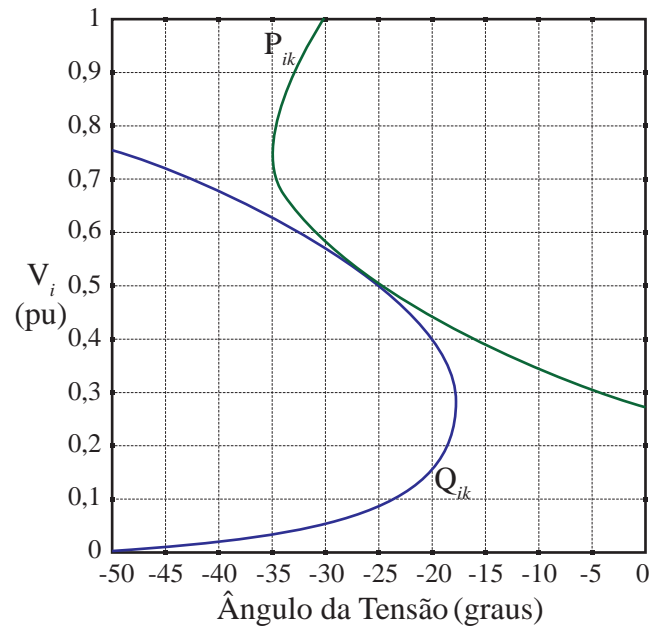


Figura 12: Curvas  $V_i \times \vartheta_i$  para  $P_{ik}$  e  $Q_{ik}$  constantes, considerando a máxima potência transferida da barra  $i$  para a barra  $k$

potência (curvas de  $P$  constante e  $Q$  constante tocam-se em um ponto somente), isto pode ser traduzido matematicamente: os vetores gradiente  $\nabla P$  e  $\nabla Q$  estão alinhados sob mesma direção. Então, a seguinte relação pode ser escrita:

$$\nabla P - \lambda \nabla Q = 0 \quad (2.10)$$

onde  $\lambda$  é um escalar.

Essa relação é reconhecida como uma das condições de otimalidade dos seguintes problemas:

- maximize  $P(V_i, \theta_i)$  sujeito a  $Q(V_i, \theta_i) = cte$ ;
- maximize  $Q(V_i, \theta_i)$  ou seja, maximize  $Q$  indutivo, sujeito a  $P(V_i, \theta_i) = cte$ ;



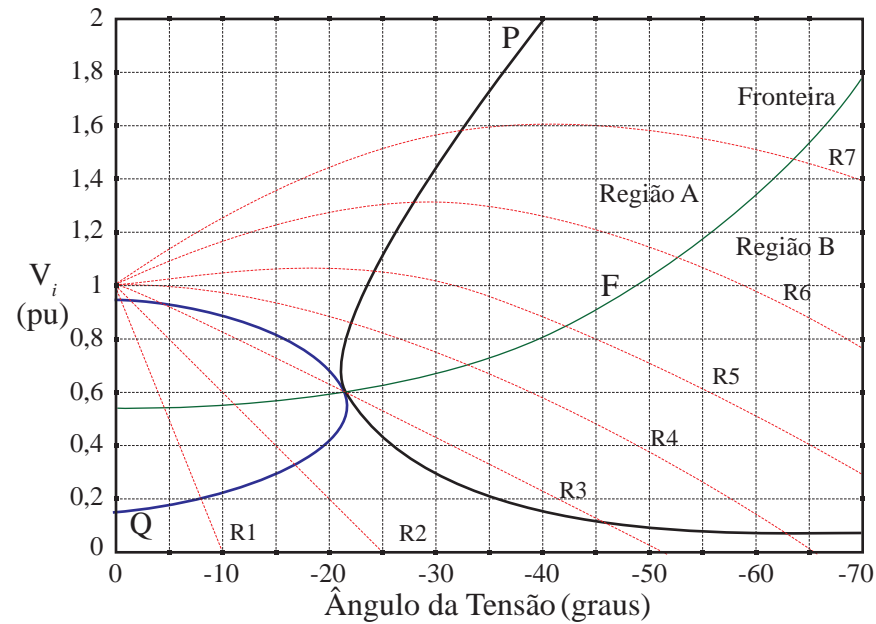


Figura 13: Fronteira F entre “Região A” e “Região B” Cruzando os Pontos de Carga Máximas Curvas  $R_i$  de Carga Variável e Fator de Potência Constante.

- minimize  $Q(V_i, \theta_i)$ , ou seja, maximize  $Q$  capacitivo, sujeito a  $P(V_i, \theta_i) = cte$ ;
- maximize  $P(V_i, \theta_i)$  e  $Q(V_i, \theta_i)$  sujeito a  $\phi = \arctan(Q/P) = cte$ .

onde:

- $P$  é o fluxo de potência ativa chegando na barra de carga
- $Q$  é o fluxo de potência reativa chegando na barra de carga
- $\phi_i$  é o ângulo do fator de potência dos fluxos chegando na barra de carga
- $V_i$  é o módulo da tensão na barra de carga
- $\theta_i$  é o ângulo da tensão na barra de carga

A condição de otimalidade  $\nabla P - \lambda \nabla Q = 0$ , pode ser rescrita:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} - \lambda \frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} - \lambda \frac{\partial Q}{\partial V} = 0 \quad (2.12)$$

Rearranjando (2.11) e (3.4) obtém-se:

$$\frac{\partial P}{\partial V} \cdot \frac{\partial Q}{\partial \theta} - \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial Q}{\partial V} = 0 \quad (2.13)$$

que é equivalente ao determinante da matriz Jacobiano das duas equações de fluxo de carga correspondentes à barra de carga ser igualado a zero.

A resolução das condições de otimalidade fornece os valores de módulo e ângulo de tensão para a região da fronteira (lugar geométrico onde as curvas P cte e Q cte se encontram em um único ponto) [18]. Esses valores são dados por:

$$V_i^c = V_k \frac{1}{2 \cdot \cos(\theta_i^c - \theta_k) + 2 \cdot \left(\frac{Z_t}{Z_s}\right) \cdot \cos(\theta_i^c - \theta_k + \alpha_t - \alpha_s)} \quad (2.14)$$

$$\theta_i^c = \frac{1}{2} \cdot \arctan \left[ \frac{\sin(-\varphi + \alpha_t) + \left(\frac{Z_t}{Z_s}\right) \cdot \sin(-\varphi + 2\alpha_t - \alpha_s)}{-\cos(-\varphi + \alpha_t) - \left(\frac{Z_t}{Z_s}\right) \cdot \cos(-\varphi + 2\alpha_t - \alpha_s)} \right] + \theta_k \quad (2.15)$$

Se o valor encontrado em (2.15) não estiver na faixa de interesse do problema, uma outra solução para o ângulo  $\theta$  crítico da carga é dada por:

$$\theta_i' = \theta_i - \pi/2 \quad (2.16)$$

onde:

- $V_i^c$  módulo da tensão na carga, na fronteira
- $V_k$  módulo da tensão terminal do gerador
- $\theta_i$  ângulo da tensão na carga
- $\theta_k$  ângulo da tensão terminal do gerador
- $Z_t$  módulo da impedância do ramo série de transmissão
- $\alpha_t$  ângulo da impedância do ramo série
- $\alpha_s$  ângulo da impedância do ramo paralelo
- $Z_s$  módulo da impedância do ramo paralelo de transmissão conectado à barra de carga

Se este valor de tensão encontrado (módulo e ângulo) for substituído nas equações que descrevem as potências ativa e reativa na barra de carga, ter-se-á o valor destas potências da barra de carga, na fronteira.

#### 2.4.1.1 Sistemas Multi-Nó

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

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Colocando-se as equações e variáveis relacionadas com a barra em análise para baixo, (2.17) fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P' \\ \Delta Q' \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta' \\ \Delta V' \\ \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

onde, as sub-matrizes A, B, C e D são partições da matriz Jacobiano .

Assume-se uma variação de carga (ou geração) incremental  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  somente para a barra i de um sistema multi-nó, isto é,  $\Delta P' = \Delta Q' = 0$ , e então o sistema (2.18) pode ser reduzido para dimensão (2x2):

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [D'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

onde

$$[D'] = [D] - [C \cdot A^{-1} \cdot B] \quad (2.20)$$

Portanto, as relações de sensibilidade entre as injeções de potência ativa e reativa e a magnitude e o ângulo da tensão na barra i, levando em consideração o restante do sistema, podem ser avaliados por (2.19). Assim sendo, na Região A o  $\det [D']$  é positivo, na Região B o  $\det [D']$  é negativo e na Fronteira o  $\det [D']$  é nulo.

Se apenas uma variação incremental de potência reativa é possível ou desejável, ou seja, o caso de uma barra com compensação reativa somente, as condições críticas podem ser verificadas pelo  $\det [D']$  dividido por  $[d'_{11}]$ , elemento de  $[D']$ .

### *3 Índices para Avaliação Nodal do carregamento da Rede de Transmissão*

O objetivo é identificar se a solução de tensão para uma carga conectada à barra  $i$  está na parte superior ou na inferior e a distância à “ponta do nariz” da curva  $V \times P, Q$ . A parte superior é a região normal de operação, enquanto a parte inferior é a região anormal onde ações de controle de tensão podem ter efeito contrário ao esperado se a carga se comporta como um modelo de potência constante. A “ponta do nariz” corresponde à máxima quantidade de potência ativa e reativa que pode ser transmitida para a carga (ou a partir de um gerador). A tensão na “ponta do nariz” é a tensão mínima para a operação normal [8].

#### **3.1 Magnitude do Determinante da Matriz [ D' ]**

Em um sistema de duas barras o fluxo de potência que chega na barra  $i$  é igual à carga consumida. Com o intuito de conhecer o significado da magnitude do valor do determinante, desenvolve-se a expressão que o calcula:

$$\det [D'] = \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} - \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \quad (3.1)$$

onde:

$$P_i = V_i^2 \cdot G_{ii} + V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos \theta_{ik} + B_{ik} \cdot \sin \theta_{ik}) \quad (3.2)$$

$$Q_i = V_i^2 \cdot B_{ii} + V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cdot \cos \theta_{ik}) \quad (3.3)$$

Resolvendo (3.1) com (3.2) e (3.3), obtém-se:

$$\begin{aligned} \det [D'] &= -V_i \cdot V_k^2 \cdot (G_{ik}^2 + B_{ik}^2) \\ &\quad + 2V_i^2 \cdot B_{ii} \cdot (V_k \cdot G_{ik} \cdot \sin \theta_{ik} - V_k \cdot B_{ik} \cdot \cos \theta_{ik}) \\ &\quad - 2V_i^2 \cdot G_{ii} \cdot (V_k \cdot G_{ik} \cdot \cos \theta_{ik} + V_k \cdot B_{ik} \cdot \cos \theta_{ik}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Fazendo  $Y_{ik}^2 = G_{ik}^2 + B_{ik}^2$  e multiplicando ambos os lados de (3.4) por  $V_i$ :

$$\begin{aligned} \det [D'] \cdot V_i &= -[V_i \cdot V_k \cdot Y_{ik}]^2 \\ &\quad + 2V_i^2 \cdot B_{ii} \cdot [V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cdot \cos \theta_{ik})] \\ &\quad - 2V_i^2 \cdot G_{ii} \cdot [V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos \theta_{ik} + B_{ik} \cdot \cos \theta_{ik})] \end{aligned} \quad (3.5)$$

Por outro lado, a potência aparente injetada na barra  $i$  é dada por . De (3.1) e (3.2), escreve-se:

$$\begin{aligned} S_i^2 &= P_i^2 + Q_i^2 = V_i^4 (G_{ii}^2 + B_{ii}^2) + V_i^2 \cdot V_k^2 \cdot Y_{ik}^2 \\ &\quad + 2V_i^2 \cdot G_{ii} \cdot V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos \theta_{ik} + B_{ik} \cdot \sin \theta_{ik}) \\ &\quad - 2V_i^2 \cdot B_{ii} \cdot V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cdot \cos \theta_{ik}) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Fazendo  $S_{i_0}^2 = V_i^2 \cdot Y_{ii}$  e comparando (3.4) com (3.5), obtém-se finalmente:

$$\det [D'] \cdot V_i = S_{i_0}^2 - S_i^2 \quad (3.7)$$

O resultado obtido em (3.7) é muito importante para o estudo do carregamento da rede. O termo  $S_{i_0}^2$  é função do elemento diagonal da matriz admitância de barra e do módulo da tensão na barra  $i$ . Supondo tensão constante na barra  $i$ , e aumentando gradativamente o valor da potência injetada  $S_i$ , o máximo será alcançado quando  $S_i^2$  for igual a  $S_{i_0}^2$  fazendo com que o produto  $\det [D'] \cdot V_i$  seja igual a zero.

Dessa forma pode-se dizer que para um sistema de duas barras:

$S_i$  é a potência injetada na barra  $i$  (no ponto de operação em análise).

$S_{i_0}$  é a potência aparente máxima que pode fluir para a barra  $i$ , para um certo módulo da tensão constante (dado por  $S_{i_0}^2 = V_i^2 \cdot Y_{ii}$ ).

$\det [D'] \cdot V_i$  é o indicador da distância de  $S_i^2$  a  $S_{i_0}^2$ .

O importante resultado obtido em (3.7) para um sistema de duas barras agora é estendido ao sistema multi-nó. Seja  $[D]$  a matriz que relaciona linearmente as injeções de potência ativa e reativa com o ângulo e módulo da tensão na barra  $i$ ,

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & z \\ y & u \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

seja:

$$[C \cdot A^{-1} \cdot B] = \begin{bmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Como em (2.20):  $[D'] = [D] - [C \cdot A^{-1} \cdot B]$ , e usando (3.8) e (3.9) pode-se

escrever:

$$\det [D'] = \det \left[ \begin{pmatrix} x & z \\ y & u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{pmatrix} \right] \quad (3.10)$$

De (3.10), obtém-se:

$$\det [D'] = [x \cdot u - y \cdot z] + [x \cdot b_4 - y \cdot b_3] + [b_1 \cdot u - b_2 \cdot z] + [b_1 \cdot b_4 - b_2 \cdot b_3] \quad (3.11)$$

como:

$$\det [D] = [x \cdot u - y \cdot z] \quad (3.12)$$

então:

$$\det [D'] = \det [D] + [x \cdot b_4 - y \cdot b_3] + [b_1 \cdot u - b_2 \cdot z] + [b_1 \cdot b_4 - b_2 \cdot b_3] \quad (3.13)$$

O resultado obtido em (3.7) para um sistema de duas barras, onde  $[D'] \equiv [D]$ , aqui repetido para comodidade,  $\det [D'] \cdot V_i = S_{i_0}^2 - S_i^2$  pode ser estendido. Pode-se escrever (3.13), multiplicando todos termos por  $V_i$ , na forma:

$$\det [D'] \cdot V_i = \det [D] \cdot V_i - S_{i_s}^2 \quad (3.14)$$

onde:

$$S_{i_s}^2 = -V_i \{ [xb_4 - yb_3] + [b_1u - b_2z] + [b_1b_4 - b_2b_3] \} \quad (3.15)$$



De (3.7), (3.14) pode ser re-escrita como:

$$\det [D'] \cdot V_i = S_{i_0}^2 - S_i^2 - S_{i_s}^2 \quad (3.16)$$

A expressão (3.16) é a generalização de (3.7) para um sistema multi-nó. O novo termo é, comparando (3.7) com (3.16):

$$S_{i_s}^2 = \left( \det [D] - \det [D'] \right) \cdot V_i \quad (3.17)$$

Dessa forma pode-se dizer que para um sistema multi-nó:

- $S_i$  é a potência injetada na barra  $i$  (no ponto de operação em análise).
- $S_{i_0}$  é a potência aparente máxima que pode ser injetada para a barra  $i$ , caso o sistema fosse de duas barras (dado por  $S_{i_0}^2 = V_i^2 \cdot Y_{ii}$ ).
- $S_{i_s}$  está relacionada à potência injetada no restante do sistema que limita a injeção de potência na barra  $i$  (dado por  $S_{i_s}^2 = \left( \det [D] - \det [D'] \right) \cdot V_i$ ).
- $S_m = \sqrt{(S_{i_0}^2 - S_{i_s}^2)}$  é a máxima potência aparente que poderia ser injetada na barra  $i$ .

Portanto,  $S_m - S_i$  é a margem de potência aparente entre o que está sendo injetado e o máximo calculado naquele ponto de operação.

## 3.2 Sinal do Determinante da Matriz [ D' ]

Usando-se um sistema de referência cartesiano, pode-se exprimir os vetores gradientes de potência ativa e reativa na barra  $i$  por:

$$\dot{\nabla}P = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot i - \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot j + 0 \cdot k \quad (3.18)$$

$$\dot{\nabla}Q = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \cdot i - \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \cdot j + 0 \cdot k \quad (3.19)$$

Assim, o produto vetorial é:

$$\dot{\nabla}P \cdot \dot{\nabla}Q = \left[ \left( \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \right) - \left( \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \right) \right] \cdot k \quad (3.20)$$

e então,

$$\dot{\nabla}P \cdot \dot{\nabla}Q = \det [D'] \quad (3.21)$$

Como:

$$\dot{\nabla}P \cdot \dot{\nabla}Q = [\nabla P] \cdot [\nabla Q] \cdot \sin \beta \quad (3.22)$$

tem-se:

$$\det [D'] = [\nabla P] \cdot [\nabla Q] \cdot \sin \beta \quad (3.23)$$

onde  $\beta$  é o ângulo entre  $\nabla P$  e  $\nabla Q$ .

Como o sinal de  $\det [D']$  é função somente do seno de  $\beta$ , tem-se:

$\det [D'] > 0$ , se  $\text{sen}\beta > 0$  isto é  $0^\circ < \beta < 180^\circ$

$\det [D'] < 0$ , se  $\text{sen}\beta < 0$  isto é  $0^\circ > \beta > -180^\circ$

$\det [D'] = 0$ , se  $\text{sen}\beta = 0$  isto é  $\beta = \pm 180^\circ$

Observa-se na Figura 14 que, tomando  $\nabla P_i$  como eixo de referência, na região normal de operação sempre ocorre  $0^\circ < \beta < 180^\circ$  e na região anormal sempre ocorre  $0^\circ > \beta > -180^\circ$ . No ponto máximo, os vetores gradientes  $\nabla P_i$  e  $\nabla Q_i$  estão alinhados, e então o ângulo  $\beta$  formado por esses dois vetores é  $180^\circ$ . Portanto,  $\det [D'] > 0$  caracteriza a parte superior da curva  $V \times [P, Q]$  e  $\det [D'] < 0$  caracteriza a parte inferior da mesma curva, enquanto que obviamente,  $\det [D'] = 0$  caracteriza a fronteira entre essas duas regiões, isto é, a “ponta do nariz”, como queríamos demonstrar.

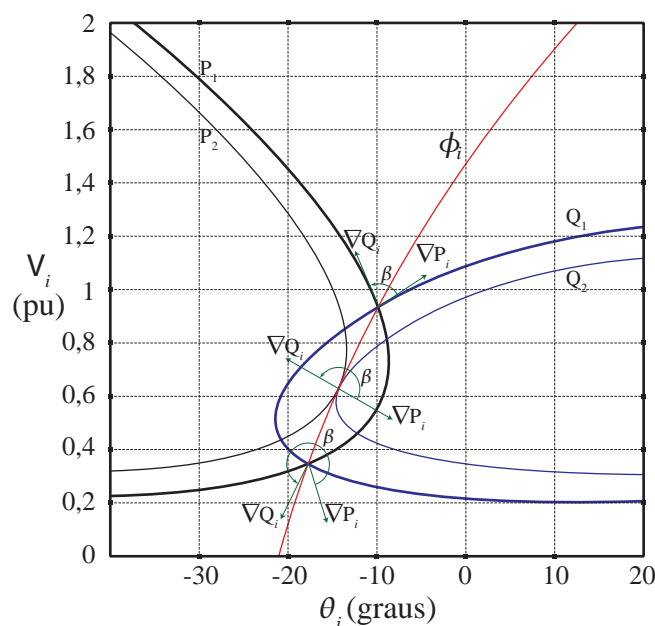


Figura 14: Localização dos Vetores Gradientes de  $P_i$  e  $Q_i$  no Plano  $V \times \theta$

E ainda, é fácil perceber que o ângulo  $\beta$  pode complementar a avaliação do carregamento da rede, indicando a região de operação e a distância angular até o máximo.

De acordo com a equação de Schur, se  $\det [D'] = 0$  então  $\det [J] = 0$ . Esta condição tem sido extensamente usada como característica do colapso de tensão e.g.

[11, 3], e foi primeiro proposta por Venikov [22]. Embora teoricamente correto, é numericamente verificável somente se a carga faz exatamente a máxima e se o processador numérico usado nos cálculos do determinante tenha infinitas casa decimais.

Portanto,  $\det [J]$  não é um índice adequado para ser usado em grandes sistemas. A outra possibilidade de obter-se numericamente  $\det [J] = 0$  é ter-se problemas de carregamento presentes em toda a rede. Como são normalmente confinados dentro de uma determinada área, mais uma vez o índice global  $\det [J]$  não é capaz de apontar numericamente o problema. Portanto, o índice nodal  $\det [J]$  é recomendado.

### 3.3 Margem de Potência

Como só se sabe se a margem  $S_m - S_i$  é grande ou pequena quando comparada com  $S_i$ , pode-se definir uma margem em pu. Esta margem seria igual à unidade quando a injeção  $S_i$  for nula, e igual a zero quando a injeção for máxima  $S_i = S_m$ . Esta margem é definida como:

$$M_i = \left( \text{sinal do } \det [D'] \right) \left( 1 - \frac{S_i}{S_m} \right) \quad (3.24)$$

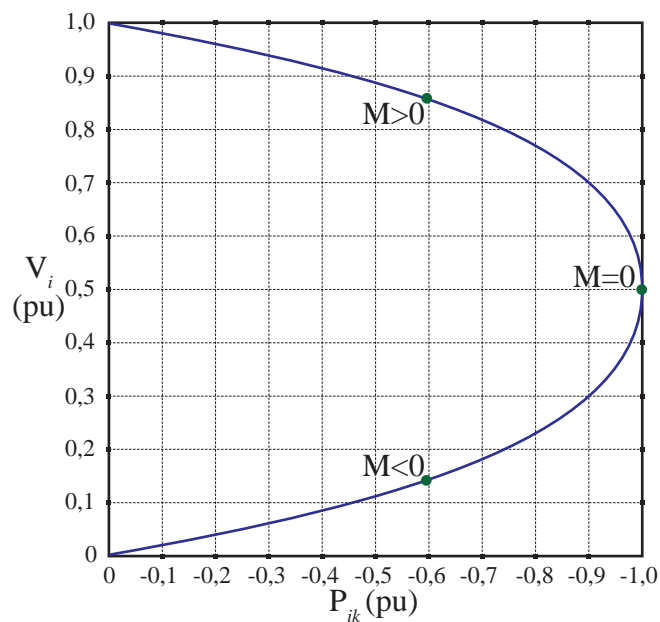
onde:

$M_i$  potência aparente em pu de  $S_m$  que ainda pode ser injetada na barra  $i$ ,

$S_i$  potência aparente injetada na barra  $i$ , no ponto de operação em análise,

$S_m$  máxima potência aparente que pode ser injetada na barra  $i$ , calculada no ponto de operação em análise.

A Figura 15 mostra que a margem é positiva na Região A normal de operação, negativa na Região B anormal e nula no ponto de máximo.

Figura 15: Sinal da Margem na Curva  $V \times P, Q$ 

### 3.4 Avaliação do Sistema Teste de 5 Barras e Visualização dos Índices Resultantes

Utiliza-se nos testes desta seção o sistema de 5 barras mostrado na Figura 16.

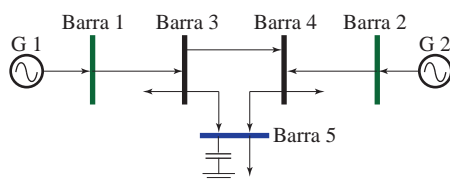


Figura 16: Sistema-Teste de 5 Barras, Caso base

Os dados de barra e os de linha do sistema são mostrados nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Dados de Barra do Sistema–Teste de 5 Barras

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt
Nº	Tipo	V (pu) min/max	$\theta$ (graus)	P (MW)	Q (MVA <sub>r</sub> )	P (MW)	Q (MVA <sub>r</sub> )	Y (MVA <sub>r</sub> )
1	V $\theta$	1,01	-	1	-999 +999	500	200	-
2	PV	0,90	-	300	-999 +805	-	-	-
3	PQ	1,00	-	-	-	30	20	-
4	PQ	1,00	-	-	-	20	30	-
5	PQ	1,00	-	-	-	1050	818	-

Tabela 2: Dados de Linha do Sistema–Teste de 5 Barras

De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (%)
1	3	0,03	2,00	0,00
2	4	0,03	2,00	0,00
3	4	0,01	2,00	0,00
4	5	0,01	1,00	0,00
5	5	0,01	1,00	0,00

A tabela 3 mostra os valores de geração e carga, enquanto a tabela 4 mostra os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos de transmissão (não há perdas ativas).

Tabela 3: Dados de Barra do Sistema – Teste de 5 Barras

Barra		Geração		Carga		Shunt
Nº	Tipo	P(MW)	Q(MVA <sub>r</sub> )	P(MW)	Q(MVA <sub>r</sub> )	Y(MVA <sub>r</sub> )
1	V $\theta$	946	771,6	-	-	-
2	PV	985	320,4	-	-	-
3	PQ	-	-	30	20	-
4	PQ	-	-	20	30	-
5	PQ	-	-	1050	818	-

Tabela 4: Fluxos de Potência nas Linhas / Caso–Base

F 1-3		F 2-4		F 3-4		F 3-5		F 4-5		Perdas
P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	Q
810,0	998,9	300,0	748,1	51,9	-100,4	722,7	677,6	329,3	452,2	879,2

A tabela 5 mostra os resultados da avaliação das condições de segurança de tensão. Dos índices  $\det[D']$  e  $\beta$ , pode-se observar que a barra 2 se encontra na região B de operação. Porém, o interesse neste exemplo é analisar a barra 5 de carga, cujos resultados mostram que esta barra praticamente encontra-se na “ponta do nariz”. A margem de potência aparente muito pequena impediria um eventual crescimento.

Tabela 5: Relatório de segurança de Tensão do Caso - Base

	Tensão	$S_{inj}$	$S_{máx}$	$\beta$	Margem
B1	0,908	12,866		179,2	100,0
B2	0,900	8,060	51,7	-11,5	-84,4
B3	0,707	0,361	1,2	179,8	70,0
B4	0,736	0,361	1,2	179,7	70,9
B5	0,619	13,310	13,3	179,9	0,1

Portanto, o próximo passo é determinar os caminhos críticos associados a esta barra.

## 4 *Caminhos de Transmissão Crítico*

### 4.1 Introdução

Uma vez que a avaliação do carregamento da rede de transmissão detectou uma barra de carga crítica em um determinado ponto de operação, a função “reforço” consiste do cálculo de ações de controle para aumentar a distância entre o (novo) ponto de operação e o (novo) máximo permitido. Muitas vezes isso pode ser conseguido através da alteração do perfil de tensão, isto é, através do redespacho de potência reativa e ações de controle de tensão. Muitas outras vezes, por exemplo, no caso de linhas longas de transmissão transportando grandes blocos de potência, o redespacho de potência ativa torna-se necessário. Uma barra de carga pode receber potência de mais de um caminho de transmissão. Suponha, por exemplo, dois geradores distintos conectados por duas linhas de transmissão distintas a uma única barra de carga. À medida que a carga cresce, toda a geração necessária vem de um único gerador carregando um único caminho de transmissão. A potência transmitida por esse caminho chega ao máximo. Obviamente que a carga pode continuar a crescer, desde que a potência passe a ser produzida no outro gerador e, conseqüentemente, a fluir pelo outro caminho de transmissão.

A idéia então é, uma vez detectada uma barra de carga crítica, verificar os diferentes caminhos de transmissão existentes, identificar um ou mais caminhos muito



carregados, redirecionar o fluxo de potência destes para outros caminhos menos carregados. Pode-se optar por, inicialmente redirecionar os fluxos por redespacho de potência reativa e, depois, se necessário, por redespacho de potência ativa.

## 4.2 Transformação do Sistema Multi-nó

Para simplificar o sistema e conseqüentemente a análise proposta, o primeiro procedimento é determinar, na rede inteira, a porção da rede realmente utilizada para transmitir potência ativa dos geradores até as barras terminais. Os seguintes passos estão envolvidos para a execução dessa idéia [21, 11]:

- Para achar as sub-redes basta verificar o sinal dos fluxos de potência ativa. As barras  $j$  conectadas à barra de carga terminal  $i$  pertencem à 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  $P_{kl} < 0$ . A busca acaba em barras geradoras  $m$  de potência ativa. A sub-rede está determinada.
- Para determinar a contribuição de geradores no carregamento de potência ativa do sistema, basta isolar a sub-rede do resto da rede ignorando 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 da sub-rede, não há fluxos de potência ativa chegando nela).

Tem-se agora um sistema de dimensões reduzidas, composto de uma barra de carga ligada por uma rede de transmissão, com vários nós intermediários, a um ou mais geradores [3].

### 4.2.1 Equivalente 1

O circuito de transmissão entre a barra terminal e as barras internas dos geradores deve ser identificado. A idéia mais simples incluiria os seguintes passos:

- transformar em admitâncias a carga de todas as outras barras de carga;
- assumir as tensões internas de todos os geradores iguais e, conseqüentemente, unir todas as barras internas das máquinas;
- eliminar todas as barras intermediárias entre a barra terminal e a barra interna (única) dos geradores e, conseqüentemente, calcular o circuito equivalente entre essas duas barras.

A Figura 17 ilustra, através de diagramas unifilares, a execução dos passos indicados, sobre um sistema originalmente de dois geradores, duas cargas e três linhas de transmissão. Das seis barras mostradas, duas correspondem aos nós internos das máquinas. Obtém-se ao final desses três passos um circuito composto de gerador, modelo  $\pi$  de transmissão e carga.

Os resultados conhecidos para o circuito de duas barras [Capítulo 2] poderiam ser aplicados para identificar se esse caminho de transmissão está muito carregado. (Para um circuito de duas barras, é possível o cálculo da tensão, em módulo e ângulo, no ponto de máximo carregamento. Compara-se então a tensão do ponto de operação em análise com a tensão crítica).

Os passos (i) e (iii) coincidem com a prática usual em estudos de estabilidade angular [9]. O passo (ii), no entanto, pode ser uma simplificação inadequada. Esse passo implica na perda da individualidade de cada gerador e o caminho de transmissão até a carga. Considere o exemplo da seção (3.1), o caso simples de um circuito de três barras, com uma carga sendo alimentada por duas linhas de transmissão, cada uma conectada a um gerador. Suponha que uma linha está completamente

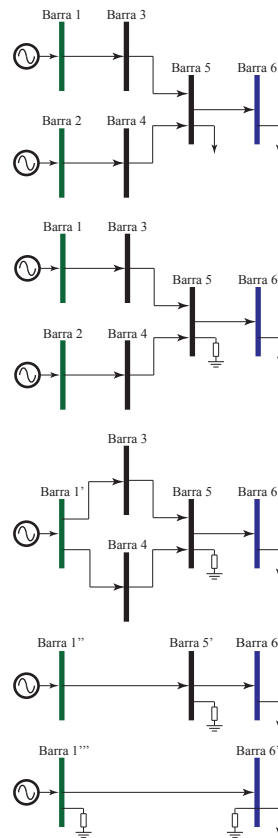


Figura 17: Equivalente de Duas Barras Assumindo Iguais as Tensões Internas dos Geradores

carregada e outra não. Aumentos na carga seriam possíveis somente se a geração-extra necessária fosse de responsabilidade do gerador conectado à linha com reservas de transmissão. Entretanto, se o sistema fosse reduzido a duas barras, conforme mencionado, o circuito equivalente de transmissão exibiria capacidade disponível de transmissão, mascarando o fato de que aumentos de carga não podem ser supridos sem uma distribuição de geração adequada. (Note que o conceito de barra swing é importante).

### 4.2.2 Equivalente 2

A fim de evitar o inconveniente mencionado, poderia se desenvolver um outro procedimento:

- transformar em admitância a carga de todas as outras barras de carga;
- eliminar todas as barras intermediárias entre a barra terminal e cada barra interna de gerador e, conseqüentemente, calcular o circuito equivalente entre a barra terminal e cada barra interna de gerador, assim como o circuito equivalente entre geradores.

A Figura 18 mostra o diagrama unifilar do sistema original e aqueles resultantes da execução dos passos indicados. Obtém-se ao final desses dois passos vários circuitos compostos de gerador, modelo  $\pi$  de transmissão, e a carga da barra terminal. Fica então mantida a individualidade de cada gerador em relação a sua contribuição para a carga.

Os resultados conhecidos para o circuito de duas barras poderiam ser aplicados, ressaltando-se que a carga de cada um dos vários circuitos de duas barras, seria o fluxo de potência ativa e reativa que chega na barra terminal através do circuito de transmissão correspondente. É possível vislumbrar no procedimento descrito um problema. É o caso da existência de dois ou mais caminhos de transmissão entre a barra terminal e um certo gerador.

No passo (ii), a eliminação das barras intermediárias em cada um dos caminhos de transmissão entre a barra terminal e aquele gerador, levaria a um único circuito equivalente de transmissão entre as duas barras. Novamente, esbarra-se com o problema de ter-se um caminho de transmissão completamente carregado e outro não, fato que seria mascarado pelo circuito equivalente único.

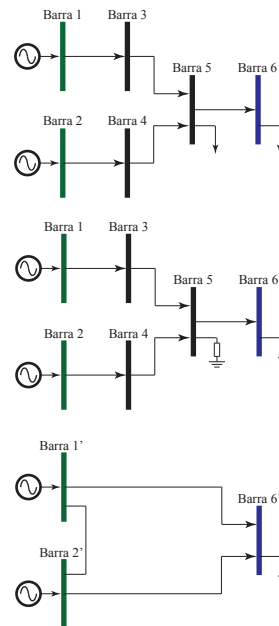


Figura 18: Equivalente de Duas Barras Mantendo a Individualidade dos Geradores

### 4.2.3 Equivalente 3

A solução para contornar o obstáculo mencionado é, obviamente, impedir que a individualidade dos caminhos de transmissão seja perdida. Assim, obtém-se ao final do procedimento vários circuitos compostos de gerador, modelo  $\pi$  de transmissão, e barra terminal, sendo que o mesmo gerador pode estar conectado à barra terminal por mais de um circuito  $\pi$  de transmissão.

Fica então mantida a individualidade de cada gerador, assim como de cada caminho de transmissão. Mais uma vez, a carga de cada um dos vários circuitos de duas barras resultantes é o fluxo de potência ativa e reativa que chega na barra terminal através do caminho de transmissão correspondente

A Figura 19 ilustra a idéia da manutenção da individualidade de geradores e caminhos de transmissão paralelos. O procedimento para se buscar os circuitos

de transmissão equivalentes entre a barra terminal e os geradores, seria procurar determinar na rede intacta, a porção da rede de transmissão realmente utilizada para transmitir potência ativa dos geradores até a barra terminal. Os seguintes passos estariam envolvidos para a execução dessa idéia:

- Como a barra de carga  $i$  terminal recebe potência ativa através de todos os ramos a ela conectados (por definição), todas as barras  $j$  conectadas à barra  $i$  através de um único ramo de transmissão, pertencem ao sub-sistema de transmissão procurado.

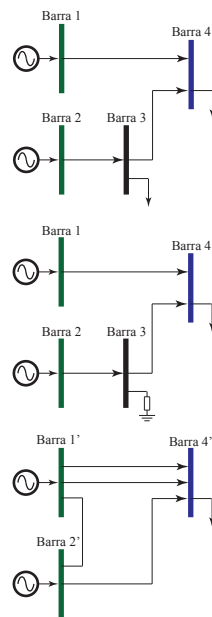


Figura 19: Equivalente de Duas Barras Mantendo a Individualidade dos Geradores e dos Caminhos de Transmissão

Para achar o sub-sistema basta verificar o sinal dos fluxos de potência ativa. Todas as barras  $j$  conectadas à barra  $i$  pertencem ao sub-sistema porque  $P_{ij} < 0$ . A barra  $k$  conectada a barra  $j$ , pertence ao sub-sistema se  $P_{jk} < 0$ . A barra  $l$  conectada a barra  $k$ , pertence ao sub-sistema se  $P_{kl} < 0$ . A busca acaba em barras geradoras  $m$  de potência ativa, não recebendo potência ativa de outro gerador.

O sub-sistema está determinado. Para ilustrar esse procedimento, utilizou-se o sistema IEEE 24-barras, cujo diagrama unifilar e as direções dos fluxos de potência são mostrados na Figura 20. Como exemplo, tomou-se a barra terminal 6. A Figura 21 mostra o sub-sistema de transmissão de potência ativa encontrado, seguindo-se as regras desse passo.

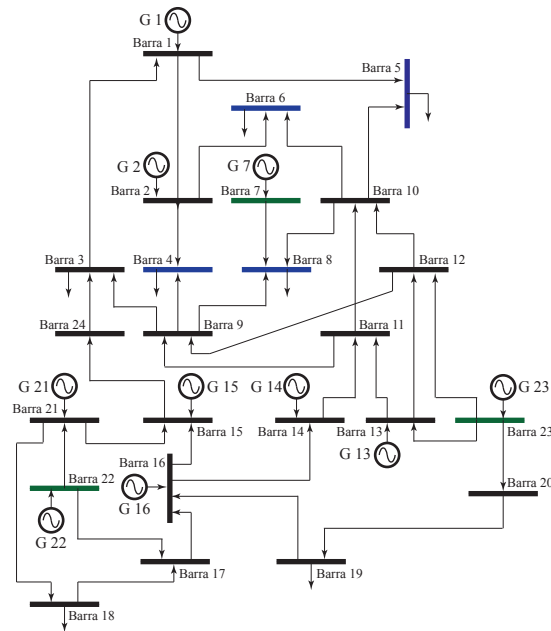


Figura 20: Sistema-Teste IEEE 24 Barras e a Direção dos Fluxos de Potência Ativa

Para isolar o sub-sistema do resto da rede é necessário transformar em admitâncias os fluxos de potência ativa que deixam o sub-sistema a partir dos nós intermediários, assim como os fluxos de potência reativa que deixam e que chegam ao sub-sistema. Deve-se notar que, por definição, não existem fluxos de potência ativa chegando ao sub-sistema.

Tem-se agora um sistema de dimensões reduzidas composto de uma barra de carga, ligada por uma rede de transmissão a um ou mais geradores. Para a eliminação das barras intermediárias, quando se utiliza o conceito de sub-sistema responsável pela transmissão de potência ativa até a barra de carga terminal, determina-se todos

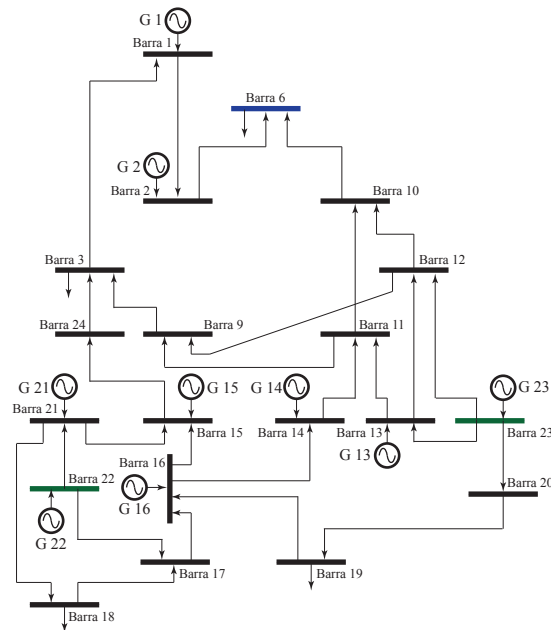


Figura 21: Subsistema de Transmissão de Potência Ativa para Alimentar a Barra 6

os caminhos de transmissão radiais entre a barra terminal e cada gerador. A execução dessa idéia envolveria os seguintes passos:

Cada barra  $j$  conectada por um único ramo de transmissão à barra terminal  $i$  define um caminho de transmissão radial. Note-se que  $P_{ij} < 0$ . Se existem  $n_j$  barras  $j$ , são definidos  $n_j$  caminhos. Para cada barra  $j$  existem  $n_k$  barras  $k$ , com  $P_{jk} < 0$ , a ela conectadas, e são definidos  $n_k - 1$  novos caminhos. Para cada barra  $k$  existem  $n_l$  barras  $l$ , com  $P_{kl} < 0$ , a ela conectadas, e são definidos  $n_l - 1$  novos caminhos. Cada caminho termina em um gerador  $m$  de potência ativa.

São definidos então, vários caminhos radiais contendo a barra  $i$ , uma barra  $j$ , uma barra  $k$ , uma barra  $l$ , ..., e uma barra geradora  $m$ .

A tabela 6 mostra os dados de geração e carga das barras do sistema IEEE 24-barras.

A tabela 7 mostra os dados de linha do sistema IEEE 24- barras, resistência,



Tabela 6: Dados de Barra do Sistema Brasileiro Simplificado de 34 Barras

Barra		Geração		Carga		Shunt
Nº	Tipo	$P_{(MW)}$	$Q_{(MVA_r)}$	$P_{(MW)}$	$Q_{(MVA_r)}$	$Y_{(MVA_r)}$
1	1	170	80	-50	80	
2		170	80	-50	80	
6						-100
7		270	180	0	180	
13		1024	240	0	240	
14		0	200	-50	200	
15		185	110	-50	110	
16		130	80	-50	80	
18		350	77,86	-50	200	
21		295	15,19	-50	200	
22		135	-29	-60	96	
23		655	167,7	-125	310	

reatância e susceptância.

A Figura 22 mostra alguns caminhos radiais obtidos para a alimentação da barra 6 do sistema - teste IEEE 24-barras. Esses caminhos radiais não são necessariamente independentes, podendo o mesmo ramo de transmissão aparecer em vários caminhos diferentes.

Para isolar um caminho radial de transmissão do resto do sistema é necessário transformar em admitâncias todos os fluxos de potência ativa e reativa que entram e saem do caminho em suas barras intermediárias.

Transformando-se as cargas das barras intermediárias em admitâncias e eliminando-se essas barras, tem-se um circuito equivalente de duas barras, como se queria obter.

Tabela 7: Dados de Linha do Sistema Brasileiro Simplificado de 34 barras

De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (%)	De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (%)
1	2	0,26	1,39	46,11	13	11	0,61	4,76	9,99
1	3	5,46	21,12	5,72	13	12	0,61	4,76	9,99
2	6	4,97	19,2	5,2	13	23	1,11	8,65	18,18
4	2	3,28	12,67	3,43	14	11	0,54	4,18	8,79
4	9	2,68	10,37	2,81	14	16	0,5	3,89	8,18
5	1	2,18	8,45	2,29	15	16	0,22	1,73	3,64
5	10	2,28	8,83	2,39	17	16	0,33	2,59	5,45
7	8	1,59	6,14	1,66	18	17	0,18	1,44	3,03
8	9	4,27	16,51	4,47	18	21	0,16	1,29	10,9
8	10	4,27	16,51	4,47	19	16	0,3	2,31	4,85
9	3	3,84	11,9	3,22	20	19	0,25	1,98	16,66
10	6	1,39	6,05	245,9	20	23	0,14	1,08	9,1
11	9	0,23	8,39		21	15	0,31	2,45	20,6
11	10	0,23	8,39		22	17	1,35	10,53	22,12
12	9	0,23	8,39		22	21	0,87	6,78	14,24
12	10	0,23	8,39		24	3	0,23	8,39	
12	23	1,24	9,66	20,3	24	15	0,67	5,19	10,91

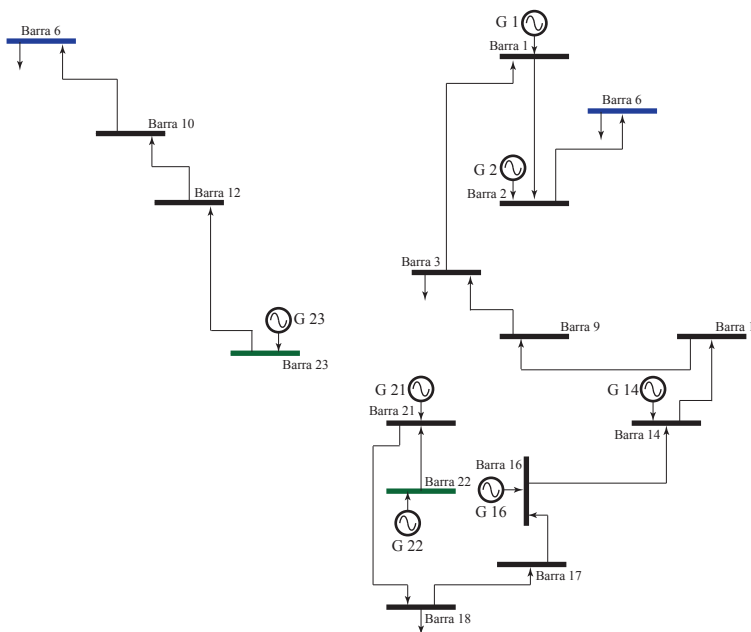


Figura 22: Alguns Caminhos de Transmissão de Potência Ativa para a Barra 6

A Figura 23 é um exemplo desse passo para a barra de carga 6 e a barra de geração 23, nesta figura temos o processo de redução do pior caminho para um equivalente de duas barras.

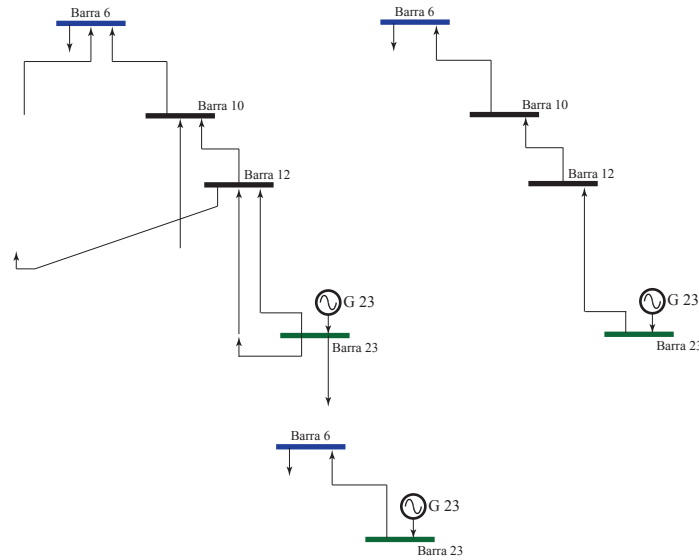


Figura 23: Redução de um Caminho de Transmissão a um Equivalente de Duas Barras

Nesta figura,  $Z_{10}$ ,  $Z_{12}$ ,  $G'$  e  $L'$  são calculados por (4.1, 4.2, 4.3 e 4.4):

$$Z_{10} = \frac{-V_{10}^2}{S_{10-6}^* + S_{10-12}^*} \quad (4.1)$$

$$Z_{12} = \frac{-V_{12}^2}{S_{12-10}^* + S_{12-23}^*} \quad (4.2)$$

$$G' = P_{23-12} + jQ_{23-12} \quad (4.3)$$

$$L' = P_{6-10} + jQ_{6-10} \quad (4.4)$$

Na tabela 8 mostra os Caminhos de Transmissão de Potência Ativa para a Barra 6 do sistema IEEE 24 da Fig. 20, um deles será o pior.

Tabela 8: Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 6.

6	2	1	3	9	11	13	23				
6	2	1	3	9	11	14	16	17	18	21	22
6	2	1	3	9	11	14	16	17	22		
6	2	1	3	9	11	14	16	19	20	23	
6	2	1	3	9	12	13	23				
6	2	1	3	9	12	23					
6	2	1	3	24	15	16	17	18	21	22	
6	2	1	3	24	15	16	17	22			
6	2	1	3	24	15	16	19	20	23		
6	2	1	3	24	15	21	22				
6	10	11	13	23							
6	10	11	14	16	17	18	21	22			
6	10	11	14	16	17	22					
6	10	11	14	16	19	20	23				
6	10	12	13	23							
6	10	12	23								

### 4.3 Eliminação de Barras Intermediárias

No texto precedente foi mencionada a necessidade de eliminação de barras de carga intermediárias entre a barra terminal e o gerador. Normalmente, como em estudos de estabilidade angular, a eliminação de barras de carga intermediárias é realizada através do cálculo do circuito equivalente pela técnica conhecida como "redução da rede" [6]. Seja a lei dos nós de Kirchhoff, escrita na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_3 \\ Y_2 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ V_1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

onde:

- $I$  é o vetor das correntes injetadas pelos geradores e consumida na barra terminal;
- $0$  corresponde ao somatório nulo das correntes nas outras barras, sendo a carga modelada por impedância;
- $V$  é o vetor das tensões nodais nos geradores e na barra terminal;
- $V_1$  é a tensão nodal nas outras barras.

A matriz formada pelas sub-matrizes  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  e  $Y_4$  é a matriz de admitâncias de barras. A redução da rede é feita com o seguinte cálculo:

$$I = [Y_{eq}]V \text{ com } Y_{eq} = Y_1 - Y_2Y_4^{-1}Y_3$$

onde:  $Y_{eq}$  é a matriz admitância de barras do circuito equivalente, e que já não inclui as barras intermediárias.

A rede reduzida depende das admitâncias da rede intacta, e também da tensão nodal das barras intermediárias, quando o modelo da carga é trocado de potência para impedância constante. Essa rede reduzida é composta de linhas de transmissão equivalentes fictícias e conseqüentemente, os fluxos de potência transmitidos por essa rede são fictícios, diferindo daqueles fluxos na rede intacta. As únicas grandezas que mantém o mesmo valor na rede intacta e na rede reduzida, são as tensões nodais em módulo e ângulo (para as mesmas gerações e cargas). Como o interesse é observar o "esforço de transmissão" de fluxos de potência ativa e reativa em linhas de transmissão, o esforço (queda de tensão e defasagem angular) pode ser medido na rede reduzida, já que a tensão no gerador, a tensão na carga, os fluxos de potência ativa e reativa que deixam o gerador, e os fluxos de potência ativa e reativa que chegam na carga são iguais no sistema original e no sistema de duas barras.

Quando se estuda o sistema equivalente de duas barras para determinar os caminhos associados a determinada barra, o interesse é comparar o valor da margem de potência das diferentes barras terminais de carga, o caminho crítico será aquele que tenha a menor margem. Assim, para calcular o ramo crítico a idéia é analisar os sub-caminhos que começam numa barra de geração incluindo um novo ramo de cada vez. Seqüencialmente, vai-se incluindo novos ramos até que o último sub-caminho inclua a barra de carga em análises. O ramo crítico será aquele que tenha a menor margem de potência. O subprograma CaTrans calcula os caminhos e ramos críticos associados à barra crítica, cuja lógica foi descrita na Seção (4.2) em função da margem de potência de cada sub-caminho.

## 4.4 Identificação do Caminho de Transmissão Mais Carregado

Para identificar o Caminho de Transmissão Mais Carregado, compara-se a carga no ponto de operação em análise com a carga máxima, calculada pelas fórmulas já mostradas. Com essa comparação é possível determinar se o ponto de operação em análise se encontra na parte superior ou na inferior da "curva do nariz" PV, e ainda, a "distância" ao ponto de máxima carga. O caminho de transmissão mais sobrecarregado é aquele que apresenta a menor margem entre a carga no ponto de operação em análise e a carga máxima que poderia ser atendida naquela barra [14].

## 4.5 Identificação do Ramo de Transmissão Crítico

O quarto procedimento é determinar analiticamente o ramo crítico do caminho mais carregado, i.e. o ramo que terá seu fluxo de potência ativa diminuído. A idéia é analisar os sub-caminhos que começam no gerador  $m$  incluindo um novo ramo de cada vez até chegar na barra de carga  $i$  em análise.

Analisa-se o carregamento do circuito de 2 barras composto pelo gerador, ramo  $m - k$ , e carga na barra  $k$  igual a  $-P_{jk} - jQ_{jk}$ , calculando-se a margem  $M_j$ . A seguir inclui-se o ramo  $k - j$ , elimina-se a barra intermediária  $k$ , e analisa-se o carregamento do circuito de 2 barras composto pelo gerador,  $\pi$  equivalente  $m - j$ , e carga na barra  $j$  igual a  $-P_{jm} - jQ_{jm}$ , calculando-se a margem  $M_j$ . Finalmente, inclui-se o ramo  $j - i$ , elimina-se a barra intermediária  $j$ , e analisa-se o carregamento do circuito de 2 barras composto pelo gerador,  $\pi$  equivalente  $m - i$ , e carga na barra  $i$  igual a  $-P_{im} - jQ_{im}$ , calculando-se a margem  $M_i$ . O ramo crítico é o ramo  $x - y$  se  $M_y$  é a menor margem entre  $M_i$ ,  $M_j$  e  $M_k$ . É fácil usar esse conceito em um caminho de transmissão composto por um número maior de ramos, o que é feito no exemplo numérico apresentado na aplicação que clarifica os procedimentos descritos nessa seção [14].

## 4.6 Aplicação

Uma vez determinada a barra crítica, o objetivo é identificar na rede de transmissão o caminho de transmissão de potência para esta a barra mais carregada, e aliviar o fluxo de potência nesse caminho para melhorar as condições de segurança de tensão do sistema

Utiliza-se nos testes desta seção o Sistema-Teste de 5 barras mostrado na Figura 16. A tabela 5 mostra os resultados da avaliação das condições de segurança de tensão. Dos índices M (Margem de Potência), pode-se observar que a barra 2 se encontra na Região B de operação. Porém, o interesse neste exemplo é analisar a barra 5 de carga, cujos resultados mostram que esta barra praticamente encontra-se na “ponta do nariz”. A margem de potência aparente muito pequena impediria um eventual crescimento de carga nessa barra. Portanto, o próximo passo é determinar os caminhos críticos associados a esta barra.

## 4.7 Identificação da Sub-Rede e do Caminho Mais Carregado

A direção dos fluxos de potência ativa está indicada no diagrama unifilar do sistema mostrado na Figura 16. É fácil verificar que a sub-rede (única) utilizada para transmitir potência para a barra de carga 5 inclui todas as barras e existem diversas rotas de potência ativa entre os geradores das barras 1, 2 e a barra de carga 5.

A tabela 9 apresenta os resultados do programa CaTrans com a determinação dos caminhos mais carregados de transmissão de potência para a barra crítica 5. São mostrados, em ordem decrescente a partir da pior margem. O sinal negativo da margem indica operação na parte inferior da curva. Pode-se dizer então que a tensão na barra 5 encontra-se na parte inferior da curva PV para todos os caminhos mais carregados mostrados.

Portanto, Comparando as margens, conclui-se que a pior situação é a que conecta a barra de carga 5 ao gerador swing 1 via 1-3-4-5.

## 4.8 Determinação do Ramo Crítico

O objetivo agora é determinar analiticamente o ramo crítico do caminho mais carregado, i.e. o ramo que terá seu fluxo de potência ativa diminuído. A idéia é analisar os sub-caminhos que começam no gerador 1 incluindo um novo ramo de cada vez. A tabela 10 mostra os sub-caminhos do caminho mais carregado, portanto, o 1º sub-caminho a ser analisado vai da barra 1 para a barra 3. Uma inspeção dos resultados na tabela 10 demonstra que a margem na barra 3 encontra-se "folgada" e o ponto de operação na parte superior da curva PV. A seguir, inclui-se novo ramo e, conseqüentemente, o 2º sub-caminho a ser analisado vai da barra 1 para a barra 3



Tabela 9: Determinação dos Caminhos Mais Carregados de Transmissão para a Barra 5

Caimnho de Transmissão 1-3-5					
	Tensão	Ângulo	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	0.9077	0.0000	8.1076	9.9894	12.8655
Carga	0.6186	-23.7763	7.2073	4.8130	8.6666
Carga Crítica	0.5062	-29.0556	7.5140	5.0180	9.0355
Caimnho de Transmissão 2-4-5					
	Tensão	Ângulo	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	0.9000	-10.5056	2.9999	7.4807	8.0598
Carga	0.6186	-23.7763	3.2876	3.3651	4.7045
Carga Crítica	0.4624	-31.8735	3.8260	3.9160	5.4748
Caimnho de Transmissão 1-3-4-5					
	Tensão	Ângulo	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	0.9077	0.0000	8.1076	9.9894	12.8655
Carga	0.6186	-23.7763	3.2876	3.3651	4.7045
Carga Crítica	0.5933	-24.8964	3.2950	3.3730	4.7153

	$S_{inj}$	$S_{máx}$	Margem
1-3-5	8.6667	9.0357	4.0834
2-4-5	4.7046	5.4754	14.0772
1-3-4-5	4.7046	4.7151	0.2222

e da barra 3 para a barra 4. Mais uma vez, os resultados da tabela 10 demonstram que a margem na barra 4 encontra-se "folgada" e o ponto de operação encontra-se na parte superior da curva. Finalmente, inclui-se o ramo da barra 4 para a barra 5, que é a barra em análise.

Na tabela 10, observando-se a margem para todos os sub-caminhos de transmissão, verifica-se que, quando da adição do 3º e último ramo, entre as barras 4 e 5.

Tabela 10: Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Mais Carregado de Transmissão para a Barra 5

Caimnho de Transmissão 1-3					
	Tensão	Ângulo	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	0.9077	0.0000	8.1076	9.9894	12.8655
Carga	0.7071	-14.3561	8.0473	5.9722	1.1753
Carga Crítica	0.5062	-26.2802	10.2880	7.6350	43.8203
Caimnho de Transmissão 1-3-4					
	Tensão	Ângulo	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	0.9077	0.0000	8.1076	9.9894	12.8655
Carga	0.7356	-15.5104	0.5186	-1.0547	10.0213
Carga Crítica	1.2374	-86.8600	19.3350	-39.3240	12.8116
Caimnho de Transmissão 1-3-4-5					
	Tensão	Ângulo	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	0.9077	0.0000	8.1076	9.9894	12.8655
Carga	0.6186	-23.7763	3.2876	3.3651	4.7045
Carga Crítica	0.5933	-24.8964	3.2950	3.3730	4.7153
	$S_{inj}$	$S_{máx}$	Margem		
1-3	10.0214	12.8112	21.7766		
1-3-4	1.1754	43.8199	-97.3177		
1-3-4-5	4.7046	4.7151	0.2222		

## 5 *Fatores de Participação*

As contribuições de cada fonte de energia aos ramos, perdas e fluxos complexos não pode ser encontrados usando a teoria de circuitos existentes. No entanto, as contribuições são a base para a alocação de carga suplementar em um ambiente competitivo. Para determinar as contribuições de forma precisa e inequívoca, são definidos a corrente ativa e reativa que flui em um ramo. Baseado nas definições e conceitos de diferencial total e integral definida, um novo método é derivado teoricamente para determinar as contribuições das gerações individuais nos fluxos e nas perdas de potência ativa o reativa. Existe uma relação não linear entre os componentes da potência complexa fluindo para dentro e para fora de um ramo de uma fonte de energia. Um método para determinar as contribuições das gerações individuais nos fluxos e nas perdas de potência ativa o reativa é apresentada na ref. [17].

Na ref. [2], a os fatores de distribuição topológica de geração e carga (topological generation and load distribution factors ou TGDF) são derivadas com base na metodologia de rastreamento do fluxo de potência [1]. Este método requer uma inversão de matrizes, e considera as perdas através da introdução de barras virtuais em todos os ramos. Este método foi utilizado como base do método de tarifação ex-ante em sistemas de transmissão em ref. [16].

Novos conceitos como domínio, subsistema, e caminhos foram introduzidas na ref. [10] para determinar as contribuições dos geradores no fornecimento de um

domínio, ou seja, o conjunto das barras fornecidas pelo conjunto de geradores. O método executa um processo longo de busca para formar os domínios e subsistemas, o qual foi feito para a potência ativa e potência reativa, uma de cada vez, mesmo se ocorre uma ligeira mudança no fluxo de potência.

Na ref. [5], é utilizada a teoria dos grafos para encontrar os fluxos de energia para sistemas sem fluxos de laço e um método para lidar com fluxos de laço foi introduzido na ref. [24]. O método faz uso de um número de matrizes de grandes dimensões, o que exige mais tempo para a criação e manipulação dessas matrizes. Além disso, é essencial para o método determinar em primeiro lugar a seqüência de rastreamento, como a maioria dos cálculos e ainda a ordenação das barras dependem dessa seqüência. O método não tem descrito como lidar com sistemas com mais de uma barra de carga terminal (sink node) ou mais de um gerador no início dos caminhos (source node).

Os fatores de distribuição de barras de geração (node generation distribution factors ou NGDF) para fluxos de potência ativa e reativa são calculados em forma separada na ref. [7], com base em um algoritmo de busca, que determina as direções do fluxo de potência. Para reduzir o consumo de tempo do algoritmo de busca, um método baseado em cálculos matriciais é apresentada na ref. [15], que obtém analiticamente as trajetórias de fluxo das barras de geração iniciais para as barras de carga terminais. No entanto, esse método substitui cada linha por duas linhas, uma para a transferência de energia e outra para as perdas, a consequência direta é o aumento da dimensionalidade, o tempo de solução, e a carga de cálculo do problema.

A partir da solução do fluxo de potência de um sistema, o modelo identifica as barras que são alimentadas por cada gerador do sistema. Em seguida verificam-se quais são as barras alimentadas pelo mesmo gerador, isto é, o caminho percorrido pelo fluxo de potência desta barra geradora. Conseqüentemente, o cálculo da contribuição de potência de cada barra geradora às barras de cargas e fluxos de cada ramo do caminho que liga esta barra geradora às barras de carga. Este algoritmo pode ser

aplicado tanto para fluxos de potência ativa quanto para fluxos de potência reativa.

Na Figura 24 temos os 4 tipos de barras nomeados de acordo a ref. [1]:

- Barras de Geração (*source node*).
- Barra de Geração intermediaria (*generation node*).
- Barra de Carga intermediaria (*sink node*).
- Barras de Carga terminal (*sink node*).

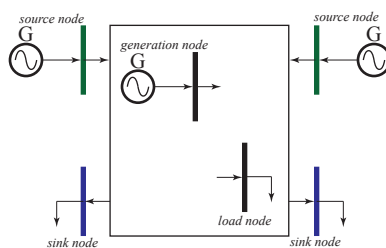


Figura 24: Tipos de barras

No seguinte exemplo da figura 25 temos os 4 tipos de barras:

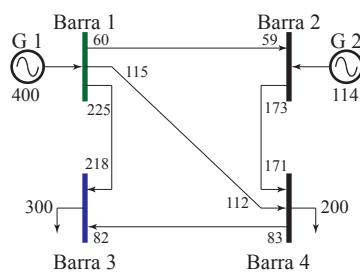


Figura 25: Sistema 4 Barras

Onde identificamos os 4 tipos de barras:

- Barras de Geração: Barra 1

- Barra de Geração intermediária: Barra 2
- Barra de Carga intermediária: Barra 4
- Barras de Carga terminal: Barra 3

## 5.1 Domínio de um determinado gerador

O domínio de uma barra geradora é definido como o conjunto de barras e fluxos dos ramos de transmissão que são alimentadas pela potência produzida por um determinado gerador. Este domínio somente é possível determinar se forem conhecidos os caminhos que o fluxo de potência, que deixa esta barra geradora, percorre até chegar as barras de carga [8]. Isto é feito através de um programa de fluxo de potência.

Como exemplo, é usado o sistema mostrado na Figura 16, indicando a direção e valor do fluxo de potência ativa nos ramos de distribuição (não há perdas ativas). Observa-se facilmente que o domínio do gerador G1 envolve todas as barras e fluxos do sistema (neste caso o sistema somente tem uma sub-rede) menos a barra 2 e o fluxo 2-4, enquanto que o domínio do gerador G2 inclui as barras 2, 4, 5 e os fluxos 2-4 e 4-5. Este modelo também permite o caminho inverso, ou seja, a partir de uma barra de carga pode-se chegar às barras de geração. Para este caso, observa-se no exemplo da Figura 16 que a barra 5 é alimentada pelas barras 3 e 4, conseqüentemente pelos geradores G1 e G2.

## 5.2 Identificação de Geradores

Os resultados obtidos até o momento apresentaram uma visão qualitativa do algoritmo. Para a análise quantitativa serão necessárias novas definições e a introdução de uma hipótese fundamental.

Os fluxos que entram em uma determinada barra são definidos como a soma das potências injetadas por geradores pertencentes à sub-rede. No caso da raiz, sabe-se que o fluxo injetado é proveniente somente do gerador pertencente a essa barra. A soma dos fluxos que entram em uma determinada barra terá sempre sinal positivo. O fluxo que deixa uma determinada barra é a diferença entre os fluxos que entram nessa barra e a carga, este fluxo é exportado por meio de ramos para ramos de níveis maiores.

Os resultados futuros dependerão da seguinte suposição:

“Para uma determinada barra, se a participação do fluxo que entra proveniente de um gerador  $i$  for  $x_i$  então a participação na carga, nos fluxos em ramos que deixam essa barra e conseqüentemente nas perdas também será  $x_i$ ”. Esta hipótese é a base para o cálculo da participação de cada gerador no atendimento às barras de carga. Utilizando-se as seguintes notações:

- $C_{ij}$  índice de participação do gerador  $i$  na carga e no fluxo que deixa uma determinada barra  $j$ ;
- $C_{ik}$  índice de participação do gerador  $i$  na carga e no fluxo que deixa uma determinada barra  $k$ ;
- $F_{jk}$  fluxo no ramo entre as barras  $j$  e  $k$ ;
- $F_{ijk}$  contribuição absoluta ou fluxo no ramo entre as barras  $j$  e  $k$ , provenientes do gerador  $i$ ;
- $I_k$  fluxo que entra na barra  $k$ .

Então,

$$F_{ijk} = C_{ij} \cdot F_{jk} \quad (5.1)$$

$$I_k = \sum_j F_{jk} \quad (5.2)$$

$$C_{ik} = \frac{\sum_j F_{ijk}}{I_k} \quad (5.3)$$

As equações (5.1), (5.2) e (5.3) podem ser utilizadas para determinar a participação de cada gerador em cada barra e nos ramos do sistema. Pela análise da Figura 16, os fluxos que entram na raiz são provenientes dos geradores correspondentes. Portanto, a participação destes geradores nos fluxos que deixam a raiz pode ser calculada por (5.1), (5.2) e (5.3), e com isso pode-se determinar a participação dos demais geradores nos conjuntos de nível superior.

### 5.3 Caminhos de Transmissão

A Figura (26) mostra os caminhos de transmissão do Sistema - Teste de 5 barras.

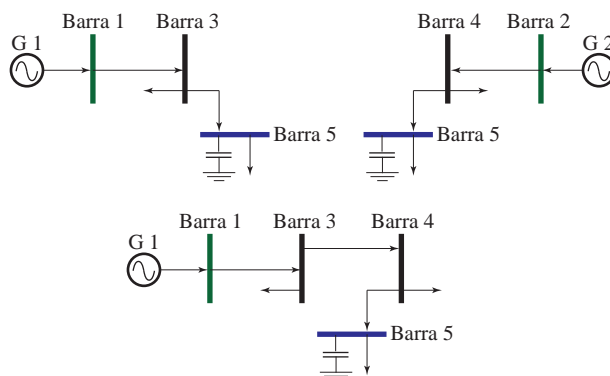


Figura 26: Caminhos de Transmissão – Sistema de 5 Barras

A tabela 11 apresenta a participação dos geradores nos fluxos dos ramos indicando o nível dos fluxos de acordo ao número de geradores participantes.



Tabela 11: Participação de Geradores nos Ramos do Sistema-Teste de 5 Barras

Fluxo no ramo	Participação de geradores	Nível
1 – 3	G1	1
3 – 4	G1	1
2 – 4	G2	1
3 – 5	G1	1
4 – 5	G1 e G2	2

Considerando a Barra 1 e 2 como barras de geração, então:

A contribuição absoluta na entrada da Barra 1 é:  $F_{G1} : 550MW$

A contribuição relativa na saída da Barra 1:  $C_{G1} = \frac{550MW}{550MW} = 1pu$

Contribuição absoluta na entrada da Barra 2:  $F_{G2} : 500MW$

Índice de participação na saída da Barra 2:  $C_{G2} = \frac{500MW}{500MW} = 1pu$

Contribuição absoluta na entrada da Barra 3:  $F_{G1} : 550 \times 1 = 550$

Índice de participação na saída da Barra 3:  $C_{G1} = \frac{550MW}{550MW} = 1pu$

Contribuição absoluta na entrada da Barra 4:

$$F_{G1} : 15 \times 1 = 15$$

$$F_{G2} : 500 \times 1 = 500$$

Índice de participação na saída da Barra 4:

$$C_{G1} = \frac{15MW}{515MW} = 0,029pu$$

$$C_{G2} = \frac{500MW}{515MW} = 0,971pu$$

Contribuição absoluta na entrada da Barra 5:

$$F_{G1} - 1 : 505 \times 1 = 505$$

$$F_{G1} - 2 : 495 \times 0,029 = 14,355$$

$$F_{G2} : 495 \times 0,971 = 480,645$$

Índice de participação na saída da Barra 5:

$$C_{G1} = \frac{505+14,355\text{MW}}{1000\text{MW}} = \frac{519,355\text{MW}}{1000\text{MW}} = 0,52\text{pu}$$

$$C_{G2} = \frac{480,645\text{MW}}{1000\text{MW}} = 0,48\text{pu}$$

Os resultados encontrados indicam que a participação dos geradores é fornecida pelo índice de participação na saída das barras.

Desta forma: a carga nessas barras, os fluxos nos ramos de transmissão que deixam essas barras e conseqüentemente as perdas estarão afetados pelos índices determinados.

Tabela 12: Fatores de Participação de Geradores nos Ramos do Sistema-Teste de 5 Barras

Item		% de Participação		Sub-sistema
		G1	G2	
Barras	1	100,0	0,0	01
	2	0,0	100,0	01
	3	100,0	0,0	01
	4	2,9	97,1	01
	5	52,0	48,0	01
Fluxos	1-3	100,0	0,0	01
	2-4	0,0	100,0	01
	3-4	100,0	0,0,	01
	3-5	100,0	0,0	01
	4-5	2,9	97,1	01

Observando-se a tabela 12, percebe-se que o sistema teste de 5 barras da Figura 16 somente compreende 1 subsistema; Analisando o índice de participação na saída da barra 3 nota-se que: a carga, o fluxo 3-4, e o fluxo 3-5 terão 100% de participação do gerador 1(não há perdas). O índice de participação na saída da barra 4 indica que tanto a carga nessa barra e o fluxo 4-5 terão participação de 2,9 % do gerador

1 e 97,1 % do gerador 2 e o índice de participação na saída da barra 5 indica que a carga nessa barra tem participação de 52 % do gerador 1 e 48 % do gerador 2.

## 5.4 Procedimento para calcular os fatores de participação

O procedimento para calcular os fatores de participação em potência reativa é similar ao utilizado em potência ativa, a diferença é a identificação de linhas geradoras de potência reativa.

- Identificar:
  - Geradores
    - \* Terminal
    - \* Intermediário
  - Linhas geradoras
    - \* Terminal
    - \* Intermediário
  - Consumidores
    - \* Terminal
    - \* Intermediário
- Encontrar caminhos de transmissão
- Calcular fatores de linha
- Calcular fatores de Participação

## *6 Metodologia de Reforço da Segurança de Tensão em Barras de Carga*

O método proposto consiste em, primeiramente, usando um Programa de Avaliação de Segurança de Tensão descrita no capítulo 2 determinar uma barra crítica do sistema através do cálculo da Margem de Potência, em seguida com o programa computacional CaTrans, determina-se o ramo crítico do caminho de transmissão crítico associado a àquela barra crítica, também são determinados os fatores de participação. Finalmente é aplicado um programa de Fluxo de Potência Ótimo para aliviar o carregamento desse caminho. Utiliza-se a função objetivo “Desvio de Potência Ativa” para, desta forma, reforçar as condições de operação (segurança) do sistema.

Uma vez que a avaliação do carregamento da rede de transmissão detectou uma barra de carga crítica em um determinado ponto de operação, a função “reforço” consiste do cálculo de ações de controle para aumentar a distância entre o (novo) ponto de operação e o (novo) máximo permitido. Muitas vezes isso pode ser conseguido através da alteração do perfil de tensão, isto é, através do redespacho de potência reativa e ações de controle de tensão. Muitas outras vezes, por exemplo, no caso de linhas longas de transmissão transportando grandes blocos de potência, o redespacho de potência ativa torna-se necessário. Novos valores de geração de potência ativa são calculados de tal forma a minimizar o somatório dos quadrados dos desvios em

relação aos valores de geração de potência ativa fornecidos nos dados da rede elétrica.

A metodologia a seguir descreve os seguintes passos:

- Caso Base
- Reforço potência reativa
- Reforço potência ativa

Para cada um desses passos seguir o seguinte procedimento:

- Cálculo dos índices de estabilidade
- Encontrar o ramo crítico do caminho de transmissão crítico
- Fatores de participação na barra crítica
- Fluxo de Potência ótimo

Fazer uma comparação da evolução dos índices de estabilidade e fatores de participação em cada iteração.

Um aspecto muito importante e a visualização do sistema em forma de grafos, um grafo permite visualizar rapidamente as barras de geração inicial (*source node*), barras de carga terminal (*sink node*), barras de geração intermediária (*generation node*), barras de carga intermediária (*load node*), os fluxos de potência, e os caminhos de transmissão. Na fig. 27 temos o grafo associado ao sistema IEEE 24 da Fig. 20, se percebe rapidamente que os grafos são uma ferramenta muito efectiva para a visualização de redes de energia elétrica, não tanto assim no cálculo computacional, já que utilizam a recursão que consome muitos recursos tais como memória e tempo de processamento.

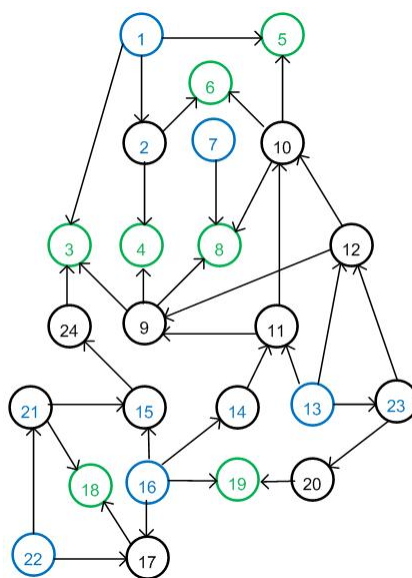


Figura 27: Sistema IEEE 24 Barras, Caso base

## 6.1 Aplicação no Sistema Teste - 5 Barras

Apresenta-se uma metodologia para reforçar as condições de segurança de tensão em barras de carga.

Essa tarefa envolve a utilização dos programas ESTABTEN que faz a avaliação das condições nodais de carregamento, e FLUPOT que minimiza o fluxo de potência em ramos de transmissão críticos através do redespacho de potência reativa e/ou ativa. Utiliza-se a função objetivo Desvio de Potência Ativa para desta forma, reforçar as condições de operação (estabilidade) do sistema. Novos valores de geração de potência ativa são calculados de tal forma a minimizar o somatório dos quadrados dos desvios em relação aos valores de geração de potência ativa fornecidos nos dados da rede elétrica. Esta opção é importante no caso brasileiro com predominância hidrelétrica, pois o despacho de potência ativa nas usinas pode ter sido calculado previamente segundo outros critérios como a otimização da operação dos reservatórios.

Este estudo analisa duas etapas de reforço das condições de segurança de tensão do sistema:

- i) minimizando o fluxo de potência ativa no ramo crítico por redespacho reativo,
- ii) minimizando o fluxo de potência ativa no ramo crítico por redespacho ativo.

O caso do redespacho de potência ativa é limitada pelo mínimo desvio padrão.

### 6.1.1 Descrição

Utiliza-se nos testes desta seção o sistema de 5 barras mostrado na Figura 16 os dados de barra e os de linha do sistema são mostrados nas tabelas 1 e 2.

### 6.1.2 Caso Base

A tabela 3 mostra os valores de geração e carga, enquanto que a tabela 4 mostra os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos de transmissão (não há perdas ativas).

A tabela 5 aqui repetido (tabela 13) mostra os resultados da avaliação das condições de segurança de tensão. Dos índices *margem* e  $\beta$ , pode-se observar que a barra 2 se encontra na região B de operação. Porém, o interesse neste exemplo é analisar a barra 5 de carga, cujos resultados mostram que esta barra praticamente encontra-se na “ponta do nariz”. A margem de potência aparente muito pequena impediria um eventual crescimento de carga nessa barra. Portanto, o próximo passo é determinar os caminhos críticos associados a esta barra. O ângulo  $\beta$  vale  $179,9^\circ$  para um máximo de  $180^\circ$ . Portanto o objetivo é aumentar a margem de potência da barra de carga 5 partindo do ponto de colapso ilustrado na seguinte tabela e mostrado no capítulo 3.

Essa tarefa envolve a utilização dos programas ESTABTEN que faz a avaliação das condições nodais de carregamento, CaTrans que determina os caminhos de trans-

missão críticos, o programa desenvolvido para determinar os fatores de participação e FLUPOT que minimiza o fluxo de potência em ramos de transmissão através do redespacho de potência reativa e/ou ativa mediante o mínimo desvio padrão.

Tabela 13: Relatório de segurança de Tensão do Caso - Base

	Tensão	$S_{inj}$	$S_{máx}$	$\beta$	Margem
B1	0,908	12,866		179,2	100,0
B2	0,900	8,060	51,7	-11,5	-84,4
B3	0,707	0,361	1,2	179,8	70,0
B4	0,736	0,361	1,2	179,7	70,9
B5	0,619	13,310	13,3	179,9	0,1

A tabela14 mostra os fatores de participação nas barras de carga, o calculo foi realizado utilizando a metodologia do capítulo 5.

Tabela 14: Fatores de Participação Caso - Base

	G1(%)	G2(%)
B3	100,00	0,00
B4	14,85	85,15
B5	73,32	26,68

### 6.1.3 Etapa I de Reforço (Potência Reativa)

A partir do ponto do Caso-Base analisa-se a possibilidade de reforço considerando somente redespacho de potência reativa, ou seja, com 0% de variação na geração de potência ativa no sistema. Por consequencia, o reforço das condições de segurança de tensão só é possível a traves da alteração do perfil de tensão.

Nas tabelas 15 e 16 temos os fluxos de potencia ativa nas linhas de transmissão e o relatório de segurança de tensão do caso base com os índices de avaliação e o margem de estabilidade em cada barra para o reforço de potencia reativa.



A Tabela 16 mostra as condições de segurança de tensão das barras do sistema de 5 barras avaliadas pelo programa ESTABTEN após a atuação do programa FLUPOT. O redespacho de potência reativa causou um aumento na margem  $M = (1 - S_i/S_{max})$  de 0,1 para 5,7. O aumento da margem de potência na barra 5 implicou em uma diminuição das perdas reativas na rede de 55.5 MVar.

Tabela 15: Fluxos de Potência nas Linhas após a Etapa I

F 1-3		F 2-4		F 3-4		F 3-5		F 4-5		Perdas
P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	Q
810,2	999,0	300,0	692,6	50,3	-85,3	723,9	676,5	328,1	433,2	823,7

Tabela 16: Relatório de segurança de Tensão após a Etapa I

	Tensão	$S_{inj}$	$S_{máx}$	$\beta$	Margem
B1	0,924	12,862		151,6	100,0
B2	0,901	7,548	37,5	-21,8	-79,9
B3	0,725	0,361	7,6	172,2	95,3
B4	0,749	0,361	7,8	167,5	95,4
B5	0,639	13,310	14,1	175,4	5,7

Se a margem actual de 5,7% for considerado aceitável o problema está resolvido. Em adição ou alternativamente, questão a ser estudada, pode-se incluir o redespacho de potência ativa.

## 6.1.4 Etapa II de Reforço

### 6.1.4.1 Potência Ativa - I

Observando-se a Tabela 16, percebe-se que a barra 5 continua sendo a barra de carga mais crítica. Calcula-se os caminhos críticos para a barra 5 no novo ponto de operação após a Etapa 1 de Reforço, isto é, após o redespacho reativo.

Aplicandose o programa CATRANS, a Tabela 17 mostra que o pior caminho novamente envolve as barras 1, 3, 4, 5 e a tensão na barra terminal encontra-se na Região B só para o caminho completo, quando a barra terminal é a barra 5. Essa condição é indicada pelo sinal negativo no valor da distância. Portanto, afirma-se que o ramo crítico é aquele entre as barras 3 e 4. O problema foi considerado resolvido. Nada impede, entretanto, que se passe a minimizar o fluxo de potência ativa no ramo mais crítico do caminho crítico (por mais leve que seja a carga, sempre há barra, caminho e ramo críticos).

Tabela 17: Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão para o Ponto de Operação após a Etapa I de Reforço

	Voltagem no Gerador		Voltagem na Carga		$S_i$ (pu)	$S_m$ (pu)	Margem (%)
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo			
C1-3	0.9236	0,000	0.7254	-13.7298	10.1018	13.1896	23.4115
C1-3-4	0.9236	0,000	0.7490	-14.8006	1.0230	38.7024	-
C1-3-4-5	0.9236	0,000	0.6389	-22.6305	4.6351	4.6897	<b>97.3568</b> 1.1635

Aplicando o programa de cálculo de fatores de participação na saída da Etapa I de reforço, a tabela 18 mostra os Fatores de Participação de Geradores nas barras do Sistema Teste de 5 barras após a Etapa I.

Tabela 18: Fatores de Participação nas linhas e barras do Sistema de 5 barras após a Etapa I

Item		% de Participação		Sub-sistema
		G1	G2	
Barras	1	100,0	0,0	1
	2	0,0	100,0	1
	3	100,0	0,0	1
	4	14,45	85,55	1
	5	<b>73,3</b>	<b>26,7</b>	1
Fluxos	1-3	100,0	0,0	1
	2-4	0,0	100,0	1
	3-4	100,0	0,0	1
	3-5	100,0	0,0	1
	4-5	14,45	85,55	1

Observando-se a tabela 18, percebe-se que o sistema teste de 5 barras da Figura 16 somente compreende 1 subsistema; Analisando o índice de participação na saída da barra 3 nota-se que: a carga, o fluxo 3-4, e o fluxo 3-5 terão 100% de participação do gerador 1 (não há perdas). O índice de participação na saída da barra 4 indica que tanto a carga nessa barra e o fluxo 4-5 terão participação de 14,45% do Gerador 1 e 85,55% do Gerador 2 e o índice de participação na saída da barra 5 indica que a carga nessa barra tem participação de 73,3 % do gerador 1 e 26,7 % do gerador 2. Por tanto, o redespacho de potência ativa é a través do Gerador 2.

A partir do ponto de operação após a Etapa 1, o programa FLUPOT é usado com sua função objetivo mínimo desvio padrão na geração do Gerador 1 (por ter maior participação na Barra 5). A Tabela 19 mostra as condições de estabilidade de tensão no sistema, avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo de potência ativa no ramo crítico pertencente ao pior caminho de transmissão.

Tabela 19: Relatório de segurança de Tensão / Etapa II (P. Ativa I)

	Tensão	$S_{inj}$	$S_{máx}$	$\beta$	Margem
B1	0,935	10,596	10,6	0,0	0,0
B2	0,998	8,649	18,3	92,4	52,7
B3	0,799	0,361	25,7	123,0	98,6
B4	0,838	0,361	17,5	114,3	97,9
B5	0,731	13,310	20,1	141,5	33,9

A tabela 20 mostra os fluxos de potencia ativa nas linhas de transmissão para a primeira iteração do reforço de potencia ativa.

Tabela 20: Fluxos de Potência nas Linhas / Etapa I (P. Ativa I)

F 1-3		F 2-4		F 3-4		F 3-5		F 4-5		Perdas
P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	Q
791,6	704,03	316,3	805,0	41,8	-153,6	716,0	581,1	335,8	463,2	641,3

#### 6.1.4.2 Potência Ativa - II

Na Tabela 19, percebe-se que a barra 5 continua sendo a barra de carga mais crítica. Calcula-se os caminhos críticos para a barra 5 no novo ponto de operação após a Etapa 1 de Reforço, isto é, após o redespacho ativo I.

Aplicandose o programa CATRANS, a Tabela 21 mostra que o pior caminho novamente envolve as barras 1, 3, 4, 5 e a tensão na barra terminal encontra-se na Região B só para o caminho completo, quando a barra terminal é a barra 5. Essa condição é indicada pelo sinal negativo no valor da distância. Portanto, afirma-se que o ramo crítico é aquele entre as barras 4 e 5. O problema foi considerado resolvido já que a margem em todos os sub-caminhos são positivos.

Tabela 21: Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão para o Ponto de Operação após a Etapa II (P. Ativa I) de Reforço

	Voltagem no Gerador		Voltagem na Carga		$S_i$ (pu)	$S_m$ (pu)	Margem (%)
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo			
C1-3	0.9350	0,000	0.7995	-12.0628	9.0598	14.5026	37.5296
C1-3-4	0.9350	0,000	0.8379	-12.7910	1.6689	135.7941	98.7710
C1-3-4-5	0.9350	0,000	0.7313	-19.0398	4.9932	5.2003	<b>3.9826</b>

O ponto de operação obtido após a Etapa II de reforço é considerado o melhor possível. Além deste ponto, não foi possível conseguir mais reforço no sistema. Em todas as tentativas, a margem sempre diminuiu.

Aplicando o programa de cálculo de fatores de participação na saída da Etapa I de reforço, a tabela 22 mostra os Fatores de Participação de Geradores nas barras do Sistema Teste de 5 barras após a Etapa II.

Tabela 22: Fatores de Participação nas linhas e barras do Sistema de 5 barras após a Etapa II (P. Ativa I)

Item		% de Participação		Sub-sistema
		G1	G2	
Barras	1	100,0	0,0	01
	2	0,0	100,0	01
	3	100,0	0,0	01
	4	11,75	88,25	01
	5	<b>72,80</b>	<b>27,20</b>	01
Fluxos	1-3	100,0	0,0	01
	2-4	0,0	100,0	01
	3-4	100,0	0,0	01
	3-5	100,0	0,0	01
	4-5	11,75	88,25	01

Nas tabelas 23 e 24 temos os fluxos de potencia ativa nas linhas de transmissão e o relatório de segurança de tensão do caso base com os índices de avaliação e o

margem de estabilidade em cada barra para a segunda iteração do reforço de potencia ativa.

Tabela 23: Fluxos de Potência nas Linhas / Etapa II (P. Ativa II)

F 1-3		F 2-4		F 3-4		F 3-5		F 4-5		Perdas
P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	Q
801,8	717,1	316,3	805,0	44,0	-152,5	723,8	584,9	338,0	463,7	654,1

Tabela 24: Relatório de segurança de Tensão da Etapa II (P. Ativa II)

	Tensão	$S_{inj}$	$S_{máx}$	$\beta$	Margem
B1	0,935	10,757	10,8	0,0	0,0
B2	0,996	8,649	18,2	92,8	52,4
B3	0,797	0,361	25,4	123,7	98,6
B4	0,835	0,361	17,3	115,3	97,9
B5	0,729	13,389	20,0	142,5	33,1

Aplicando o programa de cálculo de fatores de participação na saída da Etapa I de reforço, a tabela 25 mostra os Fatores de Participação de Geradores nas barras do Sistema Teste de 5 barras após a Etapa II.

Tabela 25: Fatores de Participação nas linhas e barras do Sistema de 5 barras após a Etapa II (P. Ativa II)

Item		% de Participação		Sub-sistema
		G1	G2	
Barras	1	100,0	0,0	01
	2	0,0	100,0	01
	3	100,0	0,0	01
	4	10,56	89,44	01
	5	<b>70,95</b>	<b>29,05</b>	01
Fluxos	1-3	100,0	0,0	01
	2-4	0,0	100,0	01
	3-4	100,0	0,0	01
	3-5	100,0	0,0	01
	4-5	10,56	89,44	01

A Tabela 26 mostra a evolução da margem, as perdas reativas e os fatores de participação dos geradores na barra de carga 5, correspondente ao redespacho reativo e ativo.

Tabela 26: Evolução do Reforço da segurança de tensão em barras de carga Sistema 5b

De	Barra Crítica	Ramo Crítico	Fatores de Participação		Margem (%)	Perdas MVar	$\Delta$ (%)	
			G1	G2			G1	G2
Caso Base	5	4-3	0,7332	0,2668	0,1	879,2	45,67	54,33
Reforço P. Reativa	5	4-3	0,7330	0,2670	5,7	823,7	45,70	54,30
Reforço P. Ativa 1	5	5-4	0,7280	0,2720	33,9	641,3	49,51	50,49
Reforço P. Ativa 2	5	5-4	0,7095	0,2905	52,4	610,5	49,72	50,28

O índice  $\Delta$  é utilizado para fazer a escolha do gerador em cada iteração do reforço de tensão, a tabela 26 mostra os fatores de participação dos geradores G1 e G2 e o  $\Delta_{G1}$  e  $\Delta_{G2}$  para cada iteração, no final os valores  $\Delta_{Gx}$  tendem ao equilíbrio.

A figura 28 mostra a evolução da margem de potência no Sistema Teste de 5 barras.

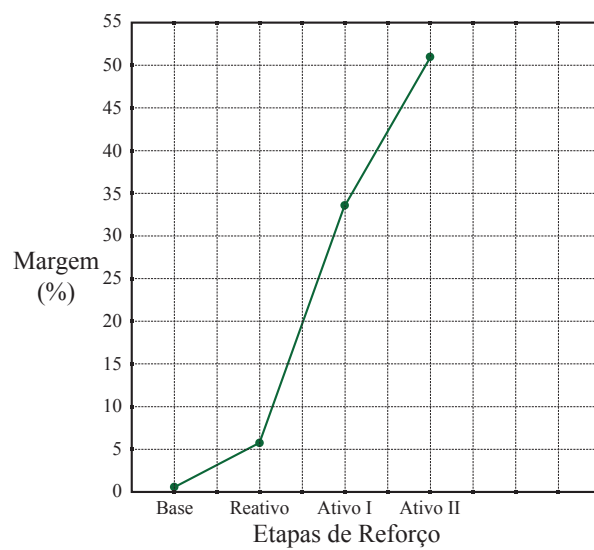


Figura 28: Evolução da margem de potência no Sistema Teste de 5 barras

A figura 29 mostra a evolução dos fatores de participação na Barra 5 do Sistema Teste de 5 barras.

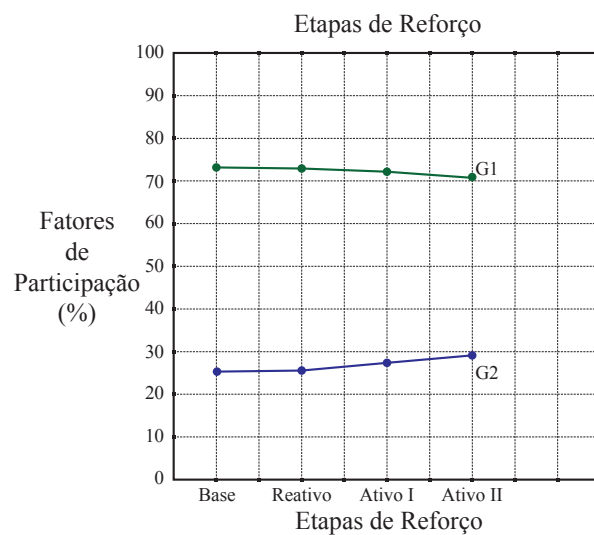


Figura 29: Evolução dos fatores de participação na Barra 5 do Sistema Teste de 5 barras



A figura 30 mostra a evolução das perdas de potência reativa no Sistema Teste de 5 barras.

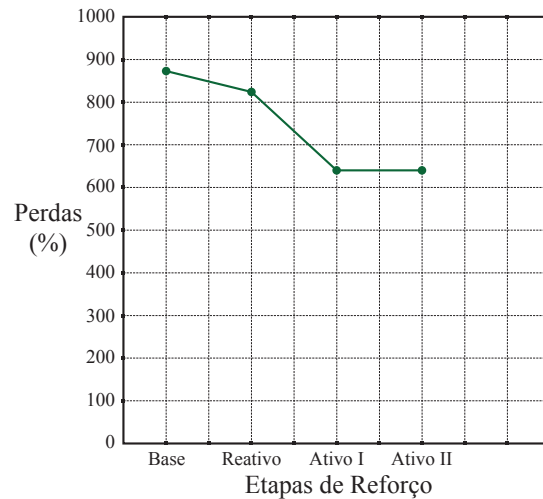


Figura 30: Evolução das perdas de potência reativa no Sistema Teste de 5 barras

As figuras acima mostram a representação gráfica que nos permite visualizar graficamente o grau de melhoria das condições de operação do sistema com respeito a uma determinada ação de controle em um determinado ponto de operação. No caso, como já sabido, as ações foram todas bem sucedidas.

## 6.2 Aplicação no Sistema Teste - 34 Barras

### 6.2.1 Descrição

O sistema ilustrado na Figura 31, baseado em um equivalente do sistema S/SE brasileiro, será aqui utilizado para a análise e avaliação de índices correspondentes às condições de estabilidade de tensão. O caso base é considerado o ponto de colapso.

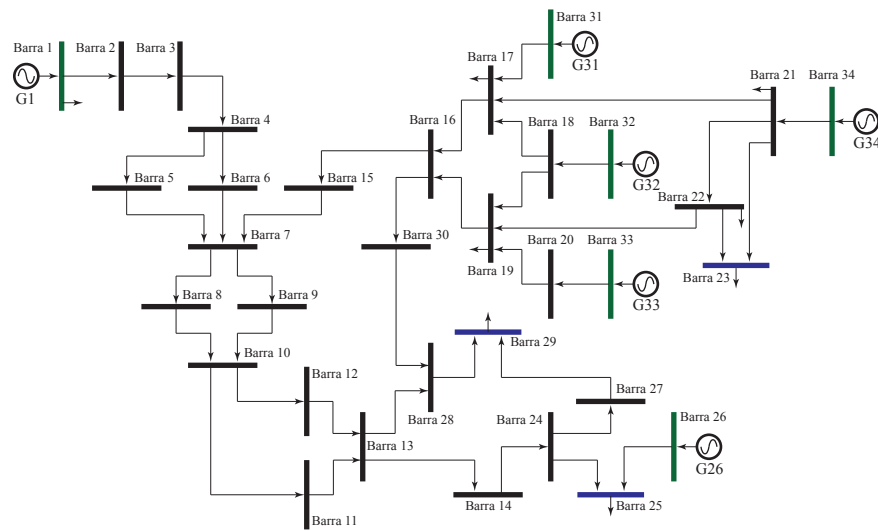


Figura 31: Sistema Brasileiro de 34 Barras, Caso base

Este estudo analisa duas possibilidades de reforço das condições de segurança de tensão do sistema:

- Minimizando o fluxo de potência reativa com mínimo desvio padrão no ramo crítico pertencente ao pior caminho de transmissão.
- Minimizando o fluxo de potência ativa com mínimo desvio padrão por etapas no ramo crítico pertencente ao pior caminho de transmissão correspondente.

Os dados de barra e os de linha do sistema são mostrados nas tabelas 27 e 29.



Tabela 29: Dados de Linha do Sistema Brasileiro Simplificado de 34 barras

De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (%)	De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (%)
2	1		0,35		19	16	0,19	2,41	294,92
2	3	0	0,01	43,13	19	22	0,16	2,05	250,17
3	4		0,16		20	19	0,01	0,06	30,59
4	5	0,04	0,92	1856,9	20	33		1,08	
5	7		-0,37		21	17	0,17	2,17	265,16
7	8		-0,39		21	34	0,02	1,14	
8	10	0,03	0,77	1515,7	22	21	0,1	1,27	155,24
10	11		-0,46		22	23	0,23	3,03	381,46
11	13	0,04	0,88	1750,5	23	21	0,28	3,85	493,7
14	13		0,35		24	25	0,01	0,18	21,66
14	24	0,04	0,52	64	24	27	0,02	0,28	14,46
15	7		0,35		25	26	0	0,04	5,41
15	16	0,01	0,03	2,27	27	29		0,72	
16	17	0,15	1,94	236,97	28	13		0,45	
17	18	0,06	0,7	85,75	28	29	0,02	0,2	30,24
17	31	0,02	1,14		28	30	1,6	9	300
18	19	0,06	0,78	96,59	30	16		0,9	
18	32		1,05						

Os resultados da avaliação das condições de estabilidade de tensão pelo programa ESTABTEN no ponto de operação do caso base são mostrados na Tabela 31, a qual mostra os resultados da avaliação das condições de segurança de tensão. Dos índices  $\text{margem}$  e  $\beta$ . . A barra 29 é a pior do ponto de vista de margem de potência.

Tabela 31: Relatório de segurança de Tensão do Caso - Base

	Tensão	$S_{inj}$	$S_{máx}$	$\beta$	Margem		Tensão	$S_{inj}$	$S_{máx}$	$\beta$	Margem
<b>1</b>	1,030	34,826	107,4	-7,8	-67,6	<b>20</b>	1,052	0,000	56,4	147,3	
<b>2</b>	1,012	0,000	30,7	166,7		<b>21</b>	1,074	3,223	100,8	122,9	96,8
<b>3</b>	1,010	0,000	29,8	166,6		<b>22</b>	1,075	2,151	59,0	126,4	96,4
<b>4</b>	0,951	6,278	22,6	166,4	72,3	<b>23</b>	<b>1,066</b>	<b>8,089</b>	<b>35,6</b>	<b>122,4</b>	<b>77,3</b>
<b>5</b>	0,915	2,745	11,4	176,5	75,9	<b>24</b>	1,037	0,000	18,9	179,0	
<b>7</b>	0,932	3,074	12,6	172,7	75,6	<b>25</b>	<b>1,093</b>	<b>66,017</b>	<b>80,5</b>	<b>179,0</b>	<b>18,0</b>
<b>8</b>	0,987	6,511	24,3	166,0	73,2	<b>26</b>	1,100	41,180	22,3	-76,7	-84,3
<b>10</b>	0,906	5,980	10,8	176,6	44,6	<b>27</b>	0,990	0,000	12,3	178,6	
<b>11</b>	0,921	0,000	12,9	171,4		<b>28</b>	0,868	0,000	8,0	178,5	
<b>13</b>	0,882	2,910	9,2	178,4	68,4	<b>29</b>	<b>0,878</b>	<b>34,719</b>	<b>35,6</b>	<b>178,6</b>	<b>2,5</b>
<b>14</b>	0,965	0,000	10,4	178,6		<b>30</b>	0,928	0,000	10,2	168,8	
<b>15</b>	0,876	0,000	14,0	170,2		<b>31</b>	1,007	13,258	24,3	-38,0	-45,4
<b>16</b>	0,879	0,000	14,2	170,0		<b>32</b>	1,058	12,692	24,1	124,7	47,4
<b>17</b>	0,999	0,044	55,0	143,3	99,9	<b>33</b>	1,059	12,921	4,9	-88,7	-165,8
<b>18</b>	1,037	0,000	64,9	143,3		<b>34</b>	1,049	14,978	15,0	180,0	0,0
<b>19</b>	1,050	14,998	57,4	148,3	73,9						

Como nos casos anteriores, após o programa ESTABTEN determinar a barra mais crítica e o programa CaTrans determinar o ramo crítico do caminho crítico, o programa FLUPOT é usado, para reforçar o sistema com redespacho de potência reativa sómente (Etapa 1).

A tabela 33 mostra os valores de geração e carga.

### 6.2.2 Etapa I de Reforço (Potência Reativa)

Observando-se a tabela 35, percebe-se que o sistema da Figura 31 compreende 3 subsistemas; Analisando a saída do Reforten temos que:

Pior Barra: 29



Pior Ramo: 28-29

Pior Caminho: 34-21-22-19-16-30-28-29

Então de acordo a tabela 35, percebe-se que o gerador G34 tem a menor participação na barra 29, o que confirma o pior caminho comenzando do Gerador 34 para a Barra 29, e os geradores G1 e G31 são os que tem a maior participação por tanto são os candidatos para o reforço.

Tabela 35: Fatores de Participação do Sistema Brasileiro de 34 Barras

	% de Participação							Sub sistema
	G1	G26	G31	G32	G33	G34	TOTAL	
1	100,00						100,00	
2	100,00						100,00	
3	100,00						100,00	
4	100,00						100,00	
5	100,00						100,00	
7	59,02		18,01	8,19	7,51	7,26	100,00	
8	59,02		18,01	8,19	7,51	7,26	100,00	
10	59,02		18,01	8,19	7,51	7,26	100,00	
11	59,02		18,01	8,19	7,51	7,26	100,00	
13	59,02		18,01	8,19	7,51	7,26	100,00	
14	59,02		18,01	8,19	7,51	7,26	100,00	
15			43,94	20,00	18,34	17,73	100,00	
16			43,94	20,00	18,34	17,73	100,00	
17			74,51	5,59		19,90	100,00	
18				100,00			100,00	
19				40,71	44,69	14,60	100,00	
20					100,00		100,00	
21						100,00	100,00	
22						100,00	100,00	
23						100,00	100,00	
24	59,02		18,01	8,19	7,51	7,26	100,00	
25	21,84	62,99	6,66	3,03	2,78	2,69	100,00	
26		100,00					100,00	
27	59,02		18,01	8,19	7,51	7,26	100,00	
28	49,23		22,31	10,15	9,31	9,00	100,00	
<b>29</b>	<b>49,59</b>		<b>22,15</b>	<b>10,08</b>	<b>9,24</b>	<b>8,94</b>	<b>100,00</b>	
30			43,94	20,00	18,34	17,73	100,00	
31			100,00				100,00	
32				100,00			100,00	
33					100,00		100,00	
34						100,00	100,00	



Os resultados da avaliação das condições de estabilidade de tensão pelo programa ESTABTEN no ponto de operação do caso base são mostrados na Tabela 37. A barra 29 é a pior do ponto de vista de margem de potência. Mais desta vez a margem aumento para 5,0.

Tabela 37: Relatório de segurança de Tensão do Caso - Base

	Tensão	$S_{inj}$	$S_{máx}$	$\beta$	Margem		Tensão	$S_{inj}$	$S_{máx}$	$\beta$	Margem
<b>1</b>	1,031	34,663	79,9	-13,2	-56,6	<b>20</b>	1,054	0,000	68,0	135,0	
<b>2</b>	1,014	0,000	41,4	159,2		<b>21</b>	1,075	3,226	108,9	114,5	97,0
<b>3</b>	1,013	0,000	40,3	159,1		<b>22</b>	1,077	2,153	64,3	116,0	96,7
<b>4</b>	0,955	6,301	30,7	158,9	79,5	<b>23</b>	<b>1,068</b>	<b>8,091</b>	<b>37,2</b>	<b>116,2</b>	<b>78,3</b>
<b>5</b>	0,922	2,767	16,2	173,3	82,9	<b>24</b>	1,039	0,000	27,0	177,9	
<b>7</b>	0,938	3,094	17,7	167,0	82,6	<b>25</b>	<b>1,094</b>	<b>66,017</b>	<b>92,9</b>	<b>177,9</b>	<b>28,9</b>
<b>8</b>	0,990	6,537	33,5	158,9	80,5	<b>26</b>	1,100	40,878	19,6	-80,7	-108,2
<b>10</b>	0,913	6,027	14,3	173,4	57,8	<b>27</b>	0,993	0,000	17,6	177,1	
<b>11</b>	0,927	0,000	18,4	165,0		<b>28</b>	0,874	0,000	11,4	177,0	
<b>13</b>	0,888	2,929	12,9	176,8	77,3	<b>29</b>	<b>0,883</b>	<b>34,719</b>	<b>36,6</b>	<b>177,1</b>	<b>5,0</b>
<b>14</b>	0,970	0,000	14,9	177,1		<b>30</b>	0,934	0,000	14,2	160,4	
<b>15</b>	0,881	0,000	19,8	163,4		<b>31</b>	1,007	13,275	21,8	92,3	39,2
<b>16</b>	0,884	0,000	20,1	163,0		<b>32</b>	1,058	12,654	35,4	103,9	64,3
<b>17</b>	1,000	0,044	67,9	132,9	99,9	<b>33</b>	1,059	12,869	29,8	115,5	56,8
<b>18</b>	1,038	0,000	76,2	129,6		<b>34</b>	1,049	14,848	14,8	180,0	0,0
<b>19</b>	1,051	14,998	69,2	136,6	78,3						

Então de acordo a tabela 39, percebe-se que o gerador G34 tem a menor participação na barra 29 e os geradores G1 e G31 são os que tem a maior participação por tanto são os candidatos para o reforço.

Tabela 39: Fatores de Participação do Sistema Brasileiro de 34 Barras

	% de Participação							Sub sistema
	G1	G26	G31	G32	G33	G34	TOTAL	
1	100,00						100,00	
2	100,00						100,00	
3	100,00						100,00	
4	100,00						100,00	
5	100,00						100,00	
7	59,11		18,03	8,19	7,50	7,16	100,00	
8	59,11		18,03	8,19	7,50	7,16	100,00	
10	59,11		18,03	8,19	7,50	7,16	100,00	
11	59,11		18,03	8,19	7,50	7,16	100,00	
13	59,11		18,03	8,19	7,50	7,16	100,00	
14	59,11		18,03	8,19	7,50	7,16	100,00	
15			44,09	20,04	18,35	17,51	100,00	
16			44,09	20,04	18,35	17,51	100,00	
17			74,72	5,65		19,63	100,00	
18				100,00			100,00	
19				40,76	44,79%	14,46	100,00	
20					100,00%		100,00	
21						100,00	100,00	
22						100,00	100,00	
23						100,00	100,00	
24	59,11		18,03	8,19	7,50%	7,16	100,00	
25	21,88	63,00	6,67	3,03	2,78%	2,65	100,00	
26		100,00					100,00	
27	59,11		18,03	8,19	7,50%	7,16	100,00	
28	49,30		22,36	10,16	9,31%	8,88	100,00	
<b>29</b>	<b>49,65</b>		<b>22,20</b>	<b>10,09</b>	<b>9,24%</b>	<b>8,82</b>	100,00	
30			44,09	20,04	18,35%	17,51	100,00	
31			100,00				100,00	
32				100,00			100,00	
33					100,00%		100,00	
34						100,00	100,00	

A Tabela 41 mostra a evolução da margem, as perdas reativas e os fatores de participação dos geradores na barra de carga 29, correspondente ao redespacho reativo e ativo.

Tabela 41: Evolução do Reforço da segurança de tensão em barras de carga Sistema 5b

De	Barra Crítica	Ramo Crítico	Fatores de Participação (%)					Margem (%)	Perdas MVar
			G1	G31	G32	G33	G34		
Caso Base	29	28-29	49,59	22,15	10,08	9,24	8,94	2,5	2217,7
Reforço P. Reativa	29	28-29	49,65	22,20	10,09	9,24	8,82	5,0	1990,8
Reforço P. Ativa 1									

A figura 32 mostra a evolução da margem de potência no Sistema S-34.

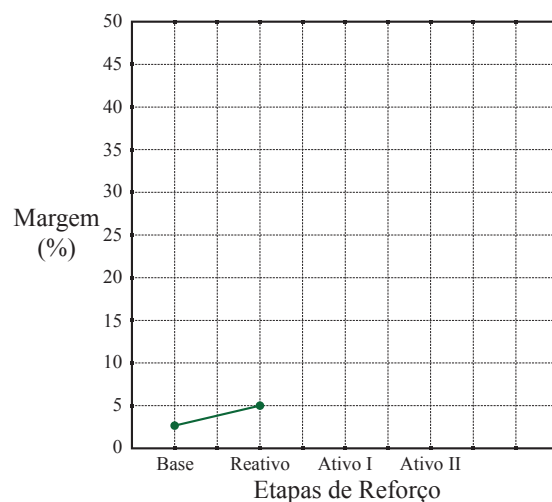


Figura 32: Evolução da margem de potência no Sistema Teste de 5 barras

A figura 33 mostra a evolução dos fatores de participação na Barra 5 do Sistema S-34.

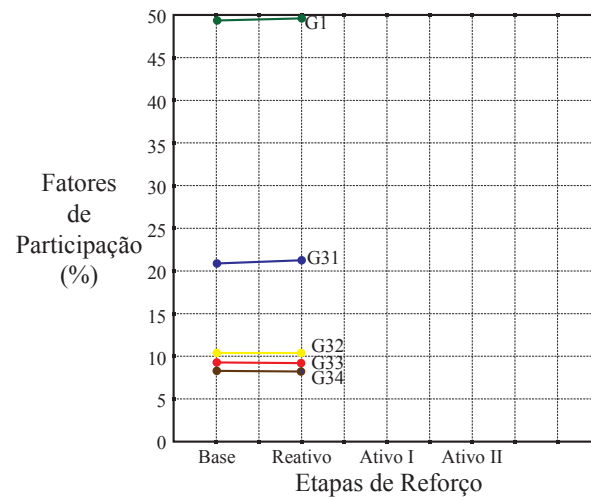


Figura 33: Evolução dos fatores de participação na Barra 5 do Sistema Teste de 5 barras

A figura 34 mostra a evolução das perdas de potência reativa no Sistema S-34.

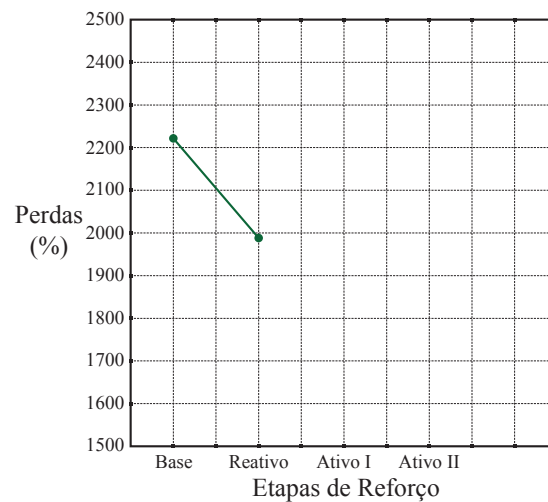


Figura 34: Evolução das perdas de potência reativa no Sistema Teste de 5 barras

As figuras acima mostram a representação gráfica que nos permite visualizar

graficamente o grau de melhoria das condições de operação do sistema com respeito a uma determinada ação de controle em um determinado ponto de operação. No caso, como já sabido, as ações foram todas bem sucedidas.

## 7 *Conclusões*

### 7.1 **Conclusões finais e desenvolvimentos futuros.**

A estabilidade de tensão é um problema atual que merece atenção. Esforços em todo o mundo têm sido feitos para a compreensão e posteriormente prevenção do fenômeno. Os colapsos ocorridos em razão de instabilidade de tensão, e os consequentes prejuízos causados, atestam a importância desses esforços.

Este trabalho iniciou-se pela compreensão e análise do fenômeno de estabilidade de tensão. Verificou-se que existe um fluxo máximo de potência ativa e reativa que pode chegar na barra de carga, ou sair da barra de geração e que, para sistemas de transmissão compensados capacitivamente, pode ocorrer com valores usuais de tensão. Mostrou-se que a parte inferior da curva  $VxP, Q$  é uma região onde ações de controle de tensão podem ter efeito oposto ao esperado. Novamente esta região pode estar na faixa normal de operação.

Foi mostrada uma ferramenta analítica de avaliação das condições de estabilidade de tensão da rede de transmissão. Fluxos de potência ativa e reativa transmitidos de geradores para cargas são avaliados. Os dois índices propostos  $S_{max}$  e  $\beta$  têm significado físico. Indicam a potência aparente em MVA que poderia ser transmitida e a região de operação na curva  $VxP, Q$ . O tamanho da margem é corretamente interpretado. Não há problemas de escala isto é, a importância relativa entre as barras é bem estabelecida. Uma medida de dificuldade de transmissão é dada.

A localização de áreas da rede muito carregadas é imediata por que a análise é nodal. O efeito de ações de reforço é facilmente avaliado isto é, é direta a comparação do carregamento da rede com dois pontos de operação distintos. Este trabalho teve por objetivo estabelecer uma metodologia capaz de calcular as ações de controle necessárias para aumentar a capacidade de transmissão, fortalecendo as condições de estabilidade de tensão, uma vez detectado que isto é necessário.

Essa tarefa envolveu a determinação de uma metodologia seqüencial usando os programas ESTABTEN que faz a avaliação das condições nodais de carregamento, CATRANSV que determina os caminhos de transmissão críticos, e o ramo crítico correspondente, também são determinados fatores de participação dos geradores envolvidos que auxiliam na decisão do re-despacho de potência ativa. e FLUPOT utilizando a função objetivo “Desvio de Potência Ativa” que diminui o fluxo de potência em ramos de transmissão críticos, para se aumentar a margem de potência gradativamente em barras ou grupo de barras, até se atingir um valor julgado adequado.

A metodologia foi baseada em que:

- Para reforçar as condições de estabilidade de tensão em uma barra de carga e, conseqüentemente, aumentar a margem de carregamento, é necessário diminuir os fluxos de potência em ramos mais carregados transferindo-os para ramos menos carregados.

Duas etapas de reforço das condições de estabilidade de tensão do sistema foram consideradas:

- Diminuindo o fluxo de potência ativa no ramo crítico por redespacho reativo, e se necessário e adequado,
- Diminuindo o fluxo de potência ativa no ramo crítico por redespacho ativo.

Inúmeros testes foram realizados, com sistemas pequenos para fins ilustrativos, assim como com sistemas e pontos de operação reais, inclusive muito próximos da situação de máximo carregamento e/ou com barras de geração e outras de tensão controlada operando na parte inferior da curva  $VxP, Q$ . Os resultados numéricos demonstraram que o método é adequado quanto ao que se propôs.

O presente trabalho replica parcial ou totalmente algumas das ferramentas utilizadas para obter uma maior integração com as ferramentas especificamente desenvolvidas para o projeto, com resultado se obiveram ferramentas alternativas de análises, as quais em alguns casos são bem mais flexíveis que ferramentas de código fechado.

## 7.2 Desenvolvimentos futuros

- Realizar testes com sistemas maiores e também com sistemas reais.
- Aprimorar as sub-rotinas computacionais
- Comparar as metodologias utilizadas.
- Determinação de “critérios” para limitar o processo de otimização.conceito do "caminho de transmissão".
- Integrar mais ferramentas para obter um produto mais completo.



## Referências

- [1] J. Bialek. Identification of source-sink connections in transmission networks. In *IEE Fourth Conference on Power System Control and Management*, number 421, London, April 1996. University of Durham.
- [2] J. Bialek. Topological generation and load distribution factors for supplement charge allocation in transmission open access. *IEEE Trans. Power Syst.*, 12(3):1185–1193, August 1997.
- [3] A. Bianco. Aplicação dos métodos de continuação e análise modal ao problema da estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência. Master's thesis, PUC/RJ, 1994.
- [4] J.O.R dos Santos. *Avaliação Estática da Estabilidade de Tensão em Redes Elétricas*. PhD thesis, PUC/RJ, 1997.
- [5] F. Fu, Y. Ni, and P. Wei. Power transfer allocation for open access using graph theory-fundamentals and applications in systems without loopflow. *IEEE Trans. Power Syst.*, 15(3):923–929, August 2000.
- [6] A.B. Greenhalgh. *Reforço das Condições de Estabilidade de Tensão na Operação do Sistema Elétrico através de um Modelo de Otimização*. PhD thesis, DEE - PUC - Rio, 1998.
- [7] F. Gubina, D. Grgic, and I. Banic. A method for determining the generators' share in a customer load. *IEEE Trans. Power Syst.*, 15(4):1376–1381, November 2000.
- [8] R.H. Iveson. Voltage stability and voltage collapse. In *I Symposium of Specialists in Electric Operational planning, Organized by Eletrobrás*, 1987.
- [9] E.W. Kimbark. *Power System Stability, Synchronous Machines*, volume 3. Dover Publications, 1968.

- 
- [10] D. Kirschen. Contributions of individual generators to loads and flowsp. *IEEE Trans. Power Syst.*, 12(1):52–60, February 1997.
- [11] P. Kundur. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, New York, U.S.A., 1994.
- [12] Prabha Kundur, Prabha Kundur, John Paserba, Venkat Ajjarapu, Göran Andersson, Anjan Bose, Claudio Canizares, Nikos Hatziargyriou, David Hill, Alex Stankovic, Carson Taylor, Thierry Van Cutsem, and Vijay Vittal. Definition and classification of power system stability. *IEEE Transaction on Power Systems*, 19(2):1387–1401, May 2004.
- [13] M. K. Pal. Voltage instability considering load characteristics. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(1):243–249, February 1992.
- [14] E.G.C. Palomino. *Reforço das Condições de Estabilidade de Tensão na Operação do Sistema Elétrico*. PhD thesis, PUC - Rio, 2002.
- [15] M. Pantos and F. Gubina. Allocation of production to customers. In *EUROCON 2003*, pages 301–304, Ljubljana, Slovenia, 2003.
- [16] M. Pantos and F. Gubina. Ex-ante transmission-service pricing based on load-flow patterns. *IEEE Trans. Power Syst.*, 19(2):796–801, May 2004.
- [17] J.-C. Peng and H. Jiang. Contributions of individual generators to complex power losses and flows-part i: fundamental theory. *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, 149(2):182–185, March 2002.
- [18] R.B. Prada. Estabilidade de tensão, relatórios iv e v. Technical report, Convênio-Fundação Padre Leonel Franca (PUC/RJ) - Eletrobrás, 1990-1991. Convênio N<sup>o</sup> ECV - 310/86.
- [19] W.W. Price, H-D. Chiang, H.K. Clark, C. Concordia, D.C. Lee, J.C. Hsu, S. Ihara, C.A. King, C.J. Lin, Mansour Y., K. Srinivasan, C.W. Taylor, and E. Vaahedi. Load representation for dynamic performance analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(2):472–482, May 1993.
- [20] M. Strubbe, A. Bihain, J. Deuse, and J.C. Baader. Stag - a new unified software program for the study of dynamic behavior of electrical power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(1):129–138, February 1989.
- [21] C.W. Taylor. *Power System Voltage Stability*. McGraw Hill, U.S.A, 1994.

- 
- [22] V.A. Venikov, V.A. Stroeve, Idelchick V.I., and Tarasov V.I. Estimation of electric power system steady-state stability in load-flow calculation. *IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems*, PAS-94(12):63–69, 1975.
- [23] B.M. Weedy. *Electric Power Systems*. John Wiley & sons, 1967.
- [24] P. Wei, B. Yuan, Y. Ni, and F. Fu. Power flow tracing for transmission open access. In *International Conference on Electric Utility Deregulation and Power Technologies*, London, April 2000. City University.

## *APÊNDICE A – Subsistemas, caminhos e subcaminhos do sistema teste de 5 barras*

A figura 35 mostra o Sistema Teste de 5 barras.

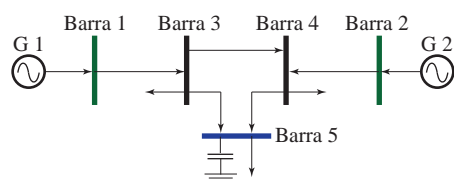


Figura 35: Sistema S5

A tabela 42 tem os caminhos de transmissão do sistema teste de 5 barras.

Tabela 42: Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 4.

5	3	1	99,01%	
5	4	2	99,15%	
5	4	3	1	99,12%

A seguir os caminhos de transmissão e a identificação do único subsistema do sistema teste de 5 barras. As Figuras 36, 37, 38, 39 mostram os caminhos do subsistema I, o único subsistema com a barra 5 como barra de carga terminal.

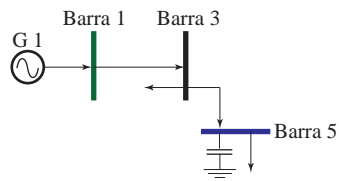


Figura 36: Caminho 1-3-5, Sistema S5

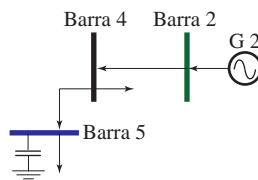


Figura 37: Caminho 2-4-5, Sistema S5

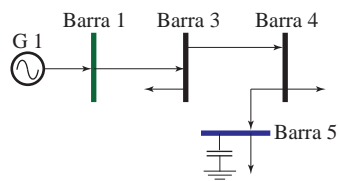


Figura 38: Caminho 1-3-4-5, Sistema S5

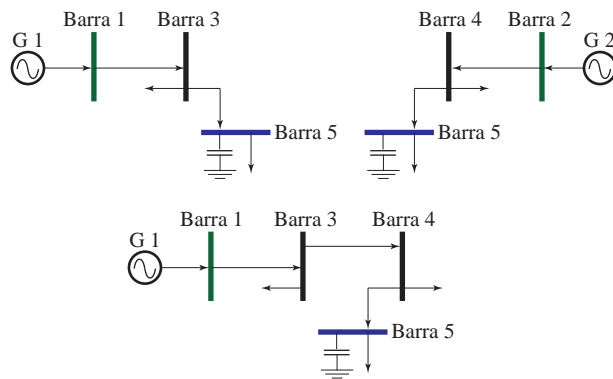


Figura 39: Subsistema I – Sistema de 5 Barras

## *APÊNDICE B – Capítulo Subsistemas, caminhos e subcaminhos do sistema IEEE 24*

A seguir os caminhos de transmissão e a identificação dos subsistemas do sistema Brasileiro reduzido de 34 barras. Nas Figuras 40, 41, 42, 43 e 44 temos o Sistema IEEE24 e os subsistemas associados.

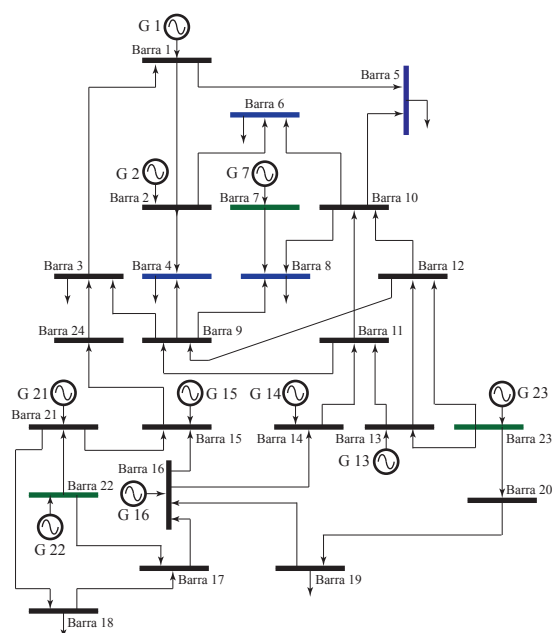


Figura 40: Sistema IEEE24

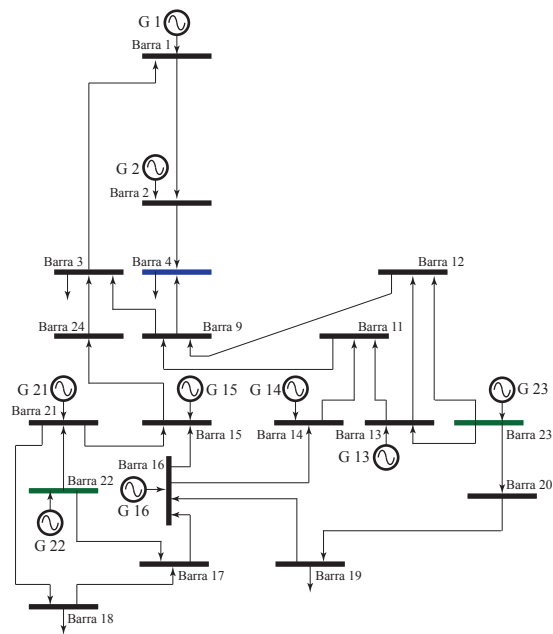


Figura 41: Subsistema I - Sistema IEEE24

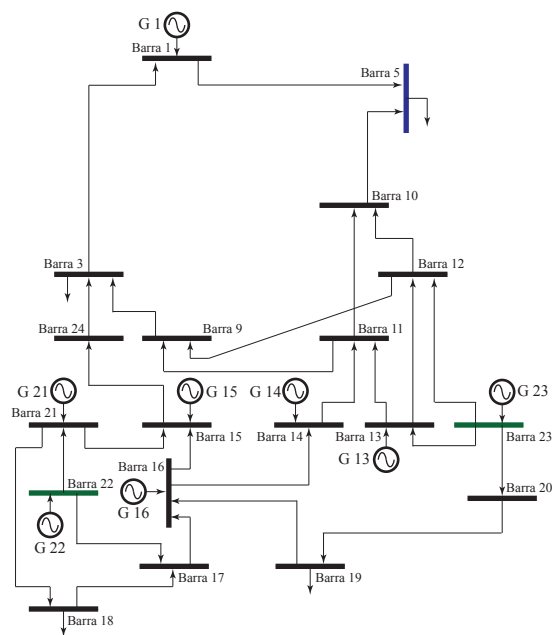


Figura 42: Subsistema II - Sistema IEEE24

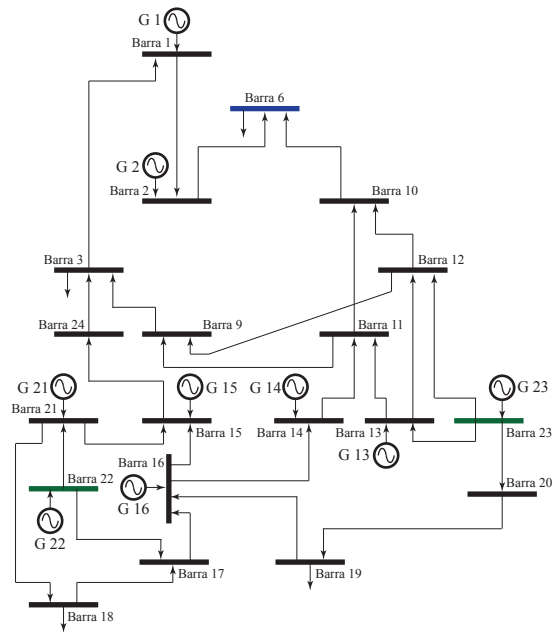


Figura 43: Subsistema III - Sistema IEEE24

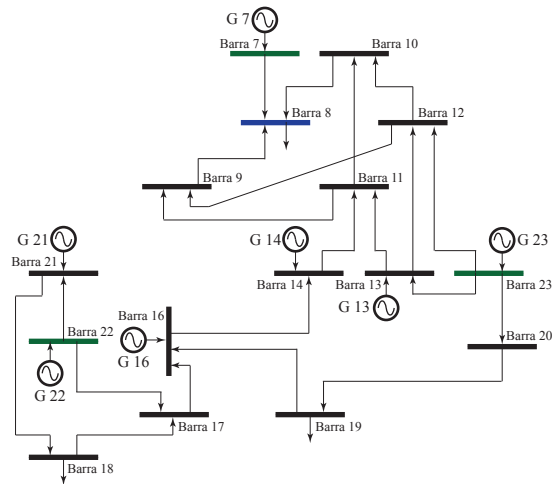


Figura 44: Subsistema III - Sistema IEEE24

Nas tabelas 43, 44, 45 e 46 temos os caminhos de transmissão e as perdas em







Tabela 46: Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 6.

8	7								94,75%
8	9	11	13	23					88,91%
8	9	11	14	16	17	18	21	22	87,64%
8	9	11	14	16	17	22			87,54%
8	9	11	14	16	19	20	23		87,27%
8	9	12	13	23					89,13%
8	9	12	23						89,75%
8	10	11	13	23					90,64%
8	10	11	14	16	17	18	21	22	89,35%
8	10	11	14	16	17	22			89,25%
8	10	11	14	16	19	20	23		88,98%
8	10	12	13	23					90,89%
8	10	12	23						91,52%

## *APÊNDICE C – Capítulo Subsistemas, caminhos e subcaminhos do sistema S34*

A seguir os caminhos de transmissão e a identificação dos subsistemas do sistema Brasileiro reduzido de 34 barras. Nas Figuras 45, 46, 47, 48 temos o Sistema Brasileiro S-34 e os subsistemas associados.

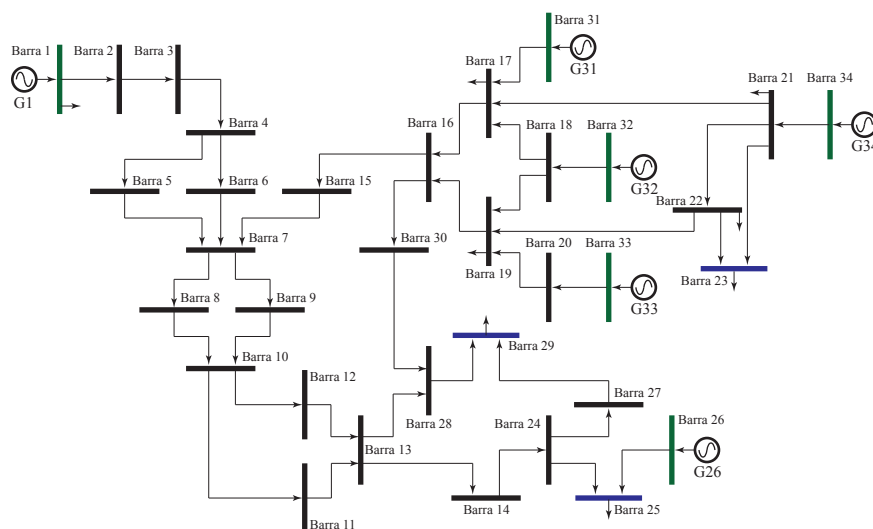


Figura 45: Sistema Brasileiro S-34

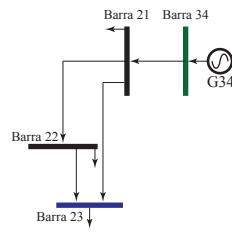


Figura 46: Subsistema I - Sistema Brasileiro S-34

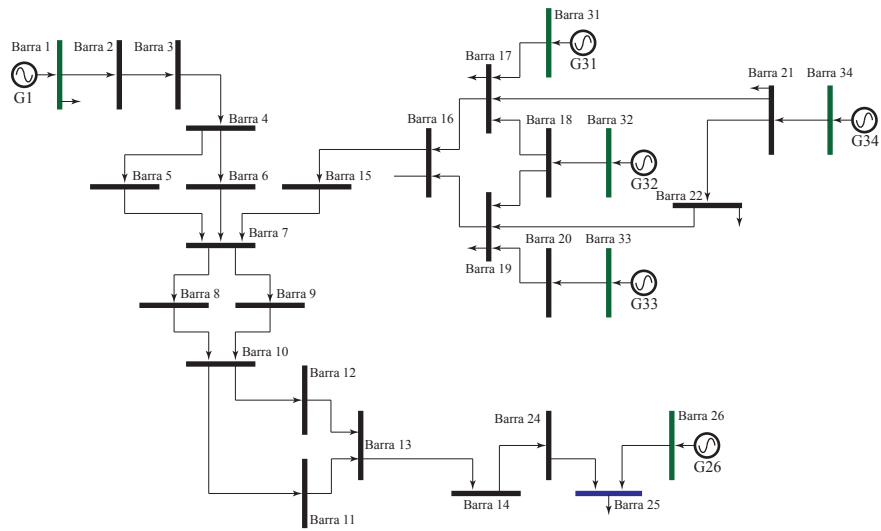


Figura 47: Subsistema II - Sistema Brasileiro S-34

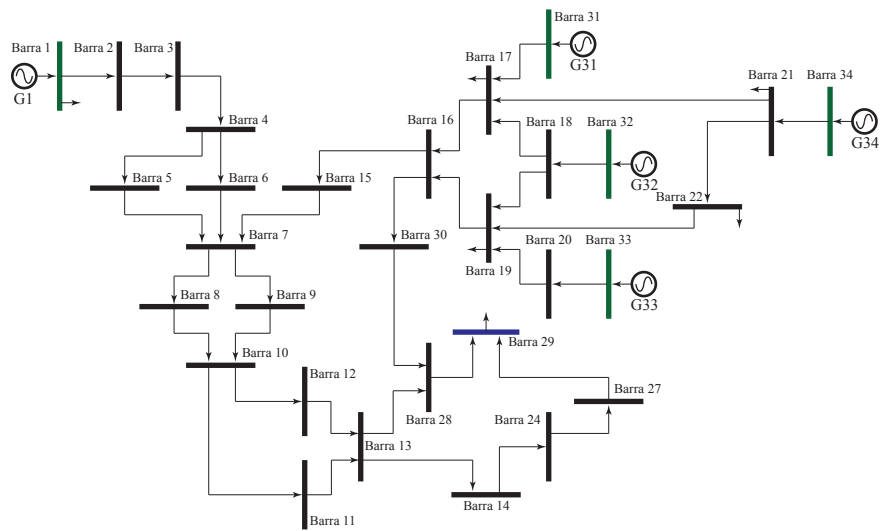


Figura 48: Subsistema III - Sistema Brasileiro S-34

Na tabela 47 temos a potência que chega efectivamente as barras de carga, o que permite identificar a linha de transmissão com mais perdas e a pior linha num caminho de transmissão para poder aplicar as correções necessarias.

Tabela 47: Potência de chegada descontando as perdas nas linhas de transmissão.

De	Para	1-Perdas (%)	De	Para	1-Perdas (%)
2	1	100,00%	16	19	96,92%
3	2	99,96%	19	20	99,94%
4	3	100,00%	17	21	98,93%
5	4	98,53%	22	21	99,43%
7	5	100,00%	23	21	98,96%
8	7	100,00%	19	22	99,39%
10	8	97,94%	23	22	99,50%
11	10	100,00%	25	24	99,01%
13	11	97,45%	27	24	95,34%
14	13	100,00%	25	26	99,87%
28	13	100,00%	29	27	100,00%
24	14	98,58%	29	28	99,08%
7	15	100,00%	28	30	87,29%
15	16	99,84%	17	31	99,78%
30	16	100,00%	18	32	100,00%
16	17	96,71%	20	33	100,00%
17	18	98,31%	21	34	99,76%
19	18	99,34%			

Nas tabelas 49, 50, 51 e 46 temos os caminhos de transmissão e as perdas em cada barra de carga terminal do sistema S-34, , identificamos a linha de transmissão com mais perdas, a pior barra, o pior caminho para poder aplicar as correções necessárias. Estas tabelas proporcionam um método adicional alternativo ao da redução a um equivalente de duas barras, que ademais permitem realizar uma análise complementar para reforçar e planificar novas redes.

Tabela 49: Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 4.

23	21	34	98,73%	
23	22	21	34	98,70%

Tabela 50: Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 5.

25	24	14	13	11	10	8	7	5	4	3	2	1	91,74%	
25	24	14	13	11	10	8	7	15	16	17	18	32	88,42%	
25	24	14	13	11	10	8	7	15	16	17	21	34	88,77%	
25	24	14	13	11	10	8	7	15	16	17	31		89,75%	
25	24	14	13	11	10	8	7	15	16	19	18	32	89,54%	
25	24	14	13	11	10	8	7	15	16	19	20	33	90,08%	
25	24	14	13	11	10	8	7	15	16	19	22	21	34	88,86%
25	26													

Tabela 51: Caminhos de transmissão de potência Ativa para a Barra 6.

29	27	24	14	13	11	10	8	7	5	4	3	2	1	88,35%	
29	27	24	14	13	11	10	8	7	15	16	17	18	32	85,15%	
29	27	24	14	13	11	10	8	7	15	16	17	21	34	85,49%	
29	27	24	14	13	11	10	8	7	15	16	17	31		86,43%	
29	27	24	14	13	11	10	8	7	15	16	19	18	32	86,22%	
29	27	24	14	13	11	10	8	7	15	16	19	20	33	86,75%	
29	27	24	14	13	11	10	8	7	15	16	19	22	21	34	85,57%
29	28	13	11	10	8	7	5	4	3	2	1			93,13%	
29	28	13	11	10	8	7	15	16	17	18	32			89,76%	
29	28	13	11	10	8	7	15	16	17	21	34			90,11%	
29	28	13	11	10	8	7	15	16	17	31				91,10%	
29	28	13	11	10	8	7	15	16	19	18	32			90,89%	
29	28	13	11	10	8	7	15	16	19	20	33			91,44%	
29	28	13	11	10	8	7	15	16	19	22	21	34		90,20%	
29	28	30	16	17	18	32								82,23%	
29	28	30	16	17	21	34								82,55%	
29	28	30	16	17	31									83,46%	
29	28	30	16	19	18	32								83,26%	
29	28	30	16	19	20	33								83,77%	
29	28	30	16	19	22	21	34							82,64%	