



Avaliação Online de Estabilidade de Tensão na Operação do Sistema Elétrico

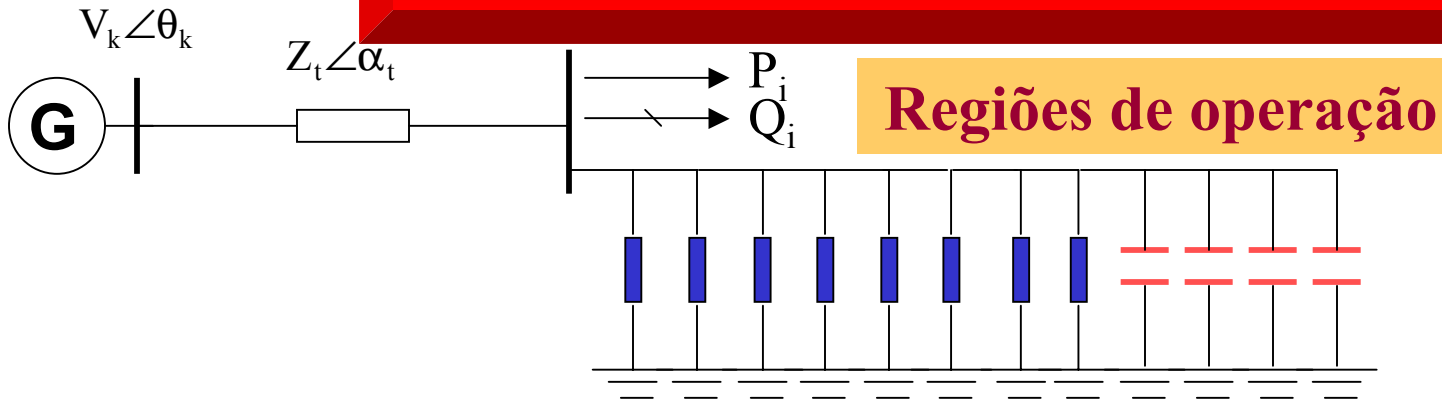
Ricardo B. Prada

CEPEL, outubro 2004

INTRODUÇÃO

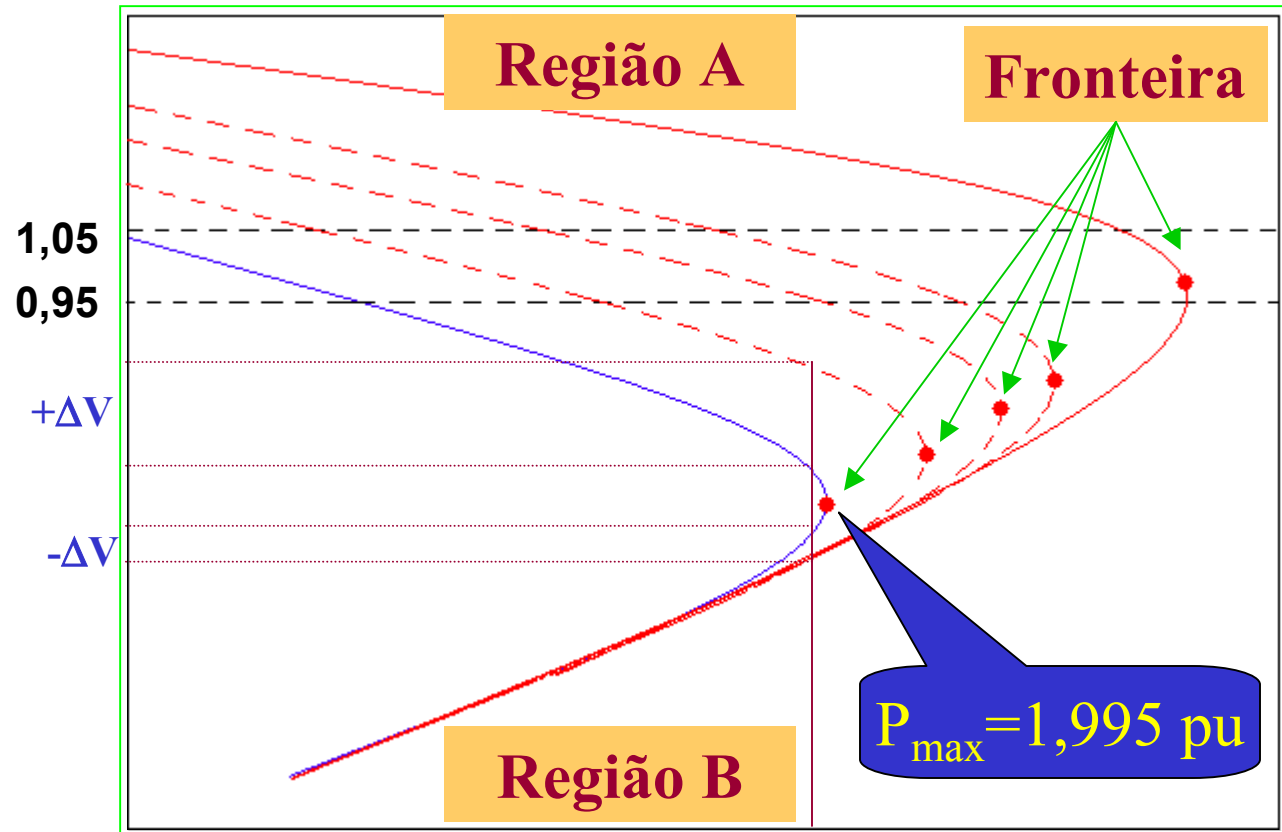
- Redes de transmissão ficaram mais malhadas.
- Sistemas estáticos de compensação reativa e estabilizadores na excitação dos geradores aumentaram a capacidade de transmissão antes limitados por problemas de estabilidade angular.
- Hoje as linhas estão mais carregadas, o que deu origem ao problema de Estabilidade de Tensão.
- Grande número de incidentes registrados em vários países.

Caracterização do Fenômeno



$$P_i = 2,886 \text{ pu}$$

$$X_c = 0,41 \text{ pu}$$





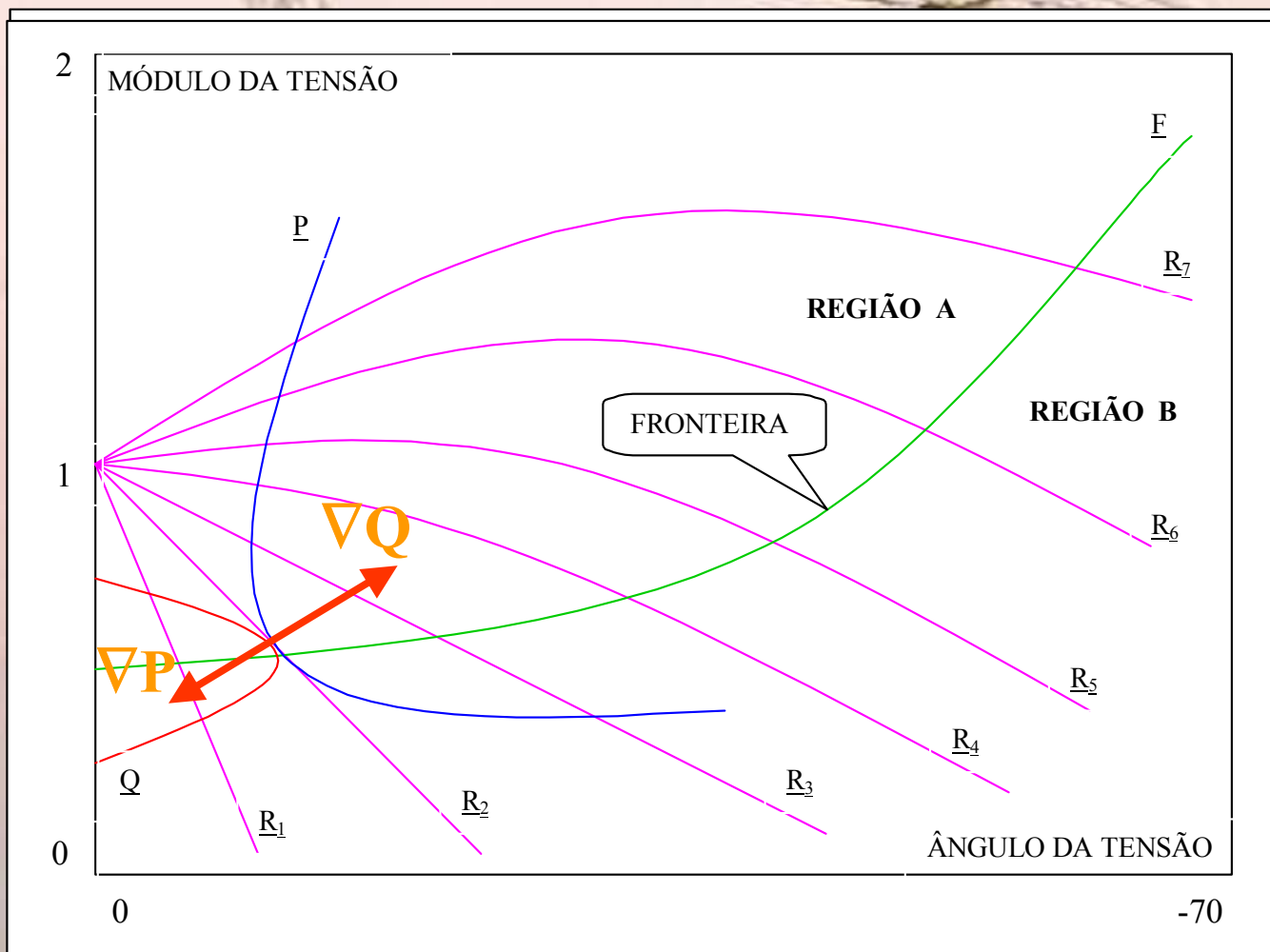
Índices de Avaliação da Segurança de Tensão em um Ponto de Operação

Objetivo dos índices:

Determinar a região de operação

Determinar a distância ao ponto de máximo carregamento

Lugar Geométrico da Tensão na Carga para P , Q e Φ ctes.



Índices de Avaliação da Segurança de Tensão

No máximo carregamento, os vetores gradiente ∇P e ∇Q estão alinhados: $\nabla P - \lambda \nabla Q = 0$, ou:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} - \lambda \frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} - \lambda \frac{\partial Q}{\partial V} = 0$$

que é equivalente a:

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

Índices de Avaliação da Segurança de Tensão

Sistema de 2 Barras:

$$\frac{\partial P_{10}}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial Q_{10}}{\partial V_1} - \frac{\partial P_{10}}{\partial V_1} \cdot \frac{\partial Q_{10}}{\partial \theta_1} = 0$$

$$\det[\mathbf{J}] = \det \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{10}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_{10}}{\partial V_1} \\ \frac{\partial Q_{10}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_{10}}{\partial V_1} \end{bmatrix} = 0$$

Sistema linearizado das equações estáticas do fluxo de carga:



$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [\mathbf{J}] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

Índices de Avaliação da Segurança de Tensão

Prova-se para um sistema de 2 barras, que:

indicador da distância entre

$$S_{i0}^2 \text{ e } S_i^2$$

potência injetada na barra i no ponto de operação em análise

$$\det[J] \cdot V_i = S_{i0}^2 - S_i^2$$

máximo fluxo de potência que poderia ser injetado

$$S_i = S_{i0}$$

$$\det[J] = 0$$

função do elemento diagonal da matriz admitância de barra e da tensão na barra i

máxima transmissão

Índices de Avaliação da Segurança de Tensão

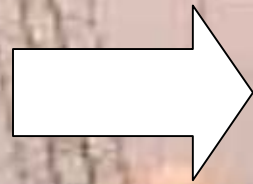
Sistema Multi-Nó:

Partição da matriz Jacobiana

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

Assumindo uma variação incremental de carga (ou geração) ΔP e ΔQ somente na barra i ($\Delta P'$ e $\Delta Q' = 0$) o sistema é reduzido para um sistema de dimensão 2×2 .

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



$$[D'] = [D] - [C][A]^{-1}[B]$$

Os elementos de $[D']$ estão dentro dos fatores triangulares da matriz Jacobiana: somente 4 substituições rápidas para a frente são necessárias para resgatá-los.

Magnitude do Determinante da Matriz [D']

$$\det[D'] = \det(D - CA^{-1}B)$$

logo: $\det[D'] \cdot V_i = \det[D] \cdot V_i - \Delta \det \cdot V_i$

onde: $\Delta \det \cdot V_i = (\det[D] - \det[D']) \cdot V_i$

$$\det[D'] \cdot V_i = S_{i0}^2 - S_i^2 - \Delta \det \cdot V_i$$

definindo: $S_m^2 = S_{i0}^2 - \Delta \det \cdot V_i \longrightarrow \det[D'] \cdot V_i = S_m^2 - S_i^2$

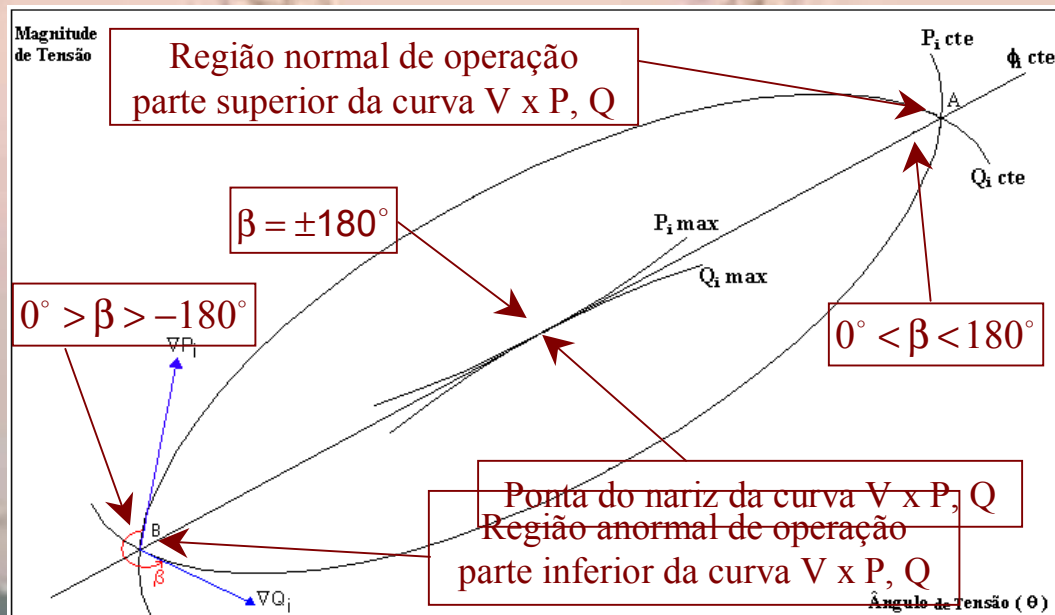
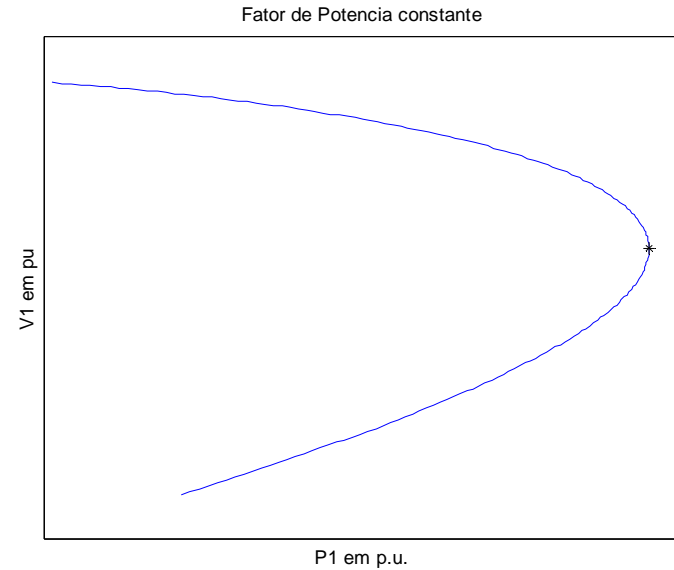
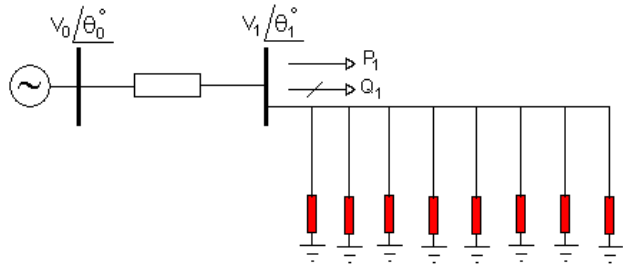
S_{i0} máxima potência que poderia ser injetada na barra i

S_i potência que está sendo injetada na barra i no ponto de operação em análise

$\Delta \det \cdot V_i$ termo relacionado à potência injetada no restante do sistema que limita a injeção de potência na barra i

S_m avaliação da máxima potência aparente que poderia ser injetada na barra i

Variação do Ângulo β entre os Gradientes de Potência sobre a Curva Φ Constante



Sinal do Determinante da Matriz $[D']$ e de β

$$\vec{\nabla}P = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot \vec{i} + \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \vec{j} + 0 \cdot \vec{k}$$

$$\vec{\nabla}Q = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \cdot \vec{i} + \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \cdot \vec{j} + 0 \cdot \vec{k}$$

$$\vec{\nabla}P \times \vec{\nabla}Q = \left[\left(\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} * \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \right) - \left(\frac{\partial P_i}{\partial V_i} * \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \right) \right] * \vec{k}$$

$$\det[D'] = \vec{\nabla}P \times \vec{\nabla}Q = \left| \vec{\nabla}P \right| * \left| \vec{\nabla}Q \right| * \text{sen} \beta$$

$$\det[D'] = \left| \vec{\nabla}P \right| * \left| \vec{\nabla}Q \right| * \text{sen} \beta$$

$\det[D'] > 0$, 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: $\beta = \pm 180^\circ$ ou $\beta = 0$

Margem de Potência

Define-se margem de potência como a diferença entre a potência que está sendo injetada na barra i e a máxima potência avaliada para o ponto de operação em análise.

$$M = S_m - S_i$$

Quando o ponto de operação estiver na região normal de operação:

Margem é a potência que deveria ser “adicionada” a S_i para atingir a avaliação de S_m

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_m} \right) = \left(1 - \frac{S_i}{S_m} \right)$$

em p.u. de S_m

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_m} \right) = \left(1 - \frac{S_i}{S_m} \right) \cdot 100\%$$

em percentual de S_m

Margem de Potência

Quando o ponto de operação estiver na região anormal de operação:

Margem é a potência que deveria ser “retirada” de S_i para atingir a avaliação de S_m

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_i} \right) = \left(\frac{S_m}{S_i} - 1 \right)$$

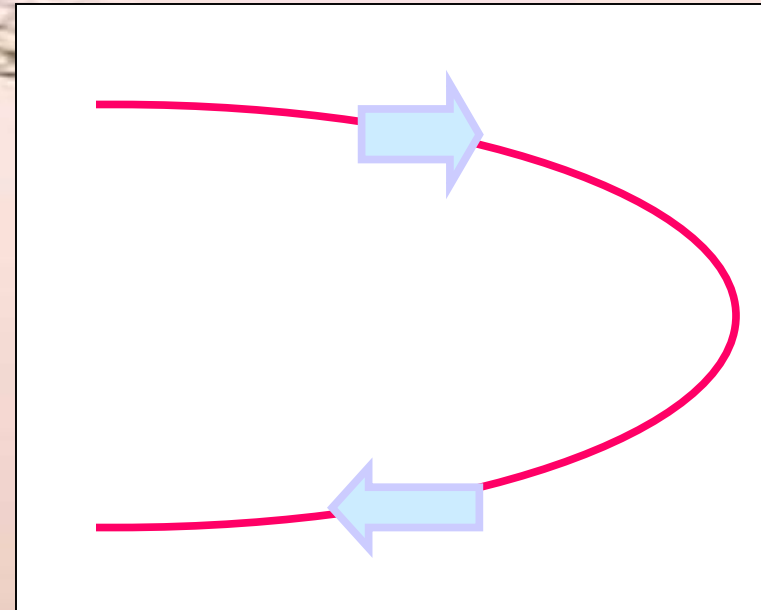
em p.u. de S_i

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_i} \right) = \left(\frac{S_m}{S_i} - 1 \right) \cdot 100\%$$

em percentual de S_i

Índice de Influência

$$II = (\text{sinal de } \beta_0) \left[\frac{M_1}{M_0} - 1 \right]$$

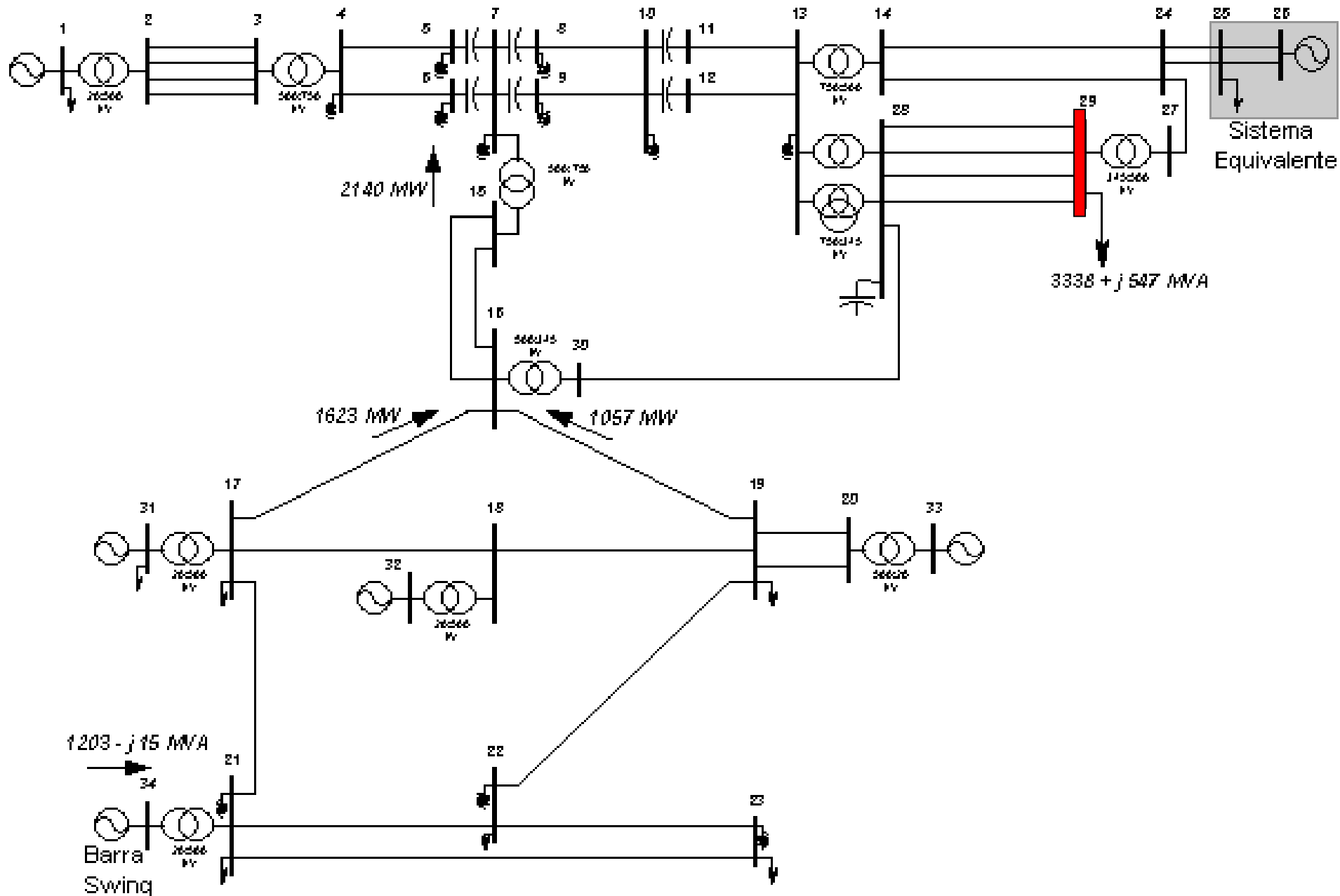


II_i índice de influência de qualquer evento sobre a margem da barra i ;

M_0 margem de potência na barra i no ponto de operação de referência;

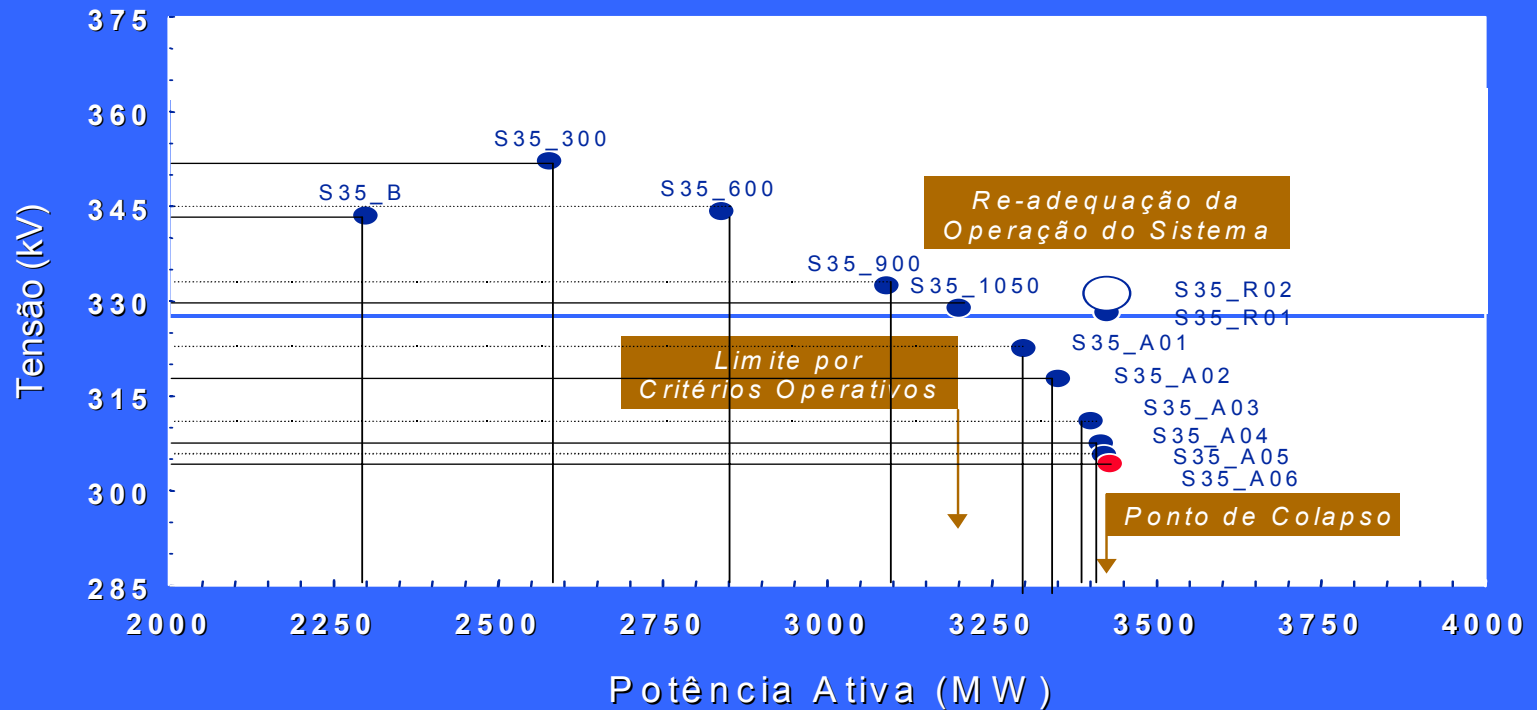
M_1 margem de potência na barra i num outro ponto de operação após o evento.

Aplicação (Sistema - Teste de 35 Barras)



Aplicação (Sistema - Teste de 35 Barras)

CARACTERÍSTICA TENSÃO-POTÊNCIA PARA A CARGA DA BARRA 29



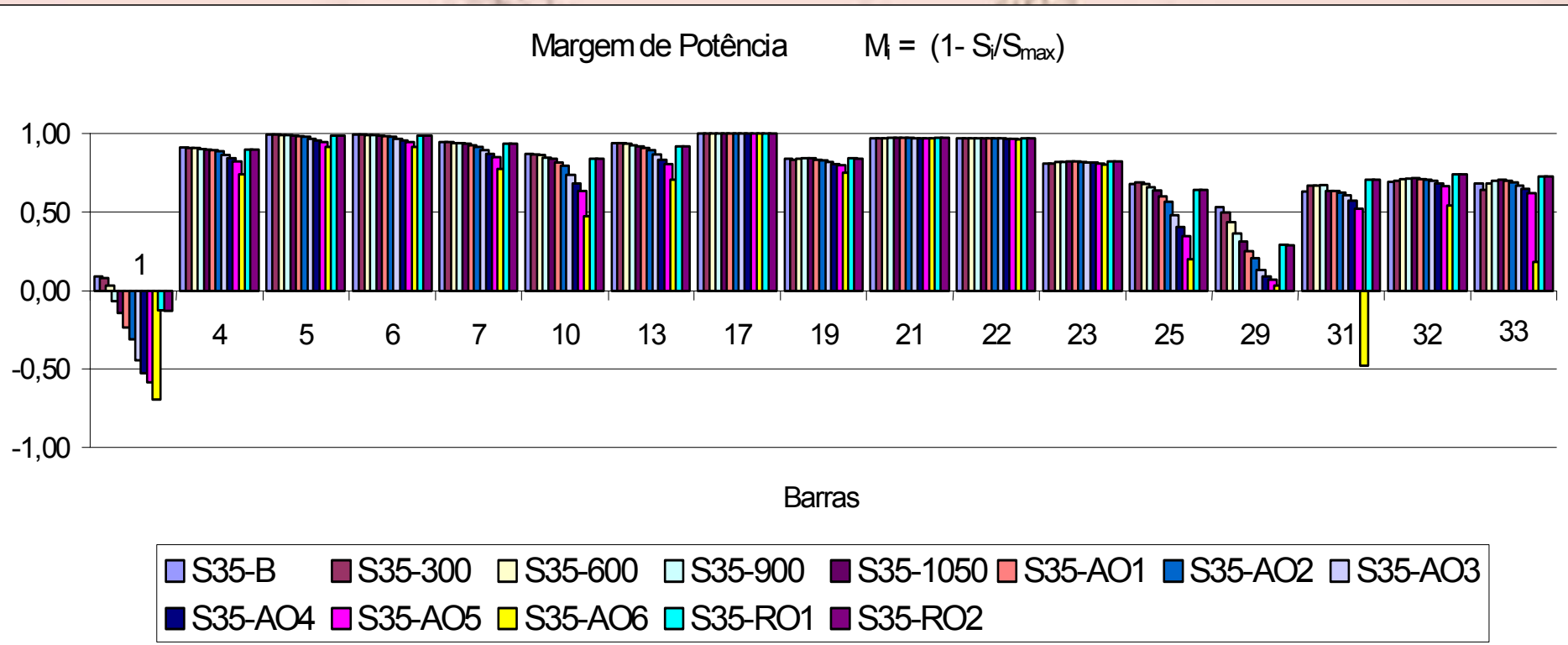
$$\text{Índice det [D']} * V_i = S_m^2 - S_i^2$$

ÍNDICE det [D']*V													Swing = B34	
BARRA	S35_B	S35_300	S35_600	S35_900	S35_1050	S35_AO1	S35_AO2	S35_AO3	S35_AO4	S35_AO5	S35_AO6	S35_RO1	S35_RO2	
1	231	196	68	-161	-397	-796	-1243	-2591	-4164	-5640	-11577	-343	-357	
4	5279	5185	5031	4624	4175	3527	3022	2114	1540	1201	544	4233	4185	
5	257804	193339	44771	17708	10570	5873	3810	1749	1018	705	260	11628	11237	
6	303026	218173	46067	17942	10665	5910	3828	1755	1021	707	260	11742	11345	
7	3859	3745	3473	2963	2476	1879	1475	879	579	426	173	2552	2506	
10	2692	2621	2376	1975	1606	1174	895	508	326	237	94	1658	1622	
13	2620	2615	2342	1923	1557	1132	860	485	310	225	89	1595	1561	
17	8943	9183	9536	9435	9048	8481	8005	6979	6087	5394	3339	9179	9142	
19	8092	7862	8395	8500	8465	7974	7564	6677	5896	5277	3371	8429	8396	
21	12856	12351	13225	13688	14713	14322	14020	13422	12899	12447	10550	14474	14448	
22	4753	4603	4943	5089	5329	5157	5025	4771	4555	4372	3628	5248	5235	
23	1364	1322	1429	1480	1561	1518	1487	1433	1394	1362	1230	1544	1541	
25	37470	40036	37742	33309	28900	23005	18677	11712	7917	5909	2454	29435	29007	
29	1961	1987	1769	1447	1188	878	676	390	253	184	74	1197	1181	
31	1185	1425	1458	1464	1211	1168	1121	974	788	593	-478	1343	1342	
32	1377	1464	1594	1647	1708	1672	1636	1533	1409	1282	600	1689	1688	
33	1267	1051	1280	1465	1545	1500	1453	1315	1147	975	83	1531	1530	

Índice Ângulo β

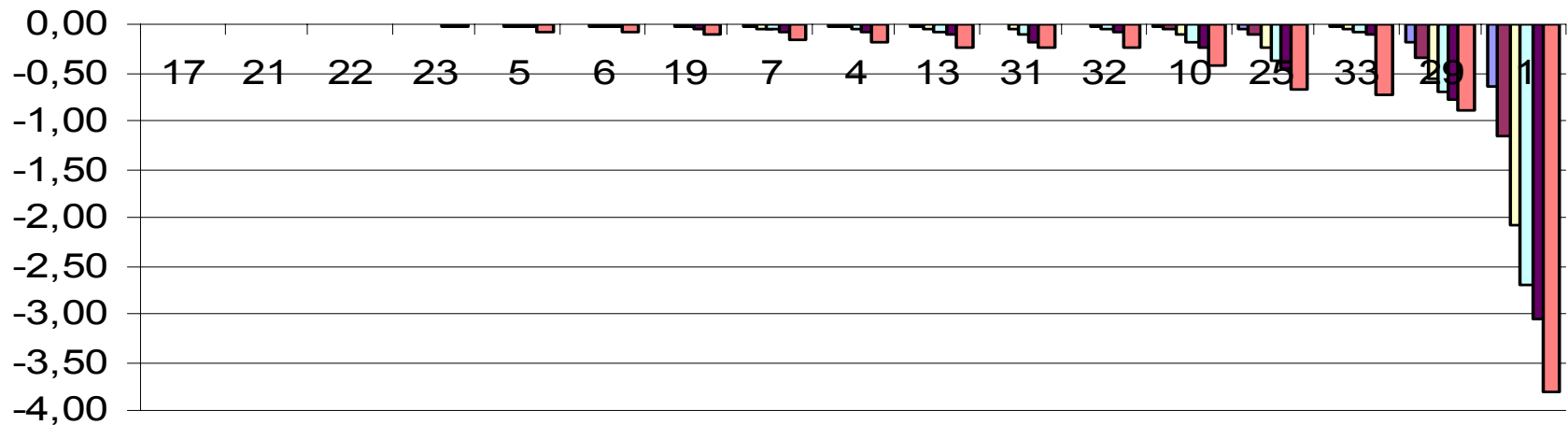
ÂNGULO β											Swing = B34		
BARRA	S35_B	S35_300	S35_600	S35_900	S35_1050	S35_AO1	S35_AO2	S35_AO3	S35_AO4	S35_AO5	S35_AO6	S35_RO1	S35_RO2
1	38,20	39,60	22,30	-59,50	-76,40	-71,90	-61,30	-37,30	-24,10	-17,80	-8,60	-75,60	-75,80
4	85,00	89,50	95,20	103,50	110,50	120,20	128,00	141,50	149,60	154,40	165,00	109,90	110,30
5	178,20	178,10	174,00	170,30	169,30	169,20	169,80	172,00	173,90	175,10	177,70	169,70	169,70
6	178,50	178,30	174,10	170,30	169,30	169,30	169,80	171,90	173,80	175,10	177,70	169,70	169,70
7	109,40	114,50	120,20	127,20	133,00	139,80	144,80	153,70	159,70	163,40	171,70	132,40	132,80
10	120,80	125,10	130,70	137,60	143,50	150,40	155,40	163,70	168,50	171,20	176,10	142,60	143,10
13	134,30	137,60	143,00	149,30	154,80	160,80	164,90	170,90	174,00	175,60	178,20	153,90	154,50
17	82,00	86,10	90,20	94,60	97,40	101,70	105,50	114,10	121,60	127,10	141,40	101,60	101,70
19	86,90	90,90	94,00	97,70	100,20	104,30	108,00	116,70	124,50	130,30	146,10	103,40	103,60
21	89,90	93,30	96,30	99,30	100,50	102,50	103,90	106,60	109,20	111,40	120,90	104,30	104,40
22	90,40	93,30	95,90	98,50	99,80	101,70	103,20	106,40	109,50	112,30	124,00	103,00	103,10
23	104,40	105,80	106,50	107,60	108,00	109,00	109,80	111,30	112,90	114,30	120,80	109,50	109,50
25	136,80	139,60	145,80	153,00	158,60	164,70	168,50	173,60	175,90	177,10	178,80	157,60	158,00
29	133,40	136,20	142,10	149,30	154,80	161,1	165,30	171,40	174,40	175,90	178,40	154,20	154,50
31	66,90	71,30	73,60	75,80	74,90	76,90	78,70	83,50	88,80	93,00	-39,90	82,00	82,10
32	70,50	72,90	75,20	77,10	78,10	79,80	81,30	85,60	90,90	96,20	120,40	81,40	81,50
33	71,90	72,30	76,10	79,30	80,90	83,00	85,10	90,90	97,90	105,10	155,40	84,30	84,40

Margem de Potência em MVA



Índice de Influência

II [S35_AO1 até S35_AO6 em relação a S35_1050]



Barras

1050-AO1 1050-AO2 1050-AO3 1050-AO4 1050-AO5 1050-AO6

Tabela 1 - Avaliação às 15:00 hs

Nome da Barra	Volt	Si	Sm	Beta
10 ANGRA----1MQ	1.020	6.06	19.7	107
44 GRAJAU---2CS	0.979	0.55	10.1	172
48 IBIUNA---3CS	1.021	0.86	13.4	-127
50 T.PRETO--1CS	1.050	2.92	26.2	108
60 F.IGUACU-765	0.964	6.36	69.4	34
61 FOZ-500-60HZ	1.021	0.00	84.1	32
65 IVAIPORA-765	0.987	0.00	57.3	55
66 IVAIPORA-525	1.014	0.00	57.2	64
67 IVAIPORA-69	1.012	0.00	27.1	78
72 ITABERA-765	0.980	6.47	52.3	73
76 T.PRETO-765	0.939	3.10	56.6	107
77 T.PRETO-500	1.080	0.00	51.8	115
78 T.PRETO-345	1.029	8.23	71.1	125
79 T.PRETO---69	0.930	0.00	24.6	102
86 IBIUNA---345	1.042	78.92	104.9	105
87 IBIUNA---500	1.089	0.00	50.5	106
104 C.PAULIS-500	1.062	0.00	54.1	137
105 ANGRA----500	1.061	0.00	46.9	129
106 ADRIANO-500	1.055	0.00	46.0	146
107 GRAJAU---500	1.043	0.00	44.3	145
108 S.JOSE---500	1.054	0.00	41.9	144
140 ADRIANO-345	1.025	3.33	34.2	140
173 ADRIANO-138	1.046	0.00	21.9	130
178 GRAJAU---138	1.007	0.00	54.1	149
183 C.PAULIS-138	1.044	0.00	25.3	116
185 ANGRA----138	1.025	0.45	7.1	100
1106 ITAIPU60-500	1.023	0.00	87.8	32
1107 ITAIPU60 8MQ	1.030	56.16	65.5	-40

Tabela 2 - Avaliação às 18:00 hs

Volt	Si	Sm	Beta
1.035	6.85	7.5	178
0.978	0.35	23.3	-136
1.039	2.08	67.5	-49
1.000	3.03	11.6	160
0.968	6.39	63.5	41
1.024	0.00	79.6	36
0.990	0.00	46.0	72
0.970	0.00	48.7	82
1.024	0.00	25.9	85
0.971	6.41	38.8	95
0.909	3.00	36.9	134
1.049	0.00	33.5	142
1.020	6.12	42.5	150
0.896	0.00	18.5	124
1.033	80.27	90.0	130
1.067	0.00	34.8	130
1.021	0.00	32.9	160
1.028	0.00	30.4	157
0.999	0.00	27.0	167
1.005	0.00	26.9	167
1.000	0.00	25.0	166
0.967	3.14	19.3	165
1.023	0.00	12.2	158
0.999	0.00	34.1	169
0.994	0.00	17.8	144
1.032	0.41	5.9	110
1.026	0.00	83.6	356
1.030	54.48	72.9	-98

Análise de Contingências

Em princípio, os índices devem ser calculados para todas as contingências e todas as barras.

No entanto, é fácil ordenar as contingências em ordem de severidade, com base na redução das margens nodais de potência.

Para cada contingência, calcula-se somente os índices das barras afetadas por ela.

Perda do controle de tensão em barras é incluída na lista de contingências

CONCLUSÕES

A estabilidade de tensão é um problema atual. Os colapsos ocorridos e os conseqüentes prejuízos causados, atestam a importância de se fazer estudos de prevenção.

Ferramenta analítica de avaliação das condições de estabilidade de tensão - os índices indicam:

M margem de potência em MVA entre S_i que está sendo injetado e S_m a estimativa da potência aparente máxima que poderia ser transmitida

β região de operação na curva $V \times P, Q$

II índice de influência de qualquer evento sobre a margem de potência

CONCLUSÕES

Os índices são calculados para todas as barras, incluindo as barras com geradores e compensadores. Embora muitos índices ignorem estas barras, a análise de casos reais mostraram que as relações Q-V devem ser avaliadas em barras PV mesmo naquelas com reservas de potência reativa.

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 de dois pontos de operação distintos.

CONCLUSÕES

Não há problema de interpretação do tamanho do índice: Ele é pequeno ou grande ? Ele é grande para uma barra e pequeno para outra ?

Se $S_m = 10$ e $S_i = 1$, então a margem é 9 vezes S_i
Se $S_m = 100$ e $S_i = 99$, então a margem é mínima.

Não há problema sobre a importância relativa entre barras (“scaling”): quanto maior for S_m , mais importante a barra é.

Controle local e remoto de tensão por geradores, compensadores síncronos e estáticos, LTCs são incluídos no sistema linearizado de equações.

CONCLUSÕES

O esforço computacional da análise é pequeno o suficiente para aplicações na operação em tempo real, incluindo análise de contingências.

microcomputador: Pentium II 300 MHz

- cálculo dos índices para todas as 1758 barras do sistema S/SE: 3,98 segundos
- 5 iterações do método de Newton: 0,11 segundos
- cada contingência afeta (em média): 133 barras
- seleção dessas barras: menos que 0,01 segundos
- cálculo dos índices para as barras afetadas em cada contingência: 0,3 segundos

CONCLUSÕES

A adequacidade e a aplicabilidade dos índices propostos são aferidas pelos resultados numéricos apresentados e que correspondem ao “black-out” de abril de 1997 no sistema S/SE brasileiro.

Trabalhos em desenvolvimento:

Cálculo de ações de controle operativas para reforçar as condições de segurança de tensão, trazendo o ponto de operação para a parte superior de curva e afastando-o do máximo carregamento.

Determinação da adequacidade das ações de controle de tensão, tendo em vista os efeitos opostos ao esperado e a interdependência entre controles.

Benefícios das Ferramentas Analíticas

Permite uma maior utilização da rede de transmissão, mantendo a confiabilidade.

Executável através do cálculo online dos limites, utilizando as condições reais do sistema.

Exemplo: aumento de 15% na capacidade de transmissão em uma linha de 1000MW; uso médio de 5% em um ano; US \$10/MWh

Benefício financeiro anual: US \$3.9 million

P.Hirsch and S.Lee, Security Applications and Architecture for na Open Market, IEEE CAP, July 1999.

Obrigado

Ricardo Prada
prada@ele.puc-rio.br
(21) 31141214