

4

Determinação do Ramo de Transmissão Mais Carregado Através da Observação dos Índices de Estabilidade de Tensão nas Extremidades do Ramo

Uma vez determinada a barra crítica do sistema e a sub-rede utilizada para transmitir potência ativa até a barra crítica, o objetivo é calcular a variação dos índices de estabilidade de tensão em cada ramo, da barra “de” para a barra “para”, isto é, no sentido do fluxo de potência ativa e, assim, determinar o ramo de transmissão mais carregado.

4.1.

Observação dos Índices de Estabilidade de Tensão

Nesta seção propõem-se diferentes formas de avaliação.

4.1.1.

Observação da Margem de Potência

A análise das variações das margens de potência das barras nas extremidades de um ramo para determinar o ramo de transmissão mais carregado não pode ser feita por duas razões:

- Se a margem é positiva, ela é dada em porcentagem de S_m naquela barra e, assim, não se pode comparar as margens nos extremos do ramo, calculadas tendo como base dois valores de S_m diferentes. Se a margem é negativa, em porcentagem de S_i , o problema é o mesmo.
- Se não há injeções de potência em uma barra, o valor da margem é sempre 100%.

4.1.2.

Observação do Índice β

De posse do índice β em todas as barras da sub-rede, calcula-se a variação do índice da barra “de” para a barra “para” no sentido do fluxo de potência ativa, em percentual do índice da barra “de”, como em (4.1).

$$Var\beta = \left(1 - \frac{\beta^{para}}{\beta^{de}}\right) * 100\% \quad (4.1)$$

4.1.3.

Observação do Índice Sm

De posse do índice Sm em todas as barras da sub-rede, calcula-se a variação do índice da barra “de” para a barra “para” no sentido do fluxo de potência ativa, em percentual do índice da barra “de”, como em (4.2).

$$VarSm = \left(\frac{Sm^{para}}{Sm^{de}} - 1\right) * 100\% \quad (4.2)$$

4.1.4.

Observação do Índice Sm e Si

De posse do índice Sm em todas as barras da sub-rede, calcula-se a diferença do índice Sm com a injeção Si , na barra “de” e na barra “para”. Finalmente, calcula-se a variação dessa diferença da barra “de” para a barra “para” no sentido do fluxo de potência ativa, em percentual do índice da barra “de”, como é mostrado em (4.3).

$$VarSmi = \left(\frac{Sm^{para} - Si^{para}}{Sm^{de} - Si^{de}} - 1\right) * 100\% \quad (4.3)$$

Deve-se notar que $Sm-Si$ corresponde a uma margem de potência, sem o uso de uma base, seja Sm para valores positivos, seja Si para valores negativos.

4.2. Exemplos Numéricos

4.2.1. Sistema de 4 Barras

Na Figura 4.1 é apresentado um sistema elétrico de 4 barras. Note-se que a carga na barra 2 é muito maior do que a carga na barra 3, e a linha entre as barras 1 e 2 tem uma impedância maior do que a linha 2-3. O ponto de operação foi obtido por aumentos sucessivos de carga na barra 2, até chegar ao ponto de carga máxima.

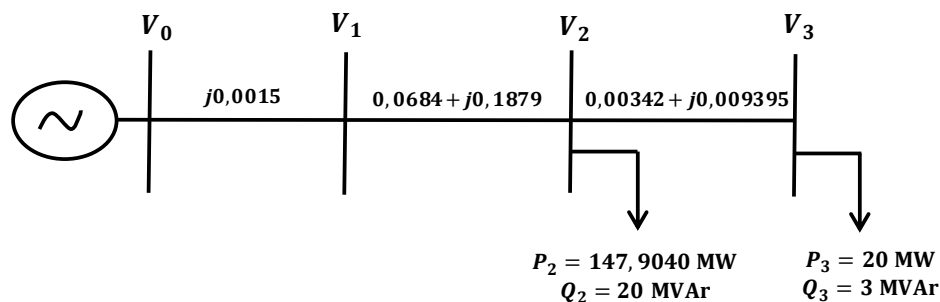


Figura 4.1 Sistema de 4 Barras-Teste 1

Foram calculadas as variações dos índices, conforme (4.1), (4.2) e (4.3), e os resultados são apresentados na Tabela 4.1. Observa-se que a variação negativa entre as barras 1 e 2 é a mais crítica do sistema, o que é esperado, já que a maior carga encontra-se na barra 2 e a linha com maior impedância é a linha 1-2. Assim, o ramo 1-2 é o crítico.

Barra "De"	Barra "Para"	VarBeta	VarSm	VarSmi
1	2	-70,2422	-99,5688	-99,9985
2	3	0,0068	-84,4073	515,5617

Tabela 4.1 Variações dos Índices - Teste 1

Na Figura 4.2 é apresentado um segundo sistema-teste, no qual foram trocadas as posições da maior carga e da linha com maior impedância.

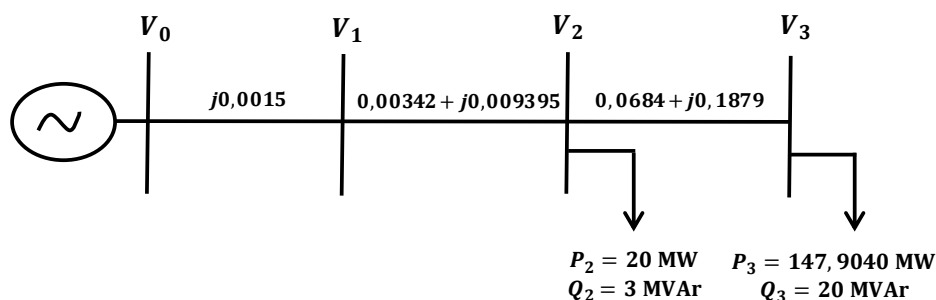


Figura 4.2 Sistema de 4 Barras-Teste 2

Calcularam-se as variações dos índices e os resultados são apresentados na Tabela 4.2. Observa-se que a variação negativa entre as barras 2 e 3 é a mais crítica do sistema, o que é esperado, já que a maior carga encontra-se na barra 3 e a linha com maior impedância é a linha 2-3. Assim, o ramo 2-3 é o crítico.

Barra "De"	Barra "Para"	VarBeta	VarSm	VarSmi
1	2	-4,4919	-87,6507	-87,6812
2	3	-57,3235	-97,0406	-98,8641

Tabela 4.2 Variações dos Índices - Teste 2

Dos resultados obtidos nos dois testes, pode-se dizer que a identificação do ramo crítico foi feita com sucesso através do cálculo das variações dos índices de estabilidade de tensão. Entretanto, testes com sistemas maiores são necessários.

4.2.2. Sistema de 34 Barras

Na Figura 4.3 é apresentado um sistema elétrico de maior porte. Serão analisados quatro pontos de operação diferentes para observar as mudanças nas variações dos índices e as regiões onde se apresentam os ramos críticos do sistema.

Depois de essas mudanças, foram feitas as reduções equivalentes entre as barras 4-5-7, 7-8-10 e 10-11-13 e, de esta forma, as barras 5, 8 e 11 foram excluídas do diagrama unifilar.

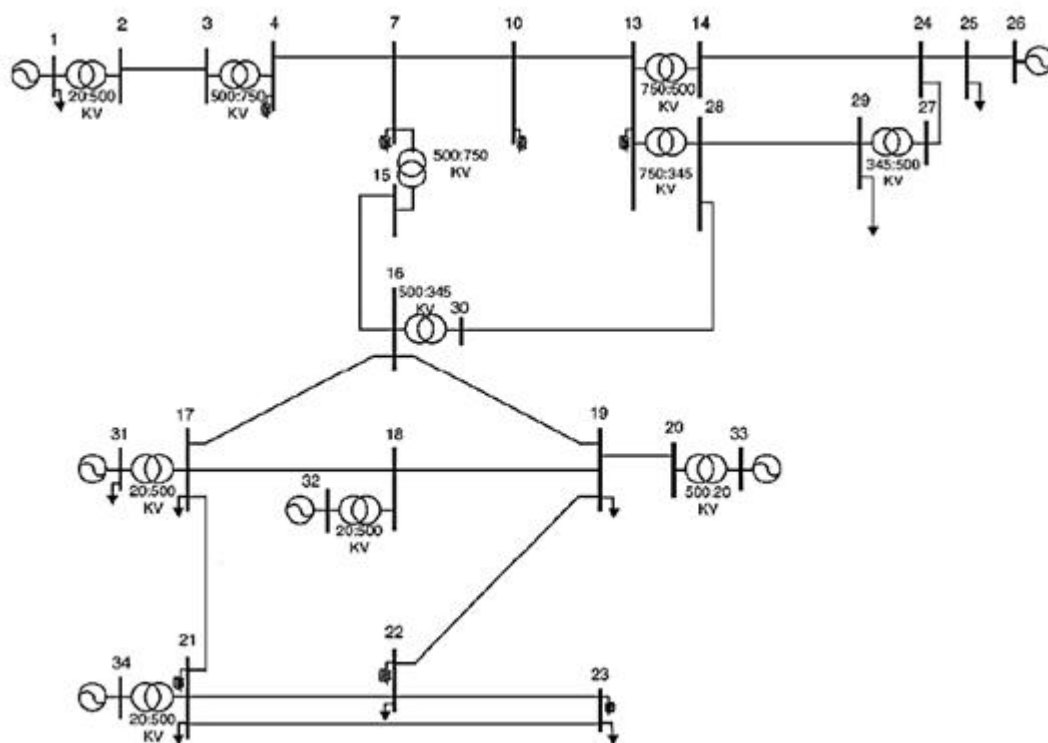


Figura 4.3 Sistema-Teste de 34 Barras Modificado

O primeiro ponto de operação é apresentado na Tabela 4.3 e foi obtido por aumentos sucessivos de carga na barra 29 e acompanhado pelo aumento de geração na barra 34 (*swing*).

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (rad)	Cargas		Geradores	
				MW	MVAr	MW	MVAr
1	PV	1,03	-0,32	8	0	3300	1128
2	PQ	1,01	-0,43	0	0	0	0
3	PQ	1,01	-0,43	0	0	0	0
4	PQ	0,95	-0,49	0	0	0	0
7	PQ	0,93	-0,70	0	0	0	0
10	PQ	0,91	-0,95	0	0	0	0
13	PQ	0,88	-1,25	0	0	0	0
14	PQ	0,97	-1,36	0	0	0	0
15	PQ	0,88	-0,61	0	0	0	0
16	PQ	0,88	-0,60	0	0	0	0
17	PQ	1,00	-0,22	4,44	0	0	0
18	PQ	1,04	-0,22	0	0	0	0
19	PQ	1,05	-0,30	1461	-339	0	0
20	PQ	1,05	-0,29	0	0	0	0
21	PQ	1,07	-0,15	2,83	0	0	0
22	PQ	1,08	-0,23	2,36	0	0	0
23	PQ	1,07	-0,30	678,3	120,8	0	0
24	PQ	1,04	-1,49	0	0	0	0
25	PQ	1,09	-1,53	6150	-2400	0	0
26	PV	1,10	-1,52	0	0	3879	1363
27	PQ	0,99	-1,49	0	0	0	0
28	PQ	0,87	-1,41	0	0	0	0
29	PQ	0,88	-1,50	3425	561,4	0	0
30	PQ	0,93	-0,68	0	0	0	0
31	PV	1,01	-0,08	1,71	0	1320	-143
32	PV	1,06	-0,10	0	0	1200	411,9
33	PV	1,06	-0,17	0	0	1200	477,1
34	SW	1,05	0,00	0	0	1444	390,1

Tabela 4.3 Ponto de Operação 1 - Sistema 34 Barras

Os índices de estabilidade de tensão calculados para o sistema indicam que a barra crítica é a barra 29, como mostrado em [6].

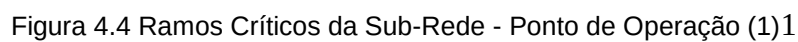
Uma vez identificada a barra crítica, é determinada a sub-rede utilizada para transmitir potência ativa a ela, e são calculadas as variações dos índices, conforme (4.1), (4.2) e (4.3), para todas as barras da sub-rede. Não é preciso analisar as barras que não pertencem à sub-rede.

As variações, assim como os índices são apresentadas na Tabela 4.4.

Barra	Beta (graus)	Sm (pu)	Si (pu)	Barra "De"	Barra "Para"	Var β	VarSm	VarSmi
1	172,155	63,208	34,816	1	2	-3,440	18,419	163,629
2	178,077	74,850	0,000	2	3	-0,041	-0,134	-0,134
3	178,151	74,750	0,000	3	4	-0,620	23,097	23,097
4	179,254	92,015	0,000	4	7	-101,115	-135,412	-135,412
7	-1,999	-32,585	0,000	7	10	45,600	-43,733	-43,733
10	-2,910	-18,334	0,000	10	13	66,561	-28,623	-28,623
13	-4,848	-13,087	0,000	13	14	37,095	3,415	3,415
14	-6,646	-13,533	0,000	14	24	196,372	1,377	1,377
15	-0,967	-56,622	0,000	15	7	106,712	-42,453	-42,453
16	-0,913	-59,776	0,000	16	15	5,961	-5,276	-5,276
17	168,186	86,852	0,044	17	16	-100,543	-168,825	-168,860
18	164,093	87,322	0,000	18	17	-2,494	-0,539	-0,590
19	167,573	82,723	14,998	31	17	-16,084	140,409	279,608
20	166,427	80,008	0,000	18	19	-2,120	-5,267	-22,443
21	129,002	114,539	0,028	32	18	-16,828	111,033	204,386
22	131,937	63,977	0,024	19	16	-100,545	-172,260	-188,263
24	-19,696	-13,720	0,000	22	19	-27,010	29,302	5,898
27	-12,243	-13,601	0,000	20	19	-0,688	3,393	-15,353
28	-6,093	-12,528	0,000	33	20	-13,065	109,126	215,738
29	-7,492	32,427	34,707	21	17	-30,375	-24,173	-24,193
30	178,674	42,790	0,000	34	21	-28,018	216,179	438,780
31	144,883	36,127	13,259	21	22	-2,275	-44,144	-44,151
32	140,458	41,379	12,691	24	27	-37,842	-0,869	-0,869
33	147,196	38,258	12,918	27	29	-38,807	-338,420	-83,232
34	100,768	36,226	14,972	13	28	25,685	-4,267	-4,267
				28	29	22,964	-358,830	-81,796
				30	28	-103,410	-129,278	-129,278
				16	30	-19678,611	-171,584	-171,584

Tabela 4.4 Resultados das Variações dos Índices - Ponto de Operação (1)

Na Figura 4.4, é apresentada a sub-rede associada à barra crítica 29, e são assinalados os ramos mais críticos segundo os resultados obtidos na Tabela 4.4.



A potência ativa gerada pelos geradores 31, 32, 33 e 34 é transmitida para a barra 16. Assim, as três das quatro linhas ligadas a ela foram identificadas como críticas. As duas linhas conectadas à barra crítica 29, onde houve aumento de carga foram identificadas como críticas. Não há uma explicação imediata para a seleção do ramo 4-7.

¹ Os números nos ramos 10-13, 13-28 e 28-29 se referem a testes posteriores.

Na Tabela 4.5 é apresentado o segundo ponto de operação analisado. A potência ativa dos geradores 1 e 26 tiveram um pequeno aumento, os geradores 31 e 32 tiveram uma diminuição acentuada, enquanto os geradores 33 e 34 só tiveram uma pequena diminuição, em relação ao primeiro ponto de operação.

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (rad)	Cargas		Geradores	
				MW	MVAr	MW	MVAr
1	PV	1,03	0,28	8	0	3950	1128
2	PQ	1,07	0,15	0	0	0	0
3	PQ	1,07	0,15	0	0	0	0
4	PQ	1,03	0,09	0	0	0	0
7	PQ	1,11	-0,11	0	0	0	0
10	PQ	1,12	-0,23	0	0	0	0
13	PQ	1,07	-0,36	0	0	0	0
14	PQ	1,11	-0,40	0	0	0	0
15	PQ	1,05	-0,12	0	0	0	0
16	PQ	1,05	-0,12	0	0	0	0
17	PQ	1,06	-0,08	4,44	0	0	0
18	PQ	1,08	-0,09	0	0	0	0
19	PQ	1,11	-0,12	1461	-339	0	0
20	PQ	1,11	-0,11	0	0	0	0
21	PQ	1,11	-0,08	2,83	0	0	0
22	PQ	1,12	-0,11	2,36	0	0	0
23	PQ	1,11	-0,19	678,3	120,8	0	0
24	PQ	1,10	-0,45	0	0	0	0
25	PQ	1,11	-0,46	6150	-2400	0	0
26	PV	1,10	-0,44	0	0	5590	1363
27	PQ	1,08	-0,47	0	0	0	0
28	PQ	1,04	-0,46	0	0	0	0
29	PQ	1,04	-0,51	3425	561,4	0	0
30	PQ	1,13	-0,15	0	0	0	0
31	PV	1,01	-0,06	1,71	0	243	-143
32	PV	1,06	-0,05	0	0	400	411,9
33	PV	1,06	-0,02	0	0	1000	477,1
34	SW	1,05	0,00	0	0	1160	390,1

Tabela 4.5 Ponto de Operação 2 - Sistema 34 Barras

A barra 29 foi mantida como a barra crítica, a sub-rede foi determinada e foram calculadas as variações, conforme (4.1), (4.2) e (4.3).

As variações, assim como os índices, são apresentadas na Tabela 4.6.

Barra	Beta (graus)	Sm (pu)	Si (pu)	Barra "De"	Barra "Para"	Var β	VarSm	VarSmi
1	-35,402	-40,519	39,641	1	2	-515,013	-278,187	-190,070
2	146,923	72,200	0,000	2	3	0,233	-1,921	-1,921
3	146,580	70,813	0,000	3	4	3,005	-18,571	-18,571
4	142,175	57,662	0,000	4	7	-19,358	-30,776	-30,776
7	114,653	39,916	0,000	7	10	-21,312	-27,111	-27,111
10	90,218	29,094	0,000	10	13	29,491	-22,569	-22,569
13	116,824	22,528	0,000	13	14	4,362	-7,367	-7,367
14	121,920	20,868	0,000	14	24	4,251	-7,170	-7,170
15	114,602	45,613	0,000	15	7	0,045	-12,490	-12,490
16	114,420	46,163	0,000	16	15	0,159	-1,192	-1,192
17	108,226	98,531	0,044	17	16	5,723	-53,149	-53,128
18	106,355	99,504	0,000	18	17	-1,759	-0,977	-1,022
19	106,326	96,010	14,998	31	17	-7,117	180,625	267,107
20	106,211	93,558	0,000	18	19	0,027	-3,511	-18,584
21	92,358	126,540	0,028	32	18	-4,859	140,050	166,792
22	95,241	73,465	0,024	19	16	7,612	-51,919	-43,017
24	127,102	19,372	0,000	22	19	-11,639	30,688	10,309
27	129,648	18,927	0,000	20	19	-0,109	2,621	-13,410
28	131,193	20,009	0,000	33	20	3,042	135,701	215,409
29	137,757	39,555	34,707	21	17	-17,182	-22,134	-22,152
30	102,134	32,520	0,000	34	21	18,356	261,160	360,558
31	101,035	35,111	8,284	21	22	-3,122	-41,943	-41,949
32	101,427	41,451	4,155	24	27	2,003	-2,300	-2,300
33	109,542	39,694	10,031	27	29	6,255	108,989	-74,388
34	113,122	35,037	7,568	13	28	12,300	-11,184	-11,184
				28	29	5,004	97,689	-75,773
				30	28	28,452	-38,473	-38,473
				16	30	-10,738	-29,554	-29,554

Tabela 4.6 Resultados das Variações dos Índices - Ponto de Operação (2)

Na Figura 4.5 é apresentada a sub-rede associada à barra crítica 29, e são assinalados os ramos mais críticos, segundo os resultados obtidos na Tabela 4.6.

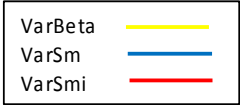


Figura 4.5 Ramos Críticos da Sub-Rede - Ponto de Operação (2)

Observa-se que, os resultados das três variações assinalam os ramos 1-2, 4-7, 16-30, 17-16, 19-16, e 30-28, enquanto, as variações VarSm e VarSmi assinalam os ramos 28-29, 27-29 e 21-22 como os mais críticos da sub-rede.

Note-se que o valor em percentual das variações para este ponto de operação são menores do que no primeiro, a potência ativa nos geradores 31, 32, 33 e 34 foi diminuída, enquanto as potências dos geradores 1 e 26 foram aumentadas. Assim, a potência ativa transmitida para a barra 16 agora é menor, tendo resultados mais “favoráveis” nos índices de estabilidade de tensão. Não há uma explicação imediata para a seleção do ramo 21-22.

Pode-se dizer que a mudança no ponto de operação, foi identificada pelas avaliações propostas.

Na Tabela 4.7 é apresentado o terceiro ponto de operação analisado. A potência ativa dos geradores 1 e 26 tiveram aumento acentuado, os geradores 31, 32 e 33 tiveram uma diminuição acentuada, enquanto o gerador 34 teve um pequeno aumento, em relação ao primeiro ponto de operação.

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (rad)	Cargas		Geradores	
				MW	MVAr	MW	MVAr
1	PV	1,03	0,20	8	0	4110	1128
2	PQ	1,06	0,06	0	0	0	0
3	PQ	1,07	0,06	0	0	0	0
4	PQ	1,03	0,00	0	0	0	0
7	PQ	1,11	-0,21	0	0	0	0
10	PQ	1,12	-0,33	0	0	0	0
13	PQ	1,07	-0,47	0	0	0	0
14	PQ	1,11	-0,50	0	0	0	0
15	PQ	1,04	-0,22	0	0	0	0
16	PQ	1,05	-0,22	0	0	0	0
17	PQ	1,06	-0,19	4,44	0	0	0
18	PQ	1,08	-0,21	0	0	0	0
19	PQ	1,11	-0,25	1461	-339	0	0
20	PQ	1,10	-0,25	0	0	0	0
21	PQ	1,11	-0,14	2,83	0	0	0
22	PQ	1,12	-0,20	2,36	0	0	0
23	PQ	1,11	-0,27	678,3	120,8	0	0
24	PQ	1,10	-0,56	0	0	0	0
25	PQ	1,11	-0,56	6150	-2400	0	0
26	PV	1,10	-0,54	0	0	5590	1363
27	PQ	1,08	-0,57	0	0	0	0
28	PQ	1,04	-0,56	0	0	0	0
29	PQ	1,04	-0,61	3425	561,4	0	0
30	PQ	1,12	-0,26	0	0	0	0
31	PV	1,01	-0,16	1,71	0	243	-143
32	PV	1,06	-0,17	0	0	400	411,9
33	PV	1,06	-0,22	0	0	300	477,1
34	SW	1,05	0,00	0	0	1700	390,1

Tabela 4.7 Ponto de Operação 3 - Sistema 34 Barras

A barra 29 foi mantida como a barra crítica, a sub-rede foi determinada e foram calculadas as variações dos índices, conforme (4.1), (4.2) e (4.3).

Os resultados obtidos das variações, assim como os índices, são apresentados na Tabela 4.8.

Barr a	Beta (graus)	Sm (pu)	Si (pu)	Barr a "De"	Barra "Para "	Var β	VarSm	VarSmi
1	-12,225	-70,192	41,135	1	2	-1440,948	-163,422	-139,988
2	163,93 1	44,517	0,000	2	3	0,212	-2,413	-2,413
3	163,58 4	43,443	0,000	3	4	2,760	-23,305	-23,305
4	159,06 9	33,319	0,000	4	7	22,631	-39,192	-39,192
7	123,07 1	20,261	0,000	7	10	20,639	-23,948	-23,948
10	97,671	15,409	0,000	10	13	-35,645	-19,805	-19,805
13	132,48 6	12,357	0,000	13	14	-4,248	-5,066	-5,066
14	138,11 4	11,731	0,000	14	24	-3,537	53,550	-5,443
15	123,30 5	21,952	0,000	7	15	-0,190	8,348	8,348
16	123,08 7	22,098	0,000	15	16	0,177	0,664	0,664
17	130,50 2	61,343	0,044	17	16	5,682	-63,977	-63,951
21	95,388	111,43 1	0,028	31	17	-658,793	-1176,701	-546,369
24	142,99 9	11,093	0,000	21	17	-36,812	-44,950	-44,976
27	144,53 1	10,876	0,000	34	21	34,579	337,532	803,430
28	144,39 8	11,241	0,000	24	27	-1,071	-1,956	-1,956
29	149,45 9	36,338	34,707	27	29	-3,410	234,131	-85,000
30	109,91 9	18,013	0,000	13	28	-8,991	-9,035	-9,035
31	-23,354	-5,697	8,035	28	29	-3,505	223,281	-85,487
34	145,80 6	25,468	13,137	30	28	-31,368	-37,598	-37,598
				16	30	10,698	-18,484	-18,484

Tabela 4.8 Resultados das Variações dos Índices - Ponto de Operação (3)

Na Figura 4.6 é apresentada a sub-rede associada à barra crítica 29, e são assinalados os ramos mais críticos segundo os resultados obtidos na Tabela 4.8.

Na Tabela 4.9 é apresentado o quarto ponto de operação. A potência ativa dos geradores 1 e 26 teve um aumento acentuado, enquanto a potência dos geradores 31, 32, 33 e 34 teve uma redução acentuada, em relação ao primeiro ponto de operação.

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (rad)	Cargas		Geradores	
				MW	MVAr	MW	MVAr
1	SW	1,03	0,00	8	0	4510	1128
2	PQ	1,07	-0,13	0	0	0	0
3	PQ	1,07	-0,14	0	0	0	0
4	PQ	1,04	-0,20	0	0	0	0
7	PQ	1,13	-0,40	0	0	0	0
10	PQ	1,15	-0,48	0	0	0	0
13	PQ	1,10	-0,58	0	0	0	0
14	PQ	1,13	-0,60	0	0	0	0
15	PQ	1,06	-0,43	0	0	0	0
16	PQ	1,06	-0,43	0	0	0	0
17	PQ	1,06	-0,49	4,44	0	0	0
18	PQ	1,08	-0,51	0	0	0	0
19	PQ	1,11	-0,56	1461	-339	0	0
20	PQ	1,11	-0,56	0	0	0	0
21	PQ	1,11	-0,55	2,83	0	0	0
22	PQ	1,12	-0,58	2,36	0	0	0
23	PQ	1,11	-0,66	678,3	120,8	0	0
24	PQ	1,10	-0,62	0	0	0	0
25	PQ	1,11	-0,61	6150	-2400	0	0
26	PV	1,10	-0,59	0	0	6590	1363
27	PQ	1,09	-0,64	0	0	0	0
28	PQ	1,06	-0,66	0	0	0	0
29	PQ	1,06	-0,70	3425	561,4	0	0
30	PQ	1,14	-0,46	0	0	0	0
31	PV	1,01	-0,47	1,71	0	243	-143
32	PV	1,06	-0,47	0	0	400	411,9
33	PV	1,06	-0,53	0	0	300	477,1
34	PV	1,05	-0,52	0	0	300	390,1

Tabela 4.9 Ponto de Operação 4 - Sistema 34 Barras

A barra 29 foi mantida como a barra crítica, a sub-rede foi determinada e foram calculadas as variações dos índices, conforme (4.1), (4.2) e (4.3).

Os resultados obtidos das variações, assim como os índices, são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 Resultados das Variações dos Índices - Ponto de Operação (4)

Figura 4.7 Ramos Críticos da Sub-Rede - Ponto de Operação (4)

Observa-se que as três variações assinalam os ramos 4-7 e 24-25, as variações VarSm e VarSmi assinalam os ramos 3-4, 24-27 e 16-30, as variações de VarBeta e VarSmi assinalam o ramo 27-29 como os mais críticos da sub-rede.

A potência dos geradores 1 e 26 foi bastante aumentada de modo que os geradores 31, 32, 33 e 34 não fazem parte da sub-rede. Os valores críticos das variações, em comparação com os outros pontos de operação não são muito altos, ou seja, o redirecionamento do fluxo de potência teve resultados “favoráveis” nos índices de estabilidade de tensão.

As linhas 25-24, 24-27 e 27-29, que transmitem a potência gerada pelo gerador 26 são assinaladas como críticas, o que parece coerente.

4.2.3. Conclusões dos Exemplos Numéricos

No primeiro ponto de operação, observam-se variações altas, e vários ramos críticos. Isto porque os geradores 1, 31, 32, 33 e 34 pertencem à sub-rede e fornecem valores de potência ativa substanciais à barra crítica. Assim, toda a sub-rede está “comprometida” em atender a carga da barra 29.

No segundo ponto de operação, observam-se variações menores, com a sub-rede igual à do primeiro ponto de operação. A potência fornecida pelos geradores 31, 32, 33 e 34 foi diminuída, sendo favorável para os índices de estabilidade de tensão, indicando “alívio” nos fluxos de potência nessa parte da sub-rede.

No terceiro ponto de operação, os geradores 26, 32 e 33 não fazem mais parte da sub-rede, enquanto, o gerador 34 teve sua potência aumentada. Assim, pode-se observar um aumento nas variações dos índices entre as barras 31-17 e 21-17.

No quarto ponto de operação, a sub-rede só inclui os geradores 1 e 26, podem-se observar valores de variações mais favoráveis entre as barras. Os ramos críticos correspondem principalmente aos ramos que conectam o gerador 26 à barra crítica 29.

4.3.

Comparação dos Resultados Obtidos com o Uso de Injeções de Potência para Determinar o Ramo mais Carregado

O objetivo é fazer uma comparação entre os resultados obtidos na Seção 4.2.2 e o método descrito na Seção 4.3.2 em [18]. Ao contrario dos critérios propostos na Seção 4.2, que analisa cada ramo individualmente, o método descrito em [18] usa o conceito de “caminhos de transmissão”, desde geradores até a barra crítica de carga.

Assim, os quatro pontos de operação antes descritos foram testados e analisados.

Para o primeiro ponto de operação foram selecionados os 16 caminhos mais críticos e são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 Caminhos de Transmissão Críticos - Ponto de Operação (1)

Caminho 1 - M= -97,42%			Caminho 3 - M= -93,78%		
Ramo	Subcaminho	Margem	Ramo	Subcaminho	Margem
1	32-18	87,70%	1	34-21	84,64%
2	32-18-17	80,84%	2	34-21-22	86,18%
3	32-18-17-16	23,36%	3	34-21-22-19	80,19%
4	32-18-17-16-15	-29,07%	4	34-21-22-19-16	-29,24%
5	32-18-17-16-15-7	-34,36%	5	34-21-22-19-16-30	20,64%
6	32-18-17-16-15-7-10	-78,12%	6	34-21-22-19-16-30-28	-59,68%
7	32-18-17-16-15-7-10-13	-98,10%	7	34-21-22-19-16-30-28-29	-93,78%
8	32-18-17-16-15-7-10-13-28	-96,60%			
9	32-18-17-16-15-7-10-13-28-29	-97,42%			

Caminho 2 - M= -95,02%			Caminho 4 - M= -92,85%		
Ramo	Subcaminho	Margem	Ramo	Subcaminho	Margem
1	32-18	87,70%	1	32-18	87,70%
2	32-18-19	80,84%	2	32-18-19	89,30%
3	32-18-19-16	23,36%	3	32-18-19-16	12,45%
4	32-18-19-16-15	-29,07%	4	32-18-19-16-15	-16,50%
5	32-18-19-16-15-7	-34,36%	5	32-18-19-16-15-7	-23,54%
6	32-18-19-16-15-7-10	-78,12%	6	32-18-19-16-15-7-10	-74,31%
7	32-18-19-16-15-7-10-13	-98,10%	7	32-18-19-16-15-7-10-13	-94,90%
8	32-18-19-16-15-7-10-13-14	-95,68%	8	32-18-19-16-15-7-10-13-28	-90,68%
9	32-18-19-16-15-7-10-13-14-24	-96,48%	9	32-18-19-16-15-7-10-13-28-29	-92,85%
10	32-18-19-16-15-7-10-13-14-24-27	-94,34%			
11	32-18-19-16-15-7-10-13-14-24-27-29	-95,02%			

Caminho 5 - M= -92,14%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	33-20	87,06%
2	33-20-19	86,16%
3	33-20-19-16	36,28%
4	33-20-19-16-15	-14,77%
5	33-20-19-16-15-7	-22,06%
6	33-20-19-16-15-7-10	-73,80%
7	33-20-19-16-15-7-10-13	-94,44%
8	33-20-19-16-15-7-10-13-28	-89,81%
9	33-20-19-16-15-7-10-13-28-29	-92,14%

Caminho 6 - M= -91,65%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	34-21	84,64%
2	34-21-17	79,77%
3	34-21-17-16	-25,88%
4	34-21-17-16-15	-45,72%
5	34-21-17-16-15-7	-49,06%
6	34-21-17-16-15-7-10	-83,41%
7	34-21-17-16-15-7-10-13	-95,65%
8	34-21-17-16-15-7-10-13-28	-90,92%
9	34-21-17-16-15-7-10-13-28-29	-91,65%

Caminho 7 - M= -91,64%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	34-21	84,64%
2	34-21-17	79,77%
3	34-21-17-16	-25,88%
4	34-21-17-16-30	41,53%
5	34-21-17-16-30-28	-47,03%
6	34-21-17-16-30-28-29	-91,64%

Caminho 8 - M= -90,08%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	32-18	87,70%
2	32-18-19	80,84%
3	32-18-19-16	23,36%
4	32-18-19-16-30	53,32%
5	32-18-19-16-30-28	-37,83%
6	32-18-19-16-30-28-29	-90,08%

Caminho 9 - M= -89,20%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	32-18	87,70%
2	32-18-17	89,30%
3	32-18-17-16	12,45%
4	32-18-17-16-30	59,41%
5	32-18-17-16-30-28	-32,62%
6	32-18-17-16-30-28-29	-89,20%

Caminho 10 - M= -89,10%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	33-20	87,06%
2	33-20-19	86,16%
3	33-20-19-16	36,28%
4	33-20-19-16-30	60,09%
5	33-20-19-16-30-28	-31,99%
6	33-20-19-16-30-28-29	-89,10%

Caminho 11 - M= -88,07%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	31-17	85,50%
2	31-17-16	30,59%
3	31-17-16-30	66,27%
4	31-17-16-30-28	-25,88%
5	31-17-16-30-28-29	-88,07%

Caminho 12 - M= -86,86%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	32-18	87,70%
2	32-18-17	89,30%
3	32-18-17-16	12,45%
4	32-18-17-16-15	-16,50%
5	32-18-17-16-15-7	-23,50%
6	32-18-17-16-15-7-10	-74,31%
7	32-18-17-16-15-7-10-13	-94,90%
8	32-18-17-16-15-7-10-13-14	-88,91%
9	32-18-17-16-15-7-10-13-14-24	-90,29%
10	32-18-17-16-15-7-10-13-14-24-27	-84,83%
11	32-18-17-16-15-7-10-13-14-24-27-29	-86,86%

Caminho 13 - M= -85,53%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	33-20	87,06%
2	33-20-19	86,16%
3	33-20-19-16	36,28%
4	33-20-19-16-15	-14,77%
5	33-20-19-16-15-7	-22,06%
6	33-20-19-16-15-7-10	-73,80%
7	33-20-19-16-15-7-10-13	-94,44%
8	33-20-19-16-15-7-10-13-14	-87,96%
9	33-20-19-16-15-7-10-13-14-24	-89,32%
10	33-20-19-16-15-7-10-13-14-24-27	-83,27%
11	33-20-19-16-15-7-10-13-14-24-27-29	-85,53%

Caminho 14 - M= -84,10%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	31-17	85,50%
2	31-17-16	30,59%
3	31-17-16-15	4,91%
4	31-17-16-15-7	-5,39%
5	31-17-16-15-7-10	-68,10%
6	31-17-16-15-7-10-13	-89,17%
7	31-17-16-15-7-10-13-28	-80,02%
8	31-17-16-15-7-10-13-28-29	-84,10%

Caminho 15 - M= -82,32%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	34-21	84,64%
2	34-21-22	86,18%
3	34-21-22-19	80,19%
4	34-21-22-19-16	-29,24%
5	34-21-22-19-16-15	-61,48%
6	34-21-22-19-16-15-7	-63,35%
7	34-21-22-19-16-15-7-10	-88,71%
8	34-21-22-19-16-15-7-10-13	-90,36%
9	34-21-22-19-16-15-7-10-13-28	-80,09%
10	34-21-22-19-16-15-7-10-13-28-29	-82,32%

Caminho 16 - M= -81,50%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	34-21	84,64%
2	34-21-17	79,77%
3	34-21-17-16	-25,88%
4	34-21-17-16-15	-45,72%
5	34-21-17-16-15-7	-49,06%
6	34-21-17-16-15-7-10	-83,41%
7	34-21-17-16-15-7-10-13	-95,65%
8	34-21-17-16-15-7-10-13-14	-91,31%
9	34-21-17-16-15-7-10-13-14-24	-88,22%
10	34-21-17-16-15-7-10-13-14-24-27	-79,49%
11	34-21-17-16-15-7-10-13-14-24-27-29	-81,50%

As linhas mais críticas para cada um dos caminhos são:

Caminho 1: 10-13, 13-28, 28-29.

Caminho 2: 10-13, 13-14, 14-24, 24-27, 27-29.

Caminho 3: 28-29.

Caminho 4: 10-13, 13-28, 28-29.

Caminho 5: 10-13, 13-28, 28-29.

Caminho 6: 10-13, 13-28, 28-29.

Caminho 7: 28-29.

Caminho 8: 28-29.

Caminho 9: 28-29.

Caminho 10: 28-29.

Caminho 11: 28-29.

Caminho 12: 10-13, 13-14, 14-24, 24-27, 27-29.

Caminho 13: 10-13, 13-14, 14-24, 24-27, 27-29.

Caminho 14: 10-13, 13-28, 28-29.

Caminho 15: 10-13, 13-28, 28-29.

Caminho 16: 10-13, 13-14, 14-24, 24-27, 27-29.

Pode-se observar que as linhas citadas mais vezes foram 28-29, 10-13 e 13-28 com um total de 12, 10 e 6 repetições respectivamente, como é assinalado na Figura 4.4. Esses resultados são coerentes, lembrando que a geração vinda da parte inferior da sub-rede passa também pelo ramo 10-13.

Para o segundo ponto de operação foram selecionados os 8 caminhos mais críticos e são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 Caminhos de Transmissão Críticos - Ponto de Operação (2)

Caminho 1 - M= -89,29%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	34-21	92,50%
2	34-21-22	93,22%
3	34-21-22-19	90,77%
4	34-21-22-19-16	67,25%
5	34-21-22-19-16-30	64,16%
6	34-21-22-19-16-30-28	-18,61%
7	34-21-22-19-16-30-28-29	-89,29%

Caminho 5 - M= -81,24%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	33-20	90,46%
2	33-20-19	89,95%
3	33-20-19-16	85,23%
4	33-20-19-16-30	81,98%
5	33-20-19-16-30-28	27,17%
6	33-20-19-16-30-28-29	-81,24%

Caminho 2 - M= -85,61%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	34-21	92,50%
2	34-21-17	87,39%
3	34-21-17-16	84,66%
4	34-21-17-16-30	73,59%
5	34-21-17-16-30-28	6,48%
6	34-21-17-16-30-28-29	-85,61%

Caminho 6 - M= -79,47%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	31-17	91,47%
2	31-17-16	92,11%
3	31-17-16-30	84,76%
4	31-17-16-30-28	33,17%
5	31-17-16-30-28-29	-79,47%

Caminho 3 - M= -85,36%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	34-21	92,50%
2	34-21-17	87,39%
3	34-21-17-18	88,43%
4	34-21-17-18-19	74,93%
5	34-21-17-18-19-16	77,31%
6	34-21-17-18-19-16-30	74,13%
7	34-21-17-18-19-16-30-28	7,94%
8	34-21-17-18-19-16-30-28-29	-85,36%

Caminho 7 - M= -77,85%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	31-17	91,47%
2	31-17-18	95,33%
3	31-17-18-19	87,94%
4	31-17-18-19-16	90,37%
5	31-17-18-19-16-30	87,07%
6	31-17-18-19-16-30-28	37,86%
7	31-17-18-19-16-30-28-29	-77,85%

Caminho 4 - M= -82,93%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	32-18	96,15%
2	32-18-19	91,31%
3	32-18-19-16	82,24%
4	32-18-19-16-30	79,01%
5	32-18-19-16-30-28	20,33%
6	32-18-19-16-30-28-29	-82,93%

Caminho 8 - M= -74,11%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	1-2	87,20%
2	1-2-3	86,78%
3	1-2-3-4	80,95%
4	1-2-3-4-7	61,90%
5	1-2-3-4-7-15	91,86%
6	1-2-3-4-7-15-16	91,74%
7	1-2-3-4-7-15-16-30	91,69%
8	1-2-3-4-7-15-16-30-28	46,57%
9	1-2-3-4-7-15-16-30-28-29	-74,11%

Pode-se observar que, para este ponto de operação, a linha crítica em todos os caminhos é a linha 28-29, sendo citada nos 8 caminhos, como é assinalado na Figura 4.5. Resultado coerente.

Para o terceiro ponto de operação foram selecionados os 3 caminhos mais críticos e são apresentados na Tabela 4.13.

Caminho 1 - M= -85,66%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	34-21	86,91%
2	34-21-17	85,51%
3	34-21-17-16	84,44%
4	34-21-17-16-30	73,67%
5	34-21-17-16-30-28	7,07%
6	34-21-17-16-30-28-29	-85,66%

Caminho 2 - M= -79,55%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	31-17	91,71%
2	31-17-16	92,00%
3	31-17-16-30	84,81%
4	31-17-16-30-28	33,60%
5	31-17-16-30-28-29	-79,55%

Caminho 3 - M= -74,21%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	1-2	87,20%
2	1-2-3	86,78%
3	1-2-3-4	80,95%
4	1-2-3-4-7	61,90%
5	1-2-3-4-7-15	91,86%
6	1-2-3-4-7-15-16	91,74%
7	1-2-3-4-7-15-16-30	91,69%
8	1-2-3-4-7-15-16-30-28	46,57%
9	1-2-3-4-7-15-16-30-28-29	-74,11%

Tabela 4.13 Caminhos de Transmissão Críticos - Ponto de Operação (3)

Pode-se observar que, para este ponto de operação, a linha crítica em todos os caminhos é a linha 28-29, como é assinalado na Figura 4.6. Resultado coerente.

Para o quarto ponto de operação foi obtido um único caminho crítico e é apresentado na Tabela 4.14.

Caminho 1 - M= -69,30%		
Ramo	Subcaminho	Margem
1	1-2	86,83%
2	1-2-3	86,40%
3	1-2-3-4	81,06%
4	1-2-3-4-5	52,43%
5	1-2-3-4-5-7	62,54%
6	1-2-3-4-5-7-15	84,34%
7	1-2-3-4-5-7-15-16	84,05%
8	1-2-3-4-5-7-15-16-30	94,02%
9	1-2-3-4-5-7-15-16-30-28	58,19%
10	1-2-3-4-5-7-15-16-30-28-29	-69,30%

Tabela 4.14 Caminhos de Transmissão Críticos - Ponto de Operação (4)

Observa-se também que para este ponto de operação a linha crítica é a linha 28-29 como é assinalado na Figura 4.7. Resultado coerente.

4.4. Conclusões

Foram testados quatro pontos de operação diferentes e foi calculada a variação dos índices de estabilidade de tensão em cada ramo da sub-rede, de acordo com as diferentes formas de avaliação propostas neste capítulo.

A maioria dos resultados obtidos indicam uma coerência na determinação dos ramos mais críticos da sub-rede, identificando as mudanças na distribuição de potência ativa dos geradores em cada um dos pontos de operação. Em alguns casos, ramos foram apontados sem que haja explicação intuitiva. É importante ressaltar que os critérios de seleção se baseiam em cada ramo individualmente. Como visto na Seção 3.10, isso pode ser inadequado.

Foram testados os quatro pontos de operação com o método de injeções de potência descrito em [18], e foram calculados os caminhos de transmissão que levam potência ativa à barra crítica. Assim, determinaram-se os ramos mais críticos em cada um dos caminhos. Todos os resultados foram coerentes.

Finalmente conclui-se que, com a observação das variações dos índices em cada ramo, é possível identificar qual é a área da sub-rede mais comprometida com as limitações da barra crítica, mas não é possível identificar qual é o ramo de transmissão mais carregado. Os resultados assinalam vários ramos com variações de índices acentuadas, e não há um critério de seleção definitivo para determinar qual deles é o mais carregado.